nagra.

Technischer Bericht 08-05

Vorschlag geologischer Standortgebiete
für das SMA- und das HAA-Lager

Begründung der Abfallzuteilung, der Barrierensysteme und der Anforderungen an die Geologie

Bericht zur Sicherheit und technischen Machbarkeit

Oktober 2008

**Nationale Genossenschaft
für die Lagerung
radioaktiver Abfälle**

Hardstrasse 73
CH-5430 Wettingen
Telefon 056-437 11 11

www.nagra.ch

nagra.

Technischer Bericht 08-05

Vorschlag geologischer Standortgebiete
für das SMA- und das HAA-Lager

Begründung der Abfallzuteilung, der Barrierensysteme und der Anforderungen an die Geologie

Bericht zur Sicherheit und technischen Machbarkeit

Oktober 2008

**Nationale Genossenschaft
für die Lagerung
radioaktiver Abfälle**

Hardstrasse 73
CH-5430 Wettingen
Telefon 056-437 11 11

www.nagra.ch

Vorliegender Bericht wurde von einem Projektteam erarbeitet bestehend aus Dr. P. Gribi, Dr. J. Schneider und Dr. P. Zuidema mit Beiträgen von zahlreichen weiteren Personen (insbesondere Dr. M. Brennwald, T. Fries, Dr. J. Holocher, B. Kunz, Dr. G. Mayer, Dr. H. Müller, Dr. B. Schwyn). Die Projektleitung für diesen Bericht hatte Dr. J. Schneider; diejenige für das Gesamtprojekt der Erarbeitung von Vorschlägen für geologische Standortgebiete hinsichtlich Sicherheit und technischer Machbarkeit lag bei Dr. P. Zuidema.

Der Bericht und dazu verwendete Grundlagenberichte haben von zahlreichen Fachdiskussionen und Reviews durch eine Vielzahl von Personen profitiert; diesen Personen sei an dieser Stelle für ihre Arbeit gedankt.

ISSN 1015-2636

"Copyright © 2008 by Nagra, Wettingen (Schweiz) / Alle Rechte vorbehalten.
Das Werk einschliesslich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung ausserhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung der Nagra unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Übersetzungen, Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen und Programmen, für Mikroverfilmungen, Vervielfältigungen usw."

Zusammenfassung

Die Entsorgungspflichtigen haben gemäss dem Konzept "Sachplan geologische Tiefenlager" (BFE 2008) im Hinblick auf die Standortwahl in einer ersten Etappe Vorschläge für geologische Standortgebiete für das geologische Tiefenlager für die schwach- und mittelaktiven Abfälle (SMA-Lager) und für das geologische Tiefenlager für die hochaktiven Abfälle (HAA-Lager) einzureichen. Die entsprechenden Vorschläge, welche die Nagra im Auftrag der Entsorgungspflichtigen für die Etappe 1 des Sachplanverfahrens erarbeitet hat, sind in Nagra (2008b) begründet und dokumentiert.

Gemäss Sachplan hat die Erarbeitung dieser Vorschläge in fünf Schritten zu erfolgen: Im *ersten Schritt* wird das Abfallinventar, das auch Reserven für zukünftige Entwicklungen enthält, auf das SMA- und das HAA-Lager aufgeteilt. Anhand dieser Abfallzuteilung werden im *zweiten Schritt* die Barrieren- und Sicherheitskonzepte für die beiden Lager festgelegt. Basierend darauf erfolgt im Hinblick auf die Evaluation der geologischen Standortmöglichkeiten die Ableitung quantitativer und qualitativer Vorgaben und Anforderungen an die Geologie. Dies betrifft den Betrachtungszeitraum, den Platzbedarf des Lagers, die Eigenschaften des Wirtgesteins (Tiefenlage, Mächtigkeit, laterale Ausdehnung, hydraulische Durchlässigkeit), die Langzeitstabilität, die Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen und die bautechnische Eignung.

Die Schritte 3 bis 5 umfassen die Evaluation der geologischen Möglichkeiten: Im *dritten Schritt* wird die grossräumige geologisch-tektonische Situation evaluiert, und es werden die weiter zu betrachtenden Grossräume festgelegt. Im *vierten Schritt* werden innerhalb der weiter betrachteten Grossräume die bevorzugten Wirtgesteine ausgewählt. Im *fünften Schritt* erfolgt die Evaluation der Konfigurationen, d.h. der räumlichen Anordnung der bevorzugten Wirtgesteine innerhalb der weiter betrachteten Grossräume und es werden geologische Standortgebiete abgegrenzt.

Der vorliegende Bericht ergänzt den Bericht der Nagra mit dem Vorschlag geologischer Standortgebiete (Nagra 2008b). Er begründet die Abfallzuteilung zu den geologischen Tiefenlagern SMA und HAA, legt die entsprechenden Barrieren- und Sicherheitskonzepte fest und begründet die lagerspezifischen Anforderungen an die Geologie (Schritte 1 und 2). Diese Anforderungen werden im schrittweisen Einengungsverfahren zur Auswahl der geologischen Standortgebiete verwendet (Nagra 2008b). Der vorliegende Bericht ist keine konventionelle Sicherheitsanalyse; insbesondere enthält er auch keine sicherheitstechnische Bewertung von konkreten geologischen Tiefenlagern an bestimmten Standorten und in bestimmten Wirtgesteinen. Vielmehr werden anhand von orientierenden Sicherheitsbetrachtungen und Erfahrungen die erforderlichen Anforderungen abgeleitet. Standortbezogene Sicherheitsanalysen werden Gegenstand der nachfolgenden Etappen 2 und 3 des Sachplanverfahrens sein.

Im Folgenden werden die Hauptresultate kurz vorgestellt.

Abfallzuteilung

Die für die Abfallzuteilung, Lagerauslegung und Festlegung von geologischen Standortgebieten zu berücksichtigenden Abfalleigenschaften sind gemäss BFE (2008) Inventar, Halbwertszeiten, Aktivität und Radiotoxizität der sicherheitsrelevanten Radionuklide sowie ihre zeitliche Entwicklung; ferner Abfallvolumen, Materialeigenschaften und ihre möglichen Auswirkungen auf das Wirtgestein, Wärmeentwicklung, Gehalt an potenziell Gas produzierenden Bestandteilen (Metalle, Organika) sowie Gehalt an Komplexbildnern. Die Beschreibung der Abfalleigenschaften bildet den Ausgangspunkt für die Abfallzuteilung. Für diese Beschreibung werden die

Abfälle in Übereinstimmung mit der Kernenergieverordnung (KEV 2004) in die Kategorien HAA, ATA und SMA eingeteilt. Die Beschreibung zeigt, dass sich die HAA in allen Eigenschaften deutlich von denjenigen sowohl der ATA als auch der SMA unterscheiden. Deshalb werden die HAA wie gemäss bisherigem Konzept in einem separaten Lager, mit einem spezifisch auf die HAA abgestimmten Barrierensystem, entsorgt.

Die ATA und die SMA unterscheiden sich zwar bzgl. spezifischer Radiotoxizität, bzgl. Spezifischer Aktivität und bzgl. spezifischer Wärmeleistung, sowohl was die absoluten Werte betrifft als auch insbesondere in Bezug auf den zeitlichen Verlauf. Hinsichtlich vieler anderer Eigenschaften sind die ATA und die SMA jedoch sehr ähnlich. Dies trifft insbesondere zu auf das Materialinventar.

Grundsätzlich ist ein gemeinsames Lager für alle ATA und SMA denkbar. Die Erfahrung zeigt einerseits, dass ein solches Lager in einem günstigen Wirtgestein in einer günstigen geologischen Situation das Potenzial hat, die behördlichen Sicherheitsanforderungen zu erfüllen. Andererseits dominieren erfahrungsgemäss einige wenige der ATA- und SMA-Abfallsorten die berechneten Dosen. Falls diese dosisdominierenden Abfallsorten anderweitig entsorgt werden, reduzieren sich deshalb bei gleichbleibender Sicherheit die Anforderungen an die Geologie, mit entsprechend erweiterten Möglichkeiten, geeignete Standortgebiete zu finden. Aus diesen Gründen wird am bisherigen Konzept mit einem HAA-Lager mit einem LMA-Teil und einem SMA-Lager festgehalten mit dem Ziel, die dosisdominierenden ATA- bzw. SMA-Abfallsorten dem LMA-Lager zuzuteilen, so dass die sicherheitstechnischen Anforderungen an die Geologie für das SMA-Lager entsprechend reduziert werden können. Die ATA/SMA werden hauptsächlich aufgrund von generischen Dosisberechnungen auf die beiden Lager aufgeteilt, da sich die ATA und die SMA bzgl. Materialinventar und Gasbildungsraten nur geringfügig unterscheiden und da sowohl das HAA-Lager (inkl. LMA-Teil) und das SMA-Lager so ausgelegt werden, dass lagerbedingte Einflüsse, die von den Abfällen ausgehen, die Langzeitsicherheit nicht signifikant beeinträchtigen.

Der entsprechende Vorschlag der Nagra enthält zwei Varianten, charakterisiert durch Mindestanforderungen an die grossräumige hydraulische Durchlässigkeit des Wirtgesteins für das SMA-Lager von 10^{-10} m/s und 10^{-9} m/s. Erwartungsgemäss ist das Volumen der Abfälle, die dem SMA-Lager zugeteilt werden, bei der Variante 10^{-9} m/s etwas kleiner als bei der Variante 10^{-10} m/s. Aufgrund der Einschätzung der geologischen Möglichkeiten in der Schweiz, die zeigt, dass es genügend geeignete Wirtgesteine resp. einschlusswirksame Gebirgsbereiche mit einer grossräumigen hydraulischen Durchlässigkeit von 10^{-10} m/s oder besser gibt, wird die entsprechende Zuteilungsvariante als Referenzzuteilung bezeichnet; die Variante für 10^{-9} m/s als alternative Zuteilung. In beiden Varianten werden alle ATA dem HAA-Lager (LMA-Teil) zugeteilt. Bei der Referenzzuteilung wird zusätzlich etwas weniger als 1 % des Volumens der SMA dem HAA-Lager (LMA-Teil) zugeteilt; im Falle der alternativen Zuteilung etwas weniger als 10 %.

Barrieren- und Sicherheitskonzept

Das Barrierenkonzept beschreibt die funktionale Beschaffenheit der verschiedenen technischen und geologischen Barrieren des Tiefenlagers und basiert auf einem System von gestaffelten passiven Sicherheitsbarrieren, bestehend aus Abfallmatrizen, Endlagerbehälter, der Verfüllung der untertägigen Lagerkammern, der Verfüllung und Versiegelung der untertägigen Bauwerke, dem Wirtgestein und allenfalls vorhandenen Rahmengesteinen sowie der geologischen Situation.

Das Sicherheitskonzept zeigt auf, wie die verschiedenen technischen und geologischen Barrieren zur Sicherheit des Gesamtsystems beitragen bzw. welche Sicherheitsfunktionen sie gewähr-

leisten. Die Sicherheitsfunktionen bewirken die physische Trennung der Abfälle vom menschlichen Lebensraum und die Gewährleistung der erforderlichen Langzeitstabilität, den Einschluss der Radionuklide, die verzögerte Freisetzung der Radionuklide, die Radionuklidrückhaltung im Nahfeld und in der Geosphäre und gewährleisten kleine Freisetzungsraten.

Beim gewählten Sicherheitskonzept tragen sowohl die technischen als auch die geologischen Barrieren (Wirtgestein, allenfalls vorhandene Rahmengesteine und ihre geologische Situation) in signifikantem Masse zur Barrierenwirkung des Gesamtsystems bei. Ein System, bei welchem der Einschluss und die Rückhaltung der Radionuklide nur durch die technischen Barrieren gewährleistet würden, wird in Übereinstimmung mit den behördlichen Vorgaben nicht in Betracht gezogen

Weiter wird illustriert, welchen Beitrag zur Sicherheit die verschiedenen Elemente des Barrierensystems leisten. In beiden Lagertypen wird der weitaus grösste Anteil der Radiotoxizität durch Immobilisierung der Radionuklide und radioaktiven Zerfall bereits innerhalb der technischen Barrieren abgebaut. Weiter erfolgt während des Transports durch das Wirtgestein ein weiterer Abbau durch Zerfall, so dass derjenige Anteil der Radionuklide, der die technischen und geologischen Barrieren verlassen kann, nur noch einem winzigen Bruchteil der ursprünglichen Radiotoxizität entspricht. Dies bewirkt, dass die entsprechenden Dosen deutlich unter dem Schutzziel liegen.

Anforderungen an die Geologie

Die Festlegung der Anforderungen an die Geologie erfolgt in zwei Schritten. In einem ersten Schritt werden die Indikatoren festgelegt, welche die im Sachplan geologische Tiefenlager aufgeführten Kriterien adäquat erfassen und welche im Verfahren zur Festlegung von geologischen Standortgebieten verwendet werden. In einem zweiten Schritt werden die Anforderungen bzw. Bewertungsskalen für die Indikatoren festgelegt.

Den Ausgangspunkt bei der Festlegung der Indikatoren bilden die oben erwähnten Sicherheitsfunktionen sowie ein Satz von übergeordneten Prinzipien, welche die zuverlässige Erstellung der geologischen Tiefenlager und die Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen betreffen. Dazu wird ein Satz von Indikatoren mit zugehörigen Anforderungen bzw. Bewertungsskalen festgelegt, bei dessen Anwendung im Einengungsverfahren geologische Standortgebiete resultieren, in welchen geologische Tiefenlager gebaut werden können, welche die Sicherheitsfunktionen und Prinzipien erfüllen und genügend Sicherheit gewährleisten.

Für die Festlegung der Anforderungen bzw. Bewertungsskalen für die Indikatoren werden Radionuklid-Freisetzungsrechnungen, Modellrechnungen zum Verhalten einzelner Barrieren oder Eigenschaften, Mess- und Erfahrungswerte sowie qualitative Grundlagen verwendet.

Basierend auf den durchgeführten generischen Sicherheitsbetrachtungen sowie den Erfahrungen aus früheren System- und Sicherheitsanalysen werden die folgenden Merkmale für die Standortevaluation als besonders wichtig beurteilt:

- Bei der Identifikation geeigneter geologisch-tektonischer Grossräume (Schritt 3) gilt das Hauptaugenmerk der Langzeitstabilität der geologischen Situation (Geodynamik und Neotektonik, Hebung bzw. Erosion) und den typischen räumlichen Verhältnissen und ihrer Explorierbarkeit (regionales Störungsmuster und Lagerungsverhältnisse).
- Für die Identifikation potenziell geeigneter Wirtgesteine und einschlusswirksamer Gebirgsbereiche (Schritt 4) sind die Gesteinseigenschaften (insbesondere die Beständigkeit der Gesteinseigenschaften (Potenzial für Verkarstung), die hydraulische Durchlässigkeit und –

für Sedimentgesteine – ihr Selbstabdichtungsvermögen) unter Berücksichtigung der tektonischen Überprägung sowie das Potenzial für eine geeignete Geometrie der Gesteinsvorkommen (Mächtigkeit, minimale und maximale Tiefenlage, laterale Ausdehnung) sowie machbare geotechnische Eigenschaften ausschlaggebend.

- Bei der Identifikation geeigneter Konfigurationen (Schritt 5) stehen die räumlichen geologischen Verhältnisse im Vordergrund. Dazu gehören die Mächtigkeit in geeigneter Tiefenlage (minimale Tiefenlage im Hinblick auf flächenhafte Erosion und glaziale Tiefenerosion sowie bzgl. Gesteins-Dekompaktion; maximale Tiefenlage im Hinblick auf bautechnische Verhältnisse) und die laterale Ausdehnung (unter Berücksichtigung von regionalen geologischen Elementen) sowie die lokale geologisch-tektonische Situation.

Diese Merkmale sind in die verwendete Einengungsprozedur integriert und werden durch entsprechende Mindestanforderungen bzw. verschärfte Anforderungen sowie bei der Bewertung berücksichtigt.

Résumé

En vertu du plan sectoriel « Dépôts en couches géologiques profondes » (BFE 2008), les producteurs de déchets doivent, dans le cadre de la sélection de sites de stockage, commencer par soumettre des propositions de domaines d'implantation pour les dépôts en profondeur, destinés l'un aux déchets de faible et de moyenne activité (DFMA), l'autre aux déchets de haute activité (DHA). Ces propositions, élaborées par la Nagra pour la première étape de la procédure de plan sectoriel, sont exposées et justifiées dans Nagra (2008b).

Le plan sectoriel dicte une démarche en cinq phases. La *première* consiste à répartir l'inventaire des déchets entre les dépôts pour DFMA et DHA, tout en prévoyant également des réserves pour des développements futurs. La *seconde phase* vise à définir, en tenant compte de cette répartition, le concept de sûreté et le système de barrières pour chacun des dépôts. Dans la perspective de l'évaluation des sites d'implantation géologiques, il faut ensuite définir les objectifs et exigences quantitatifs et qualitatifs qui s'appliquent à la géologie. Il s'agit en particulier de la période à considérer, des besoins en espace du dépôt, des propriétés de la roche d'accueil (profondeur, épaisseur, extension latérale, conductivité hydraulique), de la stabilité à long terme, de la fiabilité des prévisions géologiques et de la faisabilité technique.

Les phases 3 à 5 concernent l'évaluation des options géologiques. La *troisième phase* consiste à évaluer la situation géotectonique à large échelle afin de sélectionner les secteurs à étudier plus en détail. La *quatrième* vise à délimiter, à l'intérieur de ces secteurs, les roches d'accueil privilégiées. La *cinquième* concerne enfin l'évaluation des configurations, c'est-à-dire la disposition spatiale des roches d'accueil privilégiées au sein des secteurs retenus. C'est alors que des domaines géologiques d'implantation peuvent être délimités.

Le présent document complète le rapport de la Nagra consacré aux propositions de domaines d'implantation géologiques (Nagra 2008b). Il motive la répartition des déchets entre les dépôts pour DFMA et DHA, définit le concept de sûreté et le système de barrières et justifie les exigences relatives à la géologie formulées pour les dépôts (phases 1 et 2); ces données servent ensuite à sélectionner les domaines d'implantation par élimination progressive (Nagra 2008b). Le présent rapport n'est pas une analyse de sûreté conventionnelle; il ne se rapporte pas non plus à des dépôts géologiques concrets où le site et la roche d'accueil sont déterminés. Le but est bien plus de dégager un ensemble d'exigences à respecter, en se basant sur des observations relatives à la sûreté des dépôts et sur l'expérience acquise. Les analyses de sûreté proprement dites interviendront lors des étapes ultérieures (2 et 3) de la procédure de plan sectoriel.

Les principaux résultats obtenus sont résumés ici.

Attribution des déchets

Selon BFE (2008), la répartition des déchets entre les dépôts, ainsi que la sélection, puis l'aménagement des sites d'implantation des dépôts en couches géologiques profondes doivent être basés sur un ensemble de propriétés relatives aux déchets, à savoir l'inventaire, la période radioactive, l'activité et la radiotoxicité des radionucléides ayant un impact sur la sûreté, tout comme leur évolution dans le temps. Il faut en outre considérer le volume des déchets, les propriétés des matériaux et leur interaction potentielle avec la roche d'accueil, la production de chaleur, ainsi que la teneur en composants pouvant générer des gaz (métaux, matières organiques) et en agents complexants. Les déchets sont attribués aux différents dépôts sur la base de la description de leurs propriétés. Pour ce faire, ils sont répartis en trois catégories: DHA, DAT et DFMA, conformément à l'ordonnance sur l'énergie nucléaire (KEV 2004). La

description révèle que les propriétés des DHA les distinguent nettement aussi bien des DAT que des DFMA. Le concept initial est donc confirmé: ces déchets doivent être évacués dans un dépôt séparé, doté d'un système de barrières ouvragées spécifiquement conçu pour leur stockage.

Les DAT et les DFMA diffèrent au niveau de leur radiotoxicité respective, de l'activité et du dégagement de chaleur, sur le plan des valeurs absolues comme sur celui, en particulier, de l'évolution dans le temps. Mais pour beaucoup d'autres propriétés, ces deux types de déchets radioactifs présentent de grandes similarités, notamment pour ce qui est de l'inventaire des matériaux.

Un dépôt commun pour DAT et DFMA est parfaitement envisageable. L'expérience montre en effet qu'un tel dépôt peut satisfaire aux exigences de sûreté formulées par les autorités s'il est aménagé dans une roche d'accueil et un site géologique favorables. En revanche, elle révèle aussi qu'un petit nombre de déchets appartenant à ces catégories génèrent une grande partie des doses calculées. Si ces déchets spécifiques sont stockés ailleurs, les exigences vis-à-vis des barrières géologiques se réduisent d'autant pour un même niveau de sûreté, ce qui permet d'avoir un plus grand choix lors de la sélection des domaines d'implantation appropriés. D'où la décision de maintenir la conception initiale de deux dépôts, l'un pour DHA avec un secteur pour DMAL et l'un pour DFMA; les DAT et DFMA émettant les plus fortes doses seraient ainsi attribués au secteur DMAL du dépôt DHA afin de limiter les contraintes géologiques pour le dépôt des DFMA. Les DAT et DFMA sont répartis entre les deux dépôts sur la base de calculs de doses génériques, du fait que, pour ces deux types de déchets, l'inventaire des matériaux et les taux de génération des gaz sont très similaires; de plus, les dépôts pour DHA (y compris secteur DMAL) et pour DFMA sont conçus de manière à ce que les perturbations du stockage dues aux déchets n'aient pas d'impact significatif sur la sûreté à long terme.

Sur la base de ces observations, la proposition de la Nagra comprend deux options: elles se différencient par les exigences minimales relatives à la perméabilité hydraulique à large échelle de la roche d'accueil dans le dépôt DFMA, qui s'élève respectivement à 10^{-10} m/s et 10^{-9} m/s. Logiquement, le volume de déchets attribué au dépôt DFMA est légèrement inférieur lorsqu'on postule une perméabilité de 10^{-9} m/s. L'évaluation des propriétés géologiques montre qu'il existe en Suisse suffisamment de roches d'accueil appropriées ou de formations assurant un bon confinement où la perméabilité hydraulique à large échelle est d'au moins 10^{-10} m/s. C'est par conséquent la répartition des déchets correspondant à cette option qui servira de référence, tandis que l'option 10^{-9} m/s constituera la solution de réserve. Dans les deux cas, l'ensemble des DAT est attribué au dépôt pour DHA (secteur DMAL). Par ailleurs, dans la répartition de référence, on attribue un peu moins de 1% du volume des DFMA au dépôt DHA (secteur DMAL); pour l'autre variante, ce chiffre s'élève à un peu moins de 10%.

Système de barrières et concept de sûreté

Le système de barrières décrit les caractéristiques fonctionnelles des diverses barrières, ouvragées et géologiques, du dépôt en profondeur. Il repose sur une succession de barrières de sûreté passives, constituées par les matrices de déchets, les conteneurs de stockage final, le comblement des galeries souterraines, le comblement et le scellement des ouvrages souterrains, la roche d'accueil et les éventuelles formations encaissantes ainsi que la situation géologique.

Le concept de sûreté montre comment ces différentes barrières, ouvragées et géologiques, contribuent à garantir la sûreté, en particulier quelles fonctions elles remplissent à cet égard: séparation physique des déchets de l'environnement humain, stabilité à long terme, confinement des radionucléides, retardement du relâchement de ces derniers, rétention des radionucléides dans le champ proche et dans la géosphère et enfin garantie d'un faible taux de relâchement.

Dans le concept de sûreté choisi, tant les barrières ouvragées que les barrières géologiques (roche d'accueil, éventuelles formations rocheuses encaissantes et situation géologique) contribuent de façon significative à la capacité de confinement de l'ensemble du système. Une solution de confinement qui ne ferait intervenir que les barrières ouvragées n'entre pas en ligne de compte, car elle ne serait pas conforme aux exigences posées par les autorités.

Le présent rapport précise également dans quelle mesure chaque élément du système de barrières contribue à la sûreté de l'ensemble. Dans les deux types de dépôts, la radiotoxicité décroit pour une grande part alors que les déchets sont confinés à l'intérieur des barrières ouvragées, par immobilisation des radionucléides et désintégration des radioéléments. La décroissance radioactive se poursuit durant le transport à travers la roche d'accueil, si bien que la part des radionucléides qui parvient à quitter le système de barrières techniques et géologiques ne représente plus qu'une infime fraction de la radiotoxicité initiale. Les doses restent ainsi bien en dessous de l'objectif de protection.

Exigences relatives à la géologie

Les exigences auxquelles doit satisfaire la géologie sont fixées en deux étapes. On définit tout d'abord les indicateurs correspondant aux critères énoncés dans le plan sectoriel « Dépôts en couches géologiques profondes » et utilisés dans la procédure de détermination des domaines d'implantation géologiques. En second lieu, on fixe les exigences et en particulier les échelles d'évaluation relatives à ces indicateurs.

Pour déterminer les indicateurs, on part des fonctions de sûreté mentionnées plus haut, auxquelles s'ajoutent une série de principes généraux concernant la construction sûre des dépôts profonds et la fiabilité des connaissances géologiques. On définit ensuite un ensemble d'indicateurs, avec les exigences et échelles d'évaluation correspondantes, grâce auxquels il sera possible, par élimination progressive, de désigner des domaines géologiques où il est possible de construire des dépôts profonds qui assument les fonctions de sûreté nécessaires, respectent les principes généraux posés et qui garantissent la sûreté de manière adéquate.

Les exigences et les échelles d'évaluation relatives aux indicateurs sont définies à partir de calculs de relâchement des radionucléides, de modélisations concernant le comportement de certaines barrières ou propriétés, des mesures effectuées, de l'expérience acquise et de critères de qualité.

Les caractéristiques ci-après sont considérées comme particulièrement importantes pour l'évaluation des domaines d'implantation. Cette appréciation repose sur les réflexions générales menées sur la sûreté et sur les expériences tirées d'analyses antérieures des systèmes et de la sûreté.

- Pour la désignation de secteurs géotectoniques appropriés (phase 3), la situation géologique (géodynamique et néotectonique, élévation ou érosion) est déterminante, de même que la configuration spatiale spécifique et son explorabilité (caractéristiques des perturbations régionales et des couches rocheuses).
- Pour la désignation de roches d'accueil potentielles et de formations rocheuses assurant un bon confinement (phase 4), les éléments déterminants sont: les propriétés des roches (en particulier la stabilité de leur caractéristiques (risque d'érosion karstique), la perméabilité hydraulique et – pour les roches sédimentaires – leur pouvoir d'auto-cicatrisation), en tenant compte de la subduction, mais aussi la probabilité de trouver des roches dans une configuration appropriée (épaisseur, profondeur minimale et maximale, extension latérale) et la faisabilité technique.

- Pour la désignation de formations appropriées (phase 5), la configuration géologique de la région considérée est déterminante. Les facteurs essentiels sont l'épaisseur de la couche rocheuse à une profondeur appropriée (profondeur minimale, en raison de l'érosion de surface et de l'érosion glaciaire en profondeur, ainsi que de la décompaction des roches; profondeur maximale, en fonction des impératifs de construction) et son extension latérale (compte tenu des éléments géologiques régionaux) ainsi que la situation géotectonique locale.

Ces considérations font partie intégrante de la procédure de sélection par élimination progressive. Elles sont utilisées sous la forme d'exigences minimales ou impératives pour désigner, puis évaluer les domaines géologiques.

Abstract

According to the conceptual part of the Sectoral Plan for Deep Geological Repositories (BFE 2008), the first step in the site selection process requires the waste producers to submit proposals for geological siting regions for repositories for low- and intermediate-level waste (L/ILW) and high-level waste (HLW). The proposals prepared by Nagra on behalf of the waste producers for stage 1 of the Sectoral Plan procedure are justified and documented in Nagra (2008b).

The Sectoral Plan states that the siting proposals have to be prepared in five steps. In the *first step*, the waste inventory, including reserves for future developments in the nuclear power programme, is allocated to the L/ILW and HLW repositories. Based on this allocation, the barrier and safety concepts for the two repositories are defined in the *second step*. Quantitative and qualitative requirements on the geology are then derived with a view to evaluating the geological siting possibilities. This applies to the time period under consideration, the space required by the repository, the properties of the host rock (depth, thickness, lateral extent, hydraulic conductivity), the long-term stability of the geological situation, the reliability of geological information and engineering suitability.

Steps 3 to 5 cover the evaluation of the geological siting possibilities. In the *third step*, the large-scale geological-tectonic situation is assessed and large-scale areas for further consideration are identified. The *fourth step* involves selecting the preferred host rock formations within these large-scale areas. In the *fifth step* the rock configurations, i.e. the spatial arrangement of the preferred host rocks within the large-scale areas under consideration, are evaluated and geological siting regions are identified.

This report complements Nagra's report documenting the proposals for geological siting regions (Nagra 2008b). It explains the allocation of the waste to the L/ILW and HLW repositories, defines the barrier and safety concepts and justifies the repository-specific requirements on the geology (steps 1 and 2). These requirements are used in the stepwise narrowing-down procedure to select the geological siting regions. The report does not take the form of a conventional safety analysis in that, in particular, it does not contain a safety assessment of concrete geological repositories at specific sites in specific host rocks. Instead, the fundamental requirements are derived using guiding safety considerations and experience. Site-specific safety analyses will be part of the subsequent stages 2 and 3 of the Sectoral Plan process.

The key results are presented in the following.

Waste allocation

According to the Federal Office of Energy (BFE 2008), the waste properties to be considered for waste allocation, repository design and identification of geological siting regions are inventory, half-lives and the activity and radiotoxicity of the safety-relevant radionuclides and their evolution with time. Waste volumes, material properties and their potential influences on the host rock, heat production, content of potentially gas-producing components (metals, organics) and content of complexants also have to be considered. The description of the waste properties forms the starting-point for the waste allocation. The waste is divided into the categories high-level waste (HLW), alpha-toxic waste (ATW) and low- and intermediate-level waste (L/ILW), as specified in the Nuclear Energy Ordinance (2004). The description shows clearly that, with respect to all properties, HLW differs significantly from ATW and L/ILW. For this reason, as reflected in disposal concepts to date, HLW is disposed of in a separate repository with a specifically designed barrier system.

The ATW and L/ILW differ in terms of specific radiotoxicity, specific activity and specific heat production, in terms of both absolute values and evolution with time. However, many of their other properties are very similar, particularly the material inventory.

In principle, a combined repository for all ATW and L/ILW would be conceivable. Experience shows that such a facility constructed in a suitable host rock in a favourable geological setting has the potential to fulfil the safety requirements specified by the authorities. On the other hand, experience also shows that calculated doses are dominated by just a few of the ATW and L/ILW waste types. If these dominant waste types could be disposed of elsewhere, the requirements on the geology could be reduced while the level of safety would remain the same; this has the effect of increasing the possibility of finding suitable siting regions. For these reasons, the existing concept (a HLW repository with a facility for long-lived intermediate-level waste (ILW) and a L/ILW repository) has been maintained, with the aim of allocating the dose-dominating ATW and L/ILW to the ILW facility. This allows to reduce the safety-related requirements on the geology for the L/ILW repository. Based mainly on generic dose calculations, the ATW and L/ILW are allocated to the two repository types as they differ only slightly with respect to material inventory and gas generation rates and both the HLW repository (including the ILW facility) and the L/ILW repository are designed in such a way that repository-induced influences (originating from the waste) do not significantly affect long-term safety.

The proposal made by Nagra includes two variants, characterised by minimum requirements on the large-scale hydraulic conductivity of the host rock for the L/ILW repository of 10^{-10} m/s and 10^{-9} m/s respectively. As expected, the volume of waste allocated to the L/ILW repository is somewhat smaller for the 10^{-9} m/s variant than for the 10^{-10} m/s variant. Based on an assessment of the geological possibilities within Switzerland, which shows that there are sufficient suitable host rocks and effective containment rock zones with a large-scale hydraulic conductivity of 10^{-10} m/s or better, this allocation variant is termed the reference allocation and the variant with 10^{-9} m/s is termed the alternative allocation. In both cases, all the ATW is allocated to the HLW repository (ILW facility). For the reference allocation, somewhat less than 1 % of the volume of L/ILW is also allocated to the HLW repository (ILW facility); in the case of the alternative allocation it is somewhat less than 10 %.

Barrier and safety concept

The barrier concept describes the functions of the different engineered and geological barriers of the deep repository, based on a system of staged, passive safety barriers consisting of the waste matrix, disposal container, backfilling of the underground disposal chambers, backfilling and sealing of the underground structures, the host rock and any confining rock units and the overall geological situation.

The safety concept shows how the different engineered and geological barriers contribute to system safety and what safety functions they perform. The safety functions provide the physical separation of the waste from the human environment and ensure the required long-term stability, containment of the radionuclides, delayed release of nuclides and nuclide retention in the near-field and the geosphere, thus ensuring low release rates.

In the selected safety concept, both the engineered and the geological barriers (host rock, any confining units and their geological situation) contribute significantly to the barrier function of the overall system. In line with the requirements set out by the authorities, a system in which the containment and retention of radionuclides rely on the engineered barriers alone will not come into consideration.

The concept also describes the contribution to safety of the different components of the barrier system. For both repository types, by far the largest proportion of radiotoxicity will decay within the engineered barriers due to immobilisation of the radionuclides and radioactive decay. There is a further decrease due to decay during transport through the host rock, meaning that the proportion of radionuclides leaving the engineered and natural barriers represents only a tiny fraction of the original radiotoxicity. This means that the resulting doses are well below the protection objective specified by the regulatory authority.

Requirements on the geology

Specifying the requirements on the geology is carried out in two steps. In the first step, indicators are defined that adequately encompass the criteria set out in the Sectoral Plan and are used to identify geological siting regions. In the second step, the requirements and evaluation scales for the indicators are defined.

The starting-point for defining the indicators are the safety functions discussed above together with a set of overarching principles relating to reliable implementation of the geological repositories and the reliability of geological information. A set of indicators with associated requirements and evaluation scales are then defined, the application of which in the narrowing down process results in geological siting regions where repositories can be constructed that fulfil the safety functions and principles and ensure sufficient safety.

The requirements and evaluation scales for the indicators are defined using radionuclide release calculations, model calculations of the behaviour of individual barriers or properties, measured and empirical values and qualitative information.

Based on generic safety considerations and experience derived from earlier system and safety analyses, the following features are considered to be particularly important for the site evaluation:

- For identifying suitable large-scale geological-tectonic areas (step 3), the main emphasis is on the long-term stability of the geological situation (geodynamics and neotectonics, uplift and erosion) and the typical spatial conditions and their explorability (regional fault patterns and bedding conditions).
- For identifying potentially suitable host rocks and effective containment zones (step 4), the rock properties (particularly their stability (potential for karstification), the hydraulic conductivity and – for sediments – their self-sealing capacity), taking into account tectonic overprinting and the potential for a suitable geometry of the rock formations (thickness, minimum and maximum depth, lateral extent), as well as suitable geotechnical properties are decisive.
- For identifying suitable configurations (step 5), the focus is on the spatial geological conditions. These include thickness at suitable depth (minimum depth with respect to surface erosion and vertical glacial erosion and rock decompaction; maximum depth in terms of engineering requirements) and lateral extent (taking into account regional geological features), as well as the local geological-tectonic situation.

These features are integrated into the narrowing-down procedure; they are taken into account in the form of minimum requirements and stricter requirements and are used for the evaluation of the siting regions.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung I
Résumé V
Abstract IX
Inhaltsverzeichnis XIII
Verzeichnis der Tabellen XIX
Verzeichnis der Figuren XXIV
Verzeichnis der Figuren XXIV

1 Einleitung 1
1.1 Zweck 1
1.2 Ausgangslage 1
1.2.1 Radioaktive Abfälle 2
1.2.2 Zwischenlagerung 3
1.2.3 Geologische Tiefenlagerung 3
1.3 Aufbau des Berichts 3

2 Vorgaben, Grundlagen und Prinzipien 5
2.1 Ziel und Aufbau des Kapitels 5
2.2 Vorgaben aus dem Sachplan geologische Tiefenlager 5
2.2.1 Überblick und Begriffsdefinitionen 5
2.2.2 Kriteriengruppen und Kriterien für das Einengungsverfahren 7
2.2.3 Vorgaben zu den Schritten 1 und 2 9
2.3 Weitere Vorgaben und Prinzipien bezüglich Barrieren- und Sicherheitskonzept sowie Standortwahl und Lagerauslegung 12
2.3.1 Übersicht 12
2.3.2 Anforderungen gemäss Kernenergiegesetz 13
2.3.3 Anforderungen gemäss Kernenergieverordnung 13
2.3.4 Anforderungen gemäss Richtlinie HSK-R-21 bzw. G03 14
2.3.5 Weitere Prinzipien 16
2.3.6 Umsetzung der Prinzipien, Grundsätze und Anforderungen im Barrieren- und Sicherheitskonzept 18
2.4 Bisherige Erfahrungen bei der Planung von Lagerprojekten 19
2.4.1 Einleitung 19
2.4.2 Erkenntnisse aus bisherigen Sicherheitsanalysen 19
2.4.2.1 SMA-Lager (Projekt Wellenberg) 19
2.4.2.2 HAA-Lager (Projekt Kristallin-I) 23
2.4.2.3 HAA-Lager (Projekt Entsorgungsnachweis) 28
2.4.3 Zusammenfassung 34
2.5 Annahmen zum SMA- bzw. HAA-Lager für die sicherheitstechnischen Betrachtungen 35

2.5.1 Einleitung ... 35
2.5.2 Inventar ... 36
2.5.3 Lagerkonzepte ... 40
2.5.3.1 SMA-Lager ... 40
2.5.3.2 HAA-Lager ... 46
2.5.4 Geosphäre ... 50
2.5.4.1 Konzeptualisierung des Wirtgesteins und der geologischer Situation ... 51
2.5.4.2 Störungszonen ... 53
2.5.5 Biosphäre ... 56
2.5.6 Sicherheitstechnische Betrachtungen zum Einfluss der Erosion nach langen Zeiten ... 60
2.6 Schlussfolgerungen ... 68

3 Abfallzuteilung ... 69
3.1 Ziel und Aufbau des Kapitels ... 69
3.2 Vorgehen bei der Abfallzuteilung zum SMA- bzw. HAA-Lager ... 69
3.2.1 Einleitung und Zielsetzung ... 69
3.2.2 Beschreibung der Abfälle und ihrer Eigenschaften ... 69
3.2.2.1 Aktivität ... 71
3.2.2.2 Radiotoxizität ... 71
3.2.2.3 Wärmeleistung ... 71
3.2.2.4 Materialinventar ... 72
3.2.2.5 Gasbildung ... 72
3.2.3 Erkenntnisse aus dem Vergleich der Abfälle und Folgerungen für die Abfallzuteilung ... 80
3.2.4 Identifikation der dosisdominierenden Abfallsorten ... 81
3.2.5 Berücksichtigung der Vorgaben aus Schritt 1 im SGT ... 85
3.3 Vorschlag zur Abfallzuteilung zu den geologischen Tiefenlagern SMA und HAA ... 87
3.3.1 Definition von Rechenfällen und Durchführung der Rechnungen ... 88
3.3.2 Auswertung der Resultate und Festlegung der Abfallzuteilung ... 94
3.3.2.1 Grossräumige hydraulische Durchlässigkeit $K = 10^{-10}$ m/s ... 95
3.3.2.2 Grossräumige hydraulische Durchlässigkeit $K = 10^{-9}$ m/s ... 99
3.3.2.3 Zusammenfassung ... 102
3.4 Schlussfolgerungen ... 106

4 Barrieren- und Sicherheitskonzept für das SMA- und das HAA-Lager ... 107
4.1 Ziel und Aufbau des Kapitels ... 107
4.2 Beschreibung eines geologischen Tiefenlagers ... 107
4.3 Festlegung des Barrieren- und Sicherheitskonzepts für das SMA- und das HAA-Lager ... 110
4.4 Sicherheitsfunktionen des Barrierensystems ... 118
4.5 Erwartete Beiträge der verschiedenen Elemente des Barrierensystems zur Sicherheit des Gesamtsystems ... 119

4.6 Diskussion von lagerbedingten Einflüssen mit dem Potenzial zur Beeinträchtigung der Barrierenwirkung ... 120
4.6.1 Komplexbildner und andere Stoffe mit dem Potenzial zur Beeinträchtigung der Barrierenwirkung ... 120
4.6.2 pH-Fahne ... 121
4.6.3 Nahfeld-Kolloide ... 122
4.6.4 Gasbildung ... 123
4.6.5 Wärmeeintrag ... 125
4.7 Illustration der Wirksamkeit der Elemente des Barrierensystems ... 125
4.7.1 Aufteilung der Radiotoxizität auf die verschiedenen Komponenten des Systems als Funktion der Zeit ... 126
4.7.2 Radionuklid-Transferraten zwischen Systemkomponenten ... 143
4.7.3 Zusammenfassung ... 155
4.8 Schlussfolgerungen ... 156

5 Anforderungen an die Geologie ... 157
5.1 Ziel und Aufbau des Kapitels ... 157
5.2 Vorgehen zur Festlegung der Anforderungen an die Geologie für das SMA- und das HAA-Lager ... 157
5.3 Festlegung der im Einengungsverfahren verwendeten Indikatoren ... 160
5.3.1 Betrachtungszeitraum ... 160
5.3.2 Festlegung von potenziell wichtigen Indikatoren und Erläuterung ihres sicherheitstechnischen Kontexts ... 160
5.3.3 Festlegung der im Einengungsverfahren verwendeten Indikatoren und Erläuterung im Kontext der Vorgaben aus dem SGT, Anhang I ... 188
5.4 Festlegung der Anforderungen an die im Einengungsverfahren verwendeten Indikatoren für das SMA- und das HAA-Lager ... 199
5.4.1 Einleitung ... 199
5.4.2 Zusammenstellung der Anforderungen und Bewertungsskalen für die im Einengungsverfahren verwendeten Indikatoren ... 199
5.5 Schlussfolgerungen ... 232

6 Schlussfolgerungen ... 233

7 Literaturverzeichnis ... 235

Anhang 1 Festlegung und Erläuterung der Anforderungen an die Geologie ... A1-1
A1.1 Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit ... A1-5
A1.2 Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteins-Dekompaktion ... A1-10
A1.3 Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf flächenhafte Erosion ... A1-14
A1.4 Tiefenlage unter Oberfläche Fels im Hinblick auf glaziale Tiefenerosion ... A1-17
A1.5 Mächtigkeit ... A1-20
A1.6 Abstand zu regionalen Störungszonen ... A1-24

A1.7 Laterale Ausdehnung A1-27
A1.8 Platzangebot untertags A1-30
A1.9 Hydraulische Durchlässigkeit A1-34
A1.10 Grundwasserstockwerke A1-38
A1.11 Mineralogie A1-40
A1.12 pH A1-44
A1.13 Redox-Bedingungen A1-50
A1.14 Salinität A1-56
A1.15 Mikrobielle Prozesse A1-62
A1.16 Kolloide A1-66
A1.17 Art der Transportpfade und Ausbildung des Porenraums A1-70
A1.18 Homogenität des Gesteinsaufbau A1-72
A1.19 Länge der Freisetzungspfade A1-74
A1.20 Transmissivität präferenzieller Freisetzungspfade A1-78
A1.21 Tongehalt A1-82
A1.22 Selbstabdichtungsvermögen A1-84
A1.23 Modellvorstellungen zur Geodynamik und Neotektonik A1-87
A1.24 Seismizität A1-92
A1.25 Modellvorstellungen zu geochemischen Vorgängen A1-95
A1.26 Seltene geologische Ereignisse (Vulkanismus) A1-96
A1.27 Potenzial zur Bildung neuer Wasserwegsamkeiten (Verkarstung) A1-98
A1.28 Grossräumige Erosion im Betrachtungszeitraum A1-100
A1.29 Auflockerungszone im Nahbereich der Untertagebauten A1-103
A1.30 Chemische Wechselwirkungen A1-106
A1.31 Verhalten des Wirtgesteins bzgl. Gas A1-109
A1.32 Verhalten des Wirtgesteins bzgl. Temperatur A1-111
A1.33 Rohstoffvorkommen innerhalb des Wirtgesteins A1-113
A1.34 Rohstoffvorkommen unterhalb des Wirtgesteins A1-116
A1.35 Rohstoffvorkommen oberhalb des Wirtgesteins A1-119
A1.36 Mineralquellen und Thermen A1-121
A1.37 Geothermie A1-124
A1.38 Diffus gestörte Zonen A1-126
A1.39 Variabilität der Gesteinseigenschaften im Hinblick auf ihre Charakterisierbarkeit A1-129
A1.40 Erfahrungen A1-131
A1.41 Regionales Störungsmuster und Lagerungsverhältnisse A1-133
A1.42 Kontinuität der interessierenden Schichten A1-135
A1.43 Explorationsverhältnisse im geologischen Untergrund A1-138
A1.44 Explorationsbedingungen an Oberfläche A1-140
A1.45 Tektonisches Regime (konzeptionell zu meidende Zonen) A1-143
A1.46 Unabhängige Evidenzen der Langzeitisolation A1-145
A1.47 Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften A1-147

A1.48 Geotechnische und hydrogeologische Verhältnisse in überlagernden Gesteinsformationen ... A1-151
A1.49 Natürliche Gasführung (im Wirtgestein) ... A1-154

Anhang 2 Lagerkonfigurationen für das SMA- und das HAA-Lager ... A2-1
A2.1 Einleitung ... A2-1
A2.2 Menge der radioaktiven Abfälle ... A2-3
A2.3 Lagerkammern ... A2-3
A2.4 Lagerfeld ... A2-6
A2.5 Lagerzone ... A2-10
A2.6 Lagerkonfigurationen ... A2-14
A2.6.1 Modellhafte Lagerkonfigurationen für HAA und SMA-Lager ... A2-14
A2.6.2 Laterale Ausdehnung der Lagerzone bei optimaler geologischer Konfiguration ... A2-17
A2.6.3 Laterale Ausdehnung der Lagerzone bei ungünstiger geologischer Konfiguration ... A2-18
A2.6.4 Grundlagen zur Abschätzung des Platzangebotes ... A2-22

Anhang 3 Wichtige Inputdaten für die sicherheitstechnischen Rechnungen ... A3-1
A3.1 Inventar ... A3-1
A3.2 Nahfelddaten ... A3-17
A3.2.1 SMA und LMA ... A3-17
A3.2.2 HAA ... A3-20
A3.3 Geosphärendaten ... A3-23
A3.4 Biosphärendaten ... A3-27

Anhang 4 Dosisdominierende Abfallsorten: Methodik, Rechentool, Resultate ... A4-1
A4.1 Einleitung ... A4-1
A4.2 Überblick ... A4-1
A4.3 Methodik zur Berechnung der dosisdominierenden Abfallsorten und Umsetzung in einem Rechentool ... A4-1
A4.3.1 Modellgeometrie ... A4-2
A4.3.2 Abbildung des Nahfelds ... A4-4
A4.3.3 Abbildung der Geosphäre ... A4-5
A4.3.4 Abbildung der Biosphäre ... A4-5
A4.4 Durchführung von Typkurven-Berechnungen für generische Wirtgesteinssituationen ... A4-5
A4.5 Auswertung der Typkurven in einer interaktive Berechnungs- und Bewertungsapplikation ... A4-6
A4.5.1 Berechnung der Summendosis für das Gesamtinventar ... A4-6
A4.5.2 Auswahlmöglichkeiten ... A4-6
A4.6 Resultate ... A4-8

Anhang 5 Orientierende Sicherheitsbetrachtungen zur Illustration von ausgewählten Eigenschaften der Geologie A5-1
A5.1 Einleitung A5-1
A5.2 Hydraulische Durchlässigkeit des Wirtgesteins und Transmissivität präferenzieller Freisetzungspfade A5-1
A5.3 Länge der Freisetzungspfade A5-9
A5.4 Betrachtungszeitraum A5-20
A5.4.1 Modell 1: Ergebnisse A5-20
A5.4.2 Modell 2: Ergebnisse A5-22
A5.4.3 Modell 3: Ergebnisse A5-23
A5.4.4 Zusammenfassung: Betrachtungszeitraum A5-26
A5.5 Ergänzende vereinfachte Sensitivitätsbetrachtungen zu ausgewählten Geosphäreneigenschaften A5-27
A5.5.1 Einleitung A5-27
A5.5.2 Einfluss der hydraulischen Eigenschaften des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs für SMA und HAA A5-30
A5.5.3 Einfluss der Transportpfadlänge A5-33
A5.5.4 Art der Transportpfade und Ausbildung des Porenraums A5-40

Verzeichnis der Tabellen

Tab. 1.2-1: Die gegenwärtig in Betrieb stehenden Kernkraftwerke (KKW) der Schweiz. 2

Tab. 2.2-1: Übersicht der Vorgaben im SGT (BFE 2008), Anhang I, Kap. 1.1, zu den übergeordneten Fragestellungen in Etappe 1. 6

Tab. 2.2-2: Kriteriengruppen und Kriterien zur Sicherheit und technischen Machbarkeit für die Standortevaluation gemäss SGT. 9

Tab. 2.2-3: Vorgaben zu Schritt 1 im SGT. 10

Tab. 2.2-4: Vorgaben zu Schritt 2 im SGT. 11

Tab. 2.2-5: Zusammenfassung der Vorgaben zu den Schritten 1 und 2 im SGT. 12

Tab. 2.3-1: Schutzziele der Richtlinie HSK-R-21. 15

Tab. 2.3-2: Prinzipien bzgl. Standortevaluation und Lagerauslegung. 17

Tab. 2.4-1: Maxima der im Projekt Wellenberg für ein SMA-Lager berechneten Gesamtdosen für die Rechenfälle des Referenz-Szenariums, der alternativen Szenarien und des robusten Ansatzes. 20

Tab. 2.4-2a: Maxima der im Projekt Kristallin-I berechneten Gesamtdosen für die Rechenfälle des Referenz-Szenariums. 25

Tab. 2.4-2b: Maxima der im Projekt Kristallin-I berechneten Gesamtdosen für die Rechenfälle der alternativen Szenarien. 26

Tab. 2.4-3: Maxima der im Projekt Entsorgungsnachweis berechneten Gesamtdosen für die Rechenfälle des Referenz-Szenariums, der alternativen Szenarien, der "what if?"-Fälle, der Design-/Systemoptionen und der Biosphären-Illustrationen. 31

Tab. 2.5-1a: Abfallmengen in Kubikmeter (gerundet) bei 50 Jahren Betriebszeit der bestehenden KKW und einer Sammelperiode der Abfälle aus dem MIF-Bereich bis 2050. 38

Tab. 2.5-1b: Zusätzlich erwartete Abfallmengen in Kubikmeter (gerundet) bei einer Verlängerung der Betriebsdauer der bestehenden KKW um 10 Jahre und der Sammelperiode für die Abfälle aus dem MIF-Bereich um 10 Jahre (bis 2060). 39

Tab. 2.5-1c: Zusätzliche Abfallmengen in Kubikmeter (gerundet) bei einer optionalen Elektrizitätsproduktion von zusätzlich 5 GWe während 60 Jahren durch neue KKW. 39

Tab. 3.2-1: Inventar der metallischen, anorganischen und organischen Materialien. 77

Tab. 3.2-2: Für die Abfallzuteilung und die Lagerauslegung relevante Abfalleigenschaften. 79

Tab. 3.3-1: Aus dem SMA-Lager zu entfernende Abfallsorten ($K = 10^{-10}$ m/s). 96

Tab. 3.3-2: Aus dem SMA-Lager zu entfernende und dem HAA-Lager (LMA-Teil) zuzuteilende Abfallsorten ($K = 10^{-10}$ m/s). 98

Tab. 3.3-3: ATA-Abfallsorten, die gemäss Auswertung der Resultate der Rechenfall-Familien R1 – R5 im SMA-Lager verbleiben könnten ($K = 10^{-10}$ m/s). 99

Tab. 3.3-4: Aus dem SMA-Lager zu entfernende Abfallsorten ($K = 10^{-9}$ m/s). 101

Tab. 3.3-5: ATA-Abfallsorten, die im SMA-Lager verbleiben könnten ($K = 10^{-9}$ m/s)..... 102

Tab. 3.3-6: Abfallzuteilung für $K = 10^{-10}$ m/s (Referenzzuteilung RZ). 103

Tab. 3.3-7: Abfallzuteilung für $K = 10^{-9}$ m/s (alternative Zuteilung AZ). 103

Tab. 3.3-8: Abfallzuteilung auf das SMA- bzw. HAA-Lager für $K = 10^{-10}$ m/s (Referenzzuteilung RZ)..... 104

Tab. 3.3-9: Abfallzuteilung auf das SMA- bzw. HAA-Lager für $K = 10^{-9}$ m/s (alternative Zuteilung AZ). 104

Tab. 4.2-1: Sicherheitsbezogene und bautechnische Aspekte eines geologischen Tiefenlagers (zusammenfassende Tabelle). 109

Tab. 4.7-1: Quantifizierung der Wirksamkeit der Elemente des Barrierensystems anhand der Entwicklung und Aufteilung der Radiotoxizität auf die verschiedenen Komponenten des Nahfelds, das Wirtgestein und das Gebiet ausserhalb des Wirtgesteins..... 142

Tab. 4.7-2a: Abschwächung der Radionuklidfreisetzung beim Transport durch die Elemente des Barrierensystems für $K = 10^{-13}$ m/s..... 153

Tab. 4.7-2b: Abschwächung der Radionuklidfreisetzung beim Transport durch die Elemente des Barrierensystems für $K = 10^{-10}$ m/s..... 154

Tab. 5.3-1: Zusammenhang zwischen den potenziell wichtigen Indikatoren und den Sicherheitsfunktionen bzw. übergeordneten Prinzipien..... 179

Tab. 5.3-2: Liste der im Einengungsverfahren nicht explizit berücksichtigen Indikatoren und Begründung für ihre Nichtberücksichtigung. 188

Tab. 5.3-3: Liste der im Einengungsverfahren verwendeten Indikatoren..... 191

Tab. 5.3-4: Erläuterung der im Einengungsverfahren verwendeten Indikatoren im Kontext der Vorgaben aus dem SGT, Anhang I. 193

Tab. 5.4-1: Vorgaben zur Anwendung der Indikatoren im Einengungsverfahren..... 201

Tab. A1.12-1: Einfluss der Porenwasserzusammensetzung auf das Nahfeld (pH). A1-46

Tab. A1.13-1: Einfluss der Porenwasserzusammensetzung auf das Nahfeld (Redox-Bedingungen)..... A1-52

Tab. A1.14-1: Einfluss der Porenwasserzusammensetzung auf das Nahfeld (Salinität)..... A1-58

Tab. A1.47-1: Abzüge für die Bewertung der tektonischen Überprägung und des Trennflächengefüges in Schritt Schritt 5.3 (Indikator 'Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften'). A1-150

Tab. A2.2-1: Abfallmengen für das SMA- bzw. HAA-Lager für die Festlegung von Vorschlägen für geologische Standortgebiete in Etappe 1 des Sachplans geologische Tiefenlager. Massgebend ist das aufgeführte umhüllende Abfallinventar (vgl. Kap. 3.3)..... A2-3

Tab. A2.3-1: Massgebende Planungsgrössen für die Lagerkammern des HAA-Lagers. A2-4

Tab. A2.3-2: Massgebende Planungsgrössen für Lagerkavernen des SMA-Lagers; Belegung der Lagerkammern mit standardisierten Lagercontainern LC1. ..... A2-5

Tab. A2.3-3: Erforderliche gesamte Länge der BE/HAA-Lagerstollen und LMA-Lagertunnel zur Aufnahme des gesamten Abfallinventars. A2-6

Tab. A2.3-4: Erforderliche gesamte Länge der SMA-Lagerkavernen zu Aufnahme des Abfallinventars in Abhängigkeit des Lagerkavernentyps. A2-6

Tab. A2.4-1: Planungsgrössen für Mindestabstände zur Auslegung der Lagerfelder für das SMA- und das HAA-Lager. A2-7

Tab. A2.4-2: Anzahl BE/HAA-Lagerstollen und LMA-Lagertunnel sowie ungefähr benötigte laterale Ausdehnung (Fläche) der Lagerfelder bei idealer Geometrie. A2-9

Tab. A2.4-3: Anzahl SMA-Lagerkavernen mit bevorzugter Einlagerungslänge sowie ungefähr benötigte laterale Ausdehnung (Fläche) der Lagerfelder in Abhängigkeit des Kavernentyps bei idealer Geometrie. A2-10

Tab. A2.6-1: Erforderliche laterale Ausdehnung der Lagerzone (Fläche) bei optimaler Lagerkonfiguration für ein HAA-Lager. A2-17

Tab. A2.6-2: Erforderliche laterale Ausdehnung der Lagerzone (Fläche) bei optimaler Lagerkonfiguration für ein SMA-Lager. A2-18

Tab. A2.6-3: Mindestanforderung an laterale Ausdehnung (Fläche und Breite) zur Überprüfung der potenziell mögliche Bereiche für optimale geologische Konfigurationen. A2-18

Tab. A2.6-4: Mögliche ungünstige geologischer Konfigurationen und deren Zusatzflächen. A2-21

Tab. A2.6-5: Mindestanforderung an die laterale Ausdehnung (Fläche und Breite) zur Überprüfung der bevorzugten Bereiche für ungünstige geologische Konfigurationen. A2-21

Tab. A2.6-6: Abfallvolumen konditioniert und in Endlagerbehälter verpackt pro SMA-Lagerkaverne und pro Grundmodul SMA in Abhängigkeit des Kavernentyps. A2-23

Tab. A3.1-1: MIRAM-Abfallsorten im Überblick. A3-1

Tab. A3.1-2: Sicherheitsrelevante Nuklide (Einzelnuklide). A3-6

Tab. A3.1-3: Sicherheitsrelevante Nuklide (Zerfallskettennuklide). A3-7

Tab. A3.1-4: Inventar der sicherheitsrelevanten Nuklide in einem BE-Behälter des Typs BE-S-1 (9 SWR UO_2 BE mit einem Abbrand von 48 GWd/t_{IHM} nach 40 Jahren Zerfall). A3-8

Tab. A3.1-5: Inventar der sicherheitsrelevanten Nuklide in einem BE-Behälter des Typs BE-D-2 (3 DWR UO_2 BE und 1 DWR MOX BE mit einem Abbrand von 48 GWd/t_{IHM} nach 40 Jahren Zerfall). A3-9

Tab. A3.1-6: Inventar der sicherheitsrelevanten Nuklide in einem BE-Behälter des Typs BE-D-3 (4 DWR UO_2 BE mit einem Abbrand von 48 GWd/t_{IHM} nach 40 Jahren Zerfall). A3-10

Tab. A3.1-7: Inventar der sicherheitsrelevanten Nuklide in einem HAA-Behälter des Typs WA-U-1 mit einer Kokille mit verglastem HAA von Sellafield Ltd. nach 40 Jahren Zerfall. A3-11

Tab. A3.1-8: Inventar der sicherheitsrelevanten Nuklide in einem HAA-Behälter des Typs WA-F-1 mit einer Kokille mit verglastem HAA von AREVA nach 40 Jahren Zerfall. A3-12

Tab. A3.1-9: Inventar der sicherheitsrelevanten Nuklide der LMA (Referenzzuteilung RZ, alternative Zuteilung AZ), Referenzjahr 2050. ..... A3-13

Tab. A3.1-10: Inventar der sicherheitsrelevanten Nuklide der SMA (Referenzzuteilung RZ, Alternative Zuteilung AZ), Referenzjahr 2050. ..... A3-15

Tab. A3.2-1: VPAC Modellparameter für die Berechnung des advektiv-diffusiven Radionuklidtransports im Nahfeld des SMA-Lagers. A3-17

Tab. A3.2-2: STMAN Modellparameter für die Berechnung der (diffusiven) Radionuklidfreisetzung aus dem Nahfeld des LMA-Lagers. A3-17

Tab. A3.2-3: Sorptionsdaten für die SMA- und LMA-Abfallgruppen 1 und 2 für das Zement-Nahfeld: Nicht-degradierter Zement ("Zement") und degradierter Zement ("Calcit"). A3-18

Tab. A3.2-4: Löslichkeitslimiten im LMA-Nahfeld. A3-19

Tab. A3.2-5: Modellparameter für die Berechnung der (diffusiven) Radionuklidfreisetzung aus dem Nahfeld des HAA-Lagers im Fall der abgebrannten Brennelemente. A3-20

Tab. A3.2-6: Modellparameter für die Berechnung der (diffusiven) Radionuklidfreisetzung aus dem Nahfeld des HAA-Lagers im Fall der verglasten hochaktiven Abfälle. A3-20

Tab. A3.2-7: Elementspezifische Eigenschaften von Bentonit. A3-21

Tab. A3.2-8: Zeitabhängige fraktionale Auflöseraten für UO_2/MOX (Brennelement)-Matrizen. A3-22

Tab. A3.3-1: VPAC Modellparameter für die Geosphäre. A3-23

Tab. A3.3-2: Sorptionskonstanten für das Wirtgestein. A3-23

Tab. A3.3-3: Konfigurationsdaten für homogen-poröses WG/EG. A3-24

Tab. A3.3-4: Konfigurationsdaten für geklüftetes WG/EG. A3-25

Tab. A3.3-5: Konfigurationsdaten für steilstehende Störungszonen im Wirtgestein bzw. einschlusswirksamen Gebirgsbereich. A3-26

Tab. A3.4-1: Biosphären-Transfer-Koeffizienten (BTK) für den Referenzfall (A-I) A3-27

Tab. A4.6-1: Dosisdominierende Abfallsorten für den Rechenfall R1 für eine hydraulische Durchlässigkeit von 10^{-9} m/s und ausgewertet mit dem Geosphären-Sorptionsdatensatz "Tonstein". A4-9

Tab. A4.6-2: Dosisdominierende Abfallsorten für den Rechenfall R1 für eine hydraulische Durchlässigkeit von 10^{-9} m/s und ausgewertet mit dem Geosphären-Sorptionsdatensatz "Calcit". A4-10

Tab. A4.6-3: Dosisdominierende Abfallsorten für den Rechenfall R2 für eine hydraulische Durchlässigkeit von 10^{-9} m/s und ausgewertet mit dem Geosphären-Sorptionsdatensatz "Tonstein". A4-11

Tab. A4.6-4: Dosisdominierende Abfallsorten für den Rechenfall R2 für eine hydraulische Durchlässigkeit von 10^{-9} m/s und ausgewertet mit dem Geosphären-Sorptionsdatensatz "Calcit". A4-12

Tab. A4.6-5: Dosisdominierende Abfallsorten für den Rechenfall R3 für eine hydraulische Durchlässigkeit von 10^{-9} m/s und ausgewertet mit dem Geosphären-Sorptionsdatensatz "Tonstein". A4-13

Tab. A4.6-6: Dosisdominierende Abfallsorten für den Rechenfall R3 für eine hydraulische Durchlässigkeit von 10^{-9} m/s und ausgewertet mit dem Geosphären-Sorptionsdatensatz "Calcit". A4-14

Tab. A4.6-7: Dosisdominierende Abfallsorten für den Rechenfall R4 für eine hydraulische Durchlässigkeit von 10^{-9} m/s und ausgewertet mit dem Geosphären-Sorptionsdatensatz "Tonstein". A4-15

Tab. A4.6-8: Dosisdominierende Abfallsorten für den Rechenfall R4 für eine hydraulische Durchlässigkeit von 10^{-9} m/s und ausgewertet mit dem Geosphären-Sorptionsdatensatz "Calcit". A4-16

Tab. A4.6-9: Dosisdominierende Abfallsorten für den Rechenfall R1 für eine hydraulische Durchlässigkeit von 10^{-10} m/s und ausgewertet mit dem Geosphären-Sorptionsdatensatz "Tonstein". A4-17

Tab. A4.6-10: Dosisdominierende Abfallsorten für den Rechenfall R1 für eine hydraulische Durchlässigkeit von 10^{-10} m/s und ausgewertet mit dem Geosphären-Sorptionsdatensatz "Calcit". A4-18

Tab. A4.6-11: Dosisdominierende Abfallsorten für den Rechenfall R2 für eine hydraulische Durchlässigkeit von 10^{-10} m/s und ausgewertet mit dem Geosphären-Sorptionsdatensatz "Tonstein". A4-19

Tab. A4.6-12: Dosisdominierende Abfallsorten für den Rechenfall R2 für eine hydraulische Durchlässigkeit von 10^{-10} m/s und ausgewertet mit dem Geosphären-Sorptionsdatensatz "Calcit". A4-20

Tab. A4.6-13: Dosisdominierende Abfallsorten für den Rechenfall R3 für eine hydraulische Durchlässigkeit von 10^{-10} m/s und ausgewertet mit dem Geosphären-Sorptionsdatensatz "Tonstein". A4-21

Tab. A4.6-14: Dosisdominierende Abfallsorten für den Rechenfall R3 für eine hydraulische Durchlässigkeit von 10^{-10} m/s und ausgewertet mit dem Geosphären-Sorptionsdatensatz "Calcit". A4-22

Tab. A4.6-15: Dosisdominierende Abfallsorten für den Rechenfall R4 für eine hydraulische Durchlässigkeit von 10^{-10} m/s und ausgewertet mit dem Geosphären-Sorptionsdatensatz "Tonstein". A4-23

Tab. A4.6-16: Dosisdominierende Abfallsorten für den Rechenfall R4 für eine hydraulische Durchlässigkeit von 10^{-10} m/s und ausgewertet mit dem Geosphären-Sorptionsdatensatz "Calcit". A4-24

Tab. A4.6-17: Dosisdominierende Abfallsorten für den Rechenfall R5. ..... A4-25

Tab. A4.6-18: Zusammenfassung der Resultate der Bewertung der dosisdominierenden Abfallsorten. A4-26

Tab. A5.5-1: Inputparameter für die Sensitivitätsbetrachtungen bzgl. der Art der Transportpfade und der Ausbildung des Porenraums. A5-40

Verzeichnis der Figuren

Fig. 1.2-1: Übersicht über die Verursacher von radioaktiven Abfällen und das Entsorgungskonzept. 2

Fig. 2.4-1: Zeitlicher Verlauf der im Projekt Wellenberg für ein SMA-Lager berechneten Gesamtdosis für den Referenzfall. 21

Fig. 2.4-2: Zeitlicher Verlauf der im Projekt Kristallin-I für ein HAA-Lager berechneten Gesamtdosis für den Referenzfall. 27

Fig. 2.4-3: Zeitlicher Verlauf der im Projekt Entsorgungsnachweis für ein HAA-Lager berechneten Gesamtdosis für den Referenzfall. 29

Fig. 2.5-1: Modellhafte Lagerauslegung SMA für das umhüllende Abfallinventar. 41

Fig. 2.5-2: Modellhafte Lagerauslegung HAA für das umhüllende Abfallinventar. 46

Fig. 2.5-3 Verschiedene Konzeptualisierungen des Wirtgesteins (WG) bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (EG). 52

Fig. 2.5-4 Konzeptualisierung von Störungszonen, die eine SMA-Kaverne schneiden. 54

Fig. 2.5-5: Vergleich der Biosphären-Transfer-Koeffizienten für die verschiedenen Biosphärentypen (A, B, C) und Klimaszenarien (I, II, III) für eine Auswahl von sicherheitsrelevanten Nukliden. 59

Fig. 2.5-6: Modell 2: Erosion, Verfrachtung, Verdünnung und Ablagerung von Material aus dem Gebiet des freigelegten Lagers. 62

Fig. 2.5-7: Modell 2: Auswirkung der Neigung des Lagers während der erosiven Freilegung. 63

Fig. 2.5-8: Modell 2: Gewinnung und Verdünnung von Trinkwasser aus einem Grundwasserträger im Gebiet, das vom Vorfluter deponiertes radionuklidhaltiges Sedimentmaterial enthält. 64

Fig. 2.5-9: Schematische Darstellung der hydraulischen Durchlässigkeit von Opalinustons als Funktion der Tiefe bzw. der Zeit für ein HAA-Lager. 66

Fig. 2.5-10: Schematische Darstellung der hydraulischen Durchlässigkeit des Opalinustons als Funktion der Tiefe bzw. der Zeit für ein SMA-Lager. 67

Fig. 3.2-1a: Zeitliche Entwicklung der Aktivität der Abfallkategorien gemäss Definition KEV. 73

Fig. 3.2-1b: Zeitliche Entwicklung der spezifischen Aktivität der Abfallkategorien gemäss Definition KEV. 73

Fig. 3.2-2a: Zeitliche Entwicklung der Radiotoxizität der Abfallkategorien gemäss Definition KEV. 74

Fig. 3.2-2b: Zeitliche Entwicklung der spezifischen Radiotoxizität der Abfallkategorien gemäss Definition KEV. 74

Fig. 3.2-2c: Zeitliche Entwicklung der Radiotoxizität der einzelnen Abfallsorten der Abfallkategorien ATA (rot) und SMA (schwarz). 75

Fig. 3.2-3a: Zeitliche Entwicklung der Wärmeleistung der Abfallkategorien gemäss Definition KEV. 76

Fig. 3.2-3b: Zeitliche Entwicklung der spezifischen Wärmeleistung der Abfallkategorien gemäss Definition KEV. 76

Fig. 3.2-4a: Zeitliche Entwicklung der Gasbildungsraten für ATA und SMA gemäss KEV. 78

Fig. 3.2-4b: Zeitliche Entwicklung der spezifischen Gasbildungsraten für ATA und SMA gemäss KEV pro Kubikmeter verpacktes Volumen. 78

Fig. 3.2-5a: Berechnete Dosis als Funktion des Abfallvolumens im SMA-Lager für ein homogen-poröses Wirtgestein ohne Störungszonen. 82

Fig. 3.2-5b: Berechnete Dosen für alle ATA- und SMA-Abfallsorten im SMA-Lager für ein homogen-poröses Wirtgestein ohne Störungszonen. 83

Fig. 3.2-6a: Berechnete Dosis als Funktion des Abfallvolumens im SMA-Lager für ein homogen-poröses Wirtgestein mit Störungszonen. 84

Fig. 3.2-6b: Berechnete Dosen für alle ATA- und SMA-Abfallsorten im SMA-Lager für ein homogen-poröses Wirtgestein mit Störungszonen. 85

Fig. 3.3-1a: Resultate der Rechenfall-Familie R1: Homogen-poröses Wirtgestein ohne Störungszonen, ausgewertet mit dem Geosphären-Sorptionsdatensatz "Tonstein". 89

Fig. 3.3-1b: Resultate der Rechenfall-Familie R1: Homogen-poröses Wirtgestein ohne Störungszonen, ausgewertet mit den Geosphären-Sorptionsdatensätzen "Tonstein" und "Calcit". 90

Fig. 3.3-2: Aus dem SMA-Lager zu entfernendes Abfallvolumen als Funktion der hydraulischen Durchlässigkeit eines homogen-porösen Wirtgesteins, damit die gewählte Dosislimite gerade noch unterschritten wird. 90

Fig. 3.3-3: Resultate der Rechenfall-Familien R1 – R5 für eine grossräumige hydraulische Durchlässigkeit von 10^{-10} m/s (Durchlässigkeit ohne Störungszonen, aber mit Klüften). 93

Fig. 3.3-4: Resultate der Rechenfall-Familien R1 – R5 für eine grossräumige hydraulische Durchlässigkeit von 10^{-9} m/s (Durchlässigkeit ohne Störungszonen, aber mit Klüften). 94

Fig. 3.3-5: Dosisbeitrag dividiert durch Volumen für die 10 dosisdominierenden Abfallsorten für den Rechenfall R4. 97

Fig. 3.3-6: Berechnete Dosen für ein SMA-Lager in einem homogen-porösen Wirtgestein (RZ). 105

Fig. 3.3-7: Berechnete Dosen für ein SMA-Lager in einem homogen-porösen Wirtgestein (AZ). 106

Fig. 4.3-1: Konzeptionelle Darstellung des geologischen Tiefenlagers SMA. 112

Fig. 4.3-2: Konzeptionelle Darstellung des geologischen Tiefenlagers HAA für abgebrannte Brennelemente (BE), verglaste hochaktive Abfälle aus der Wiederaufarbeitung (HAA) und langlebige mittelaktive Abfälle (LMA). 113

Fig. 4.3-3: Referenz-Barrierenkonzept für schwach- und mittelaktive Abfälle (SMA). 114

Fig. 4.3-4: Referenz-Barrierenkonzept für abgebrannte Brennelemente (BE). 115

Fig. 4.3-5: Referenz-Barrierenkonzept für verglaste hochaktive Abfälle (HAA). 116

Fig. 4.3-6: Referenz-Barrierenkonzept für langlebige mittelaktive Abfälle (LMA). 117

Fig. 4.7-1a: Entwicklung und Aufteilung der Radiotoxizität für abgebrannte Brennelemente auf die verschiedenen Komponenten des Nahfelds, das Wirtgestein und das Gebiet ausserhalb des Wirtgesteins für $K = 10^{-13}$ m/s. 129

Fig. 4.7-1b: Entwicklung und Aufteilung der Radiotoxizität für abgebrannte Brennelemente auf die verschiedenen Komponenten des Nahfelds, das Wirtgestein und das Gebiet ausserhalb des Wirtgesteins für $K = 10^{-10}$ m/s. 130

Fig. 4.7-2a: Entwicklung und Aufteilung der Radiotoxizität für verglaste hochaktive Abfälle auf die verschiedenen Komponenten des Nahfelds, das Wirtgestein und das Gebiet ausserhalb des Wirtgesteins für $K = 10^{-13}$ m/s. 131

Fig. 4.7-2b: Entwicklung und Aufteilung der Radiotoxizität für verglaste hochaktive Abfälle auf die verschiedenen Komponenten des Nahfelds, das Wirtgestein und das Gebiet ausserhalb des Wirtgesteins für $K = 10^{-10}$ m/s. 132

Fig. 4.7-3a: Entwicklung und Aufteilung der Radiotoxizität für langlebige mittelaktive Abfälle auf die verschiedenen Komponenten des Nahfelds, das Wirtgestein und das Gebiet ausserhalb des Wirtgesteins für $K = 10^{-13}$ m/s. 133

Fig. 4.7-3b: Entwicklung und Aufteilung der Radiotoxizität für langlebige mittelaktive Abfälle auf die verschiedenen Komponenten des Nahfelds, das Wirtgestein und das Gebiet ausserhalb des Wirtgesteins für $K = 10^{-10}$ m/s. 134

Fig. 4.7-4a: Berechnete Dosen für ein HAA-Lager in einem homogen-porösen Wirtgestein für $K = 10^{-13}$ m/s. 135

Fig. 4.7-4b: Berechnete Dosen für ein HAA-Lager in einem homogen-porösen Wirtgestein für $K = 10^{-10}$ m/s. 136

Fig. 4.7-5a: Entwicklung und Aufteilung der Radiotoxizität für ein SMA-Lager für $K = 10^{-13}$ m/s. 138

Fig. 4.7-5b: Entwicklung und Aufteilung der Radiotoxizität für ein SMA-Lager für $K = 10^{-10}$ m/s. 139

Fig. 4.7-6a: Berechnete Dosen für ein SMA-Lager in einem homogen-porösen Wirtgestein für $K = 10^{-13}$ m/s. 140

Fig. 4.7-6b: Berechnete Dosen für ein SMA-Lager in einem homogen-porösen Wirtgestein für $K = 10^{-10}$ m/s. 141

Fig. 4.7-7a: Radionuklid-Transferraten für abgebrannte Brennelemente für $K = 10^{-13}$ m/s. 145

Fig. 4.7-7b: Radionuklid-Transferraten für abgebrannte Brennelemente für $K = 10^{-10}$ m/s. 146

Fig. 4.7-8a: Radionuklid-Transferraten für verglaste hochaktive Abfälle für $K = 10^{-13}$ m/s. 147

Fig. 4.7-8b: Radionuklid-Transferraten für verglaste hochaktive Abfälle für $K = 10^{-10}$ m/s. 148

Fig. 4.7-9a: Radionuklid-Transferraten für LMA für $K = 10^{-13}$ m/s. 149

Fig. 4.7-9b: Radionuklid-Transferraten für LMA für $K = 10^{-10}$ m/s. 150

Fig. 4.7-10a: Radionuklid-Transferraten für SMA für $K = 10^{-13}$ m/s. 151

Fig. 4.7-10b: Radionuklid-Transferraten für SMA für K = 10^{-10} m/s. 152

Fig. A2.1-1: Verwendete Terminologie zu den Lagerkonfigurationen für SMA und HAA. A2-2

Fig. A2.3-1: Modellhaftes Konzept für BE/HAA-Lagerstollen. A2-4

Fig. A2.3-2: Modellhaftes Konzept für SMA-Lagerkaverne des Typs K09 (Längsschnitt)..... A2-5

Fig. A2.4-1: Schematische Darstellung des Lagerfelds (Grundriss) mit seinen wichtigsten Elementen für das SMA- bzw. das HAA-Lager A2-7

Fig. A2.4-2: Bevorzugte Lagerfeldbreite für SMA-Lagerkavernen und BE/HAA-Lagerstollen. A2-8

Fig. A2.5-1: Schematische Darstellung des Tiefenlager (Grundriss) mit seinen wichtigsten Elementen für das SMA- bzw. HAA-Lager. A2-10

Fig. A2.5-2: Klassifizierung von Diskontinuitäten im Wirtgestein. A2-11

Fig. A2.5-3: Mindestbreite und nutzbare Breite für Lagerzonen SMA und HAA. A2-13

Fig. A2.6-1: Modellhafter Grundriss einer Lagerkonfiguration für ein HAA-Lager für das umhüllende Abfallinventar..... A2-15

Fig. A2.6-2: Modellhafter Grundriss einer Lagerkonfiguration für ein SMA-Lager mit dem Kavernentyp K09 für das umhüllende Abfallinventar. A2-16

Fig. A2.6-3: Schematische Darstellung (beispielhaft) der Lagerzone für das SMA- bzw. das HAA-Lager bei ungünstiger geologischer Konfiguration infolge einer auslegungsbestimmenden Störungszone. A2-19

Fig. A2.6-4: Erforderliche Lagerzone in Abhängigkeit zur Einlagerungslänge für BE/HAA-Lagerstollen (links) und in Abhängigkeit zur Einlagerungslänge und Kavernengrösse für SMA-Lagerkavernen (rechts). A2-20

Fig. A2.6-5: Grundmodul SMA (links) und HAA (rechts). A2-23

Fig. A4.3-1: Modellgeometrie für VPAC-Rechnungen (homogen-poröses Wirtgestein ohne Klüftung). A4-3

Fig. A4.3-2: Modellgeometrie für VPAC-Rechnungen (homogen-poröses Wirtgestein mit vertikalen Störungszonen). A4-4

Fig. A4.5-1: Auswertung der dosisdominierenden Abfallsorten: Beispiel einer Berechnung der abfallsorten- und rechenfallspezifischen Dosisbeiträge..... A4-7

Fig. A4.5-2: Auswertung der dosisdominierenden Abfallsorten: Beispiel für das sukzessive Entfernen der Abfälle mit den grössten Dosisbeiträgen, bis ein definierter Dosisgrenzwert eingehalten wird. A4-7

Fig. A5.2-1: Einfluss der hydraulischen Durchlässigkeit eines homogen-porösen Wirtgesteins auf die berechneten Dosismaxima. A5-3

Fig. A5.2-2: Einfluss der hydraulischen Durchlässigkeit eines homogen-porösen Wirtgesteins auf die berechneten Dosismaxima für BE und HAA mit und ohne Bentonit-Degradation. A5-4

Fig. A5.2-3: Einfluss der Transmissivität einer Störungszone senkrecht zur Achse der Lagerstollen auf die berechnete Dosis für das HAA-Lager. A5-5

Fig. A5.2-4: Einfluss der Anzahl und Transmissivität von Strörungszonen senkrecht zur Achse der Lagerkavernen auf die berechneten Dosismaxima für das SMA-Lager in einem homogen-porösen Wirtgestein. A5-6

Fig. A5.2-5: Einfluss der Anzahl und Transmissivität von Strörungszonen senkrecht zur Achse der Lagerkavernen auf die berechneten Dosismaxima für das SMA-Lager in einem homogen-porösen Wirtgestein. A5-7

Fig. A5.2-6: Einfluss der Anzahl und Transmissivität von Strörungszonen senkrecht zur Tunnelachse auf die berechneten Dosismaxima für das LMA-Lager in einem homogen-porösen Wirtgestein. A5-8

Fig. A5.3-1: Einfluss der Transportpfadlänge auf die berechneten Dosismaxima für ein HAA-Lager (BE) in einem homogen-porösen Wirtgestein für $K = 10^{-13}$ m/s. A5-10

Fig. A5.3-2: Einfluss der Transportpfadlänge auf die berechneten Dosismaxima für ein HAA-Lager (BE) in einem homogen-porösen Wirtgestein für $K = 10^{-10}$ m/s. A5-11

Fig. A5.3-3: Einfluss der Transportpfadlänge auf die berechneten Dosismaxima für ein HAA-Lager (LMA) in einem homogen-porösen Wirtgestein für $K = 10^{-13}$ m/s. A5-12

Fig. A5.3-4: Einfluss der Transportpfadlänge auf die berechneten Dosismaxima für ein HAA-Lager (LMA) in einem homogen-porösen Wirtgestein für $K = 10^{-10}$ m/s. A5-13

Fig. A5.3-5: Einfluss der Transportpfadlänge auf die berechneten Dosismaxima für ein SMA-Lager in einem homogen-porösen Wirtgestein für $K = 10^{-13}$ m/s. A5-14

Fig. A5.3-6: Einfluss der Transportpfadlänge auf die berechneten Dosismaxima für ein SMA-Lager in einem homogen-porösen Wirtgestein für $K = 10^{-10}$ m/s. A5-15

Fig. A5.3-7: Einfluss der Transportpfadlänge auf die berechneten Dosismaxima für ein SMA-Lager in einem kleinräumig geklüfteten Wirtgestein für $K = 10^{-10}$ m/s. A5-16

Fig. A5.3-8: Einfluss der Transportpfadlänge auf die berechneten Dosismaxima für ein SMA-Lager in einem kleinräumig geklüfteten Wirtgestein für $K = 10^{-11}$ m/s. A5-17

Fig. A5.3-9: Einfluss der Transportpfadlänge auf die berechneten Dosismaxima für ein SMA-Lager in einem homogen-porösen Wirtgestein mit zwei Störungszonen senkrecht zur Kavernenachse für $K = 10^{-10}$ m/s. A5-18

Fig. A5.3-10: Einfluss der Transportpfadlänge auf die berechneten Dosismaxima für ein SMA-Lager in einem homogen-porösen Wirtgestein mit zwei Störungszonen senkrecht zur Kavernenachse für $K = 10^{-11}$ m/s. A5-19

Fig. A5.4-1: Jährliche Strahlendosis gemäss Modell 1 als Funktion des Zeitpunkts t_E, nach welchem das Lager in den Einflussbereich der Erdoberfläche gelangt. A5-21

Fig. A5.4-2: Jährliche Strahlendosis gemäss Modell 2 als Funktion des Zeitpunkts der erosiven Freilegung (t_E) für das HAA-Lager (BE + HAA). A5-22

Fig. A5.4-3: Jährliche Strahlendosis gemäss Modell 2 als Funktion des Zeitpunkts der erosiven Freilegung (t_E) für das HAA-Lager (LMA-Teil). A5-23

Fig. A5.4-4: Jährliche Strahlendosis gemäss Modell 2 als Funktion des Zeitpunkts der erosiven Freilegung (t_E) für das SMA-Lager. A5-23

Fig. A5.4-5: Einfluss einer zeitabhängigen Dekompaktion auf ein HAA-Lager am Beispiel des Wirtgesteins Opalinuston gemäss Modell 3. ..... A5-25

Fig. A5.4-6: Einfluss einer zeitabhängigen Dekompaktion auf ein SMA-Lager am Beispiel des Wirtgesteins Opalinuston gemäss Modell 3. ..... A5-26

Fig. A5.5-1: Radiotoxizität als Funktion der Zeit für abgebrannte Brennelemente. A5-27

Fig. A5.5-2: Radiotoxizität als Funktion der Zeit für verglaste hochaktive Abfälle. A5-28

Fig. A5.5-3: Radiotoxizität als Funktion der Zeit für LMA (Referenzzuteilung). A5-28

Fig. A5.5-4: Radiotoxizität als Funktion der Zeit für SMA (Referenzzuteilung)..... A5-29

Fig. A5.5-5: Barriereneffizienz als Funktion der hydraulischen Durchlässigkeit (homogen-poröses WG, i = 0.1 m/m, L = 40 m, Sorption: Tonstein). A5-31

Fig. A5.5-6: Barriereneffizienz als Funktion der hydraulischen Durchlässigkeit (homogen-poröses WG, i = 0.1 m/m, L = 40 m, Sorption: Calcit). A5-31

Fig. A5.5-7: Barriereneffizienz als Funktion der Transmissivität (geklüftetes WG, i = 0.1 m/m, L = 40 m, Sorption: Tonstein)..... A5-32

Fig. A5.5-8: Barriereneffizienz als Funktion der Transmissivität (geklüftetes WG, i = 0.1 m/m, L = 40 m, Sorption: Calcit). A5-32

Fig. A5.5-9: Barriereneffizienz als Funktion der Transportpfadlänge (homogen-poröses Wirtgestein, i = 0.1 m/m, K = 10^{-13} m/s, Sorption: Tonstein). A5-34

Fig. A5.5-10: Barriereneffizienz als Funktion der Transportpfadlänge (homogen-poröses Wirtgestein, i = 0.1 m/m, K = 10^{-10} m/s, Sorption: Tonstein). A5-34

Fig. A5.5-11: Barriereneffizienz als Funktion der Transportpfadlänge (homogen-poröses Wirtgestein, i = 0.1 m/m, K = 10^{-13} m/s, Sorption: Calcit). A5-35

Fig. A5.5-12: Barriereneffizienz als Funktion der Transportpfadlänge (homogen-poröses Wirtgestein, i = 0.1 m/m, K = 10^{-10} m/s, Sorption: Calcit). A5-35

Fig. A5.5-13: Barriereneffizienz als Funktion der Transportpfadlänge (geklüftetes Wirtgestein, i = 0.1 m/m, T = 10^{-10} m^2/s, Sorption: Tonstein). A5-36

Fig. A5.5-14: Barriereneffizienz als Funktion der Transportpfadlänge (geklüftetes Wirtgestein, i = 0.1 m/m, T = 10^{-8} m^2/s, Sorption: Tonstein). A5-36

Fig. A5.5-15: Barriereneffizienz als Funktion der Transportpfadlänge (geklüftetes Wirtgestein, i = 0.1 m/m, T = 10^{-10} m^2/s, Sorption: Calcit). A5-37

Fig. A5.5-16: Barriereneffizienz als Funktion der Transportpfadlänge (geklüftetes Wirtgestein, i = 0.1 m/m, T = 10^{-8} m^2/s, Sorption: Calcit). A5-37

Fig. A5.5-17: Nuklidspezifische Reichweite (99 % Zerfall) im homogen-porösen Wirtgestein (Sorption: Tonstein)..... A5-38

Fig. A5.5-18: Nuklidspezifische Reichweite (99 % Zerfall) im homogen-porösen Wirtgestein (Sorption: Calcit). A5-38

Fig. A5.5-19: Nuklidspezifische Reichweite (99 % Zerfall) in einer Kluft (Sorption: Tonstein). A5-39

Fig. A5.5-20: Nuklidspezifische Reichweite (99 % Zerfall) in einer Kluft (Sorption: Calcit). A5-39

Fig. A5.5-21: Einfluss der Art der Transportpfade (homogen-poröses Medium, Kluft, Röhre bzw. Channel) und der Ausbildung des Porenraums (mit/ohne diffusionszugänglicher Matrix) auf die Barriereneffizienz für drei ausgewählte Beispielnuklide. A5-41

1 Einleitung

1.1 Zweck

Der vorliegende Bericht ergänzt den Bericht der Nagra mit dem Vorschlag geologischer Standortgebiete (Nagra 2008b), welcher die Umsetzung des Konzeptteils des Sachplans geologische Tiefenlager (SGT, s. BFE 2008) für die Etappe 1 (Auswahl von geologischen Standortgebieten für geologische Tiefenlager[1] SMA und HAA) durch die Entsorgungspflichtigen dokumentiert. Er begründet die Abfallzuteilung zu den geologischen Tiefenlagern SMA und HAA und legt die entsprechenden Barrieren- und Sicherheitskonzepte fest. Er zeigt auf, welches die lagerspezifischen Anforderungen an die Geologie sind und wie sie begründet werden. Diese Anforderungen werden im schrittweisen Einengungsverfahren zur Auswahl der geologischen Standortgebiete verwendet (Nagra 2008b). Der vorliegende Bericht ist keine konventionelle Sicherheitsanalyse; insbesondere enthält er auch keine sicherheitstechnische Bewertung von konkreten geologischen Tiefenlagern an bestimmten Standorten und in bestimmten Wirtgesteinen. Vielmehr werden anhand von orientierenden Sicherheitsbetrachtungen und Erfahrungen die erforderlichen Anforderungen abgeleitet. Standortbezogene Sicherheitsanalysen werden Gegenstand der nachfolgenden Etappen 2 und 3 des Sachplanverfahrens sein. Der Bericht richtet sich in erster Linie an ein technisch versiertes Publikum.

1.2 Ausgangslage

Aus den fünf in der Schweiz in Betrieb stehenden Kernkraftwerken (Tab. 1.2-1) und aus Medizin, Industrie und Forschung resultieren radioaktive Abfälle, zu deren sicherer Entsorgung die Verursacher gesetzlich verpflichtet sind. Um ihrer Verantwortung nachzukommen, gründeten die Elektrizitätsgesellschaften als Betreiber der Kernkraftwerke sowie die Schweizerische Eidgenossenschaft, die für die Entsorgung der aus der Medizin, Industrie und Forschung stammenden Abfälle verantwortlich ist, 1972 die Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra). Die Nagra ist verantwortlich für die Vorbereitung und Realisierung der benötigten geologischen Tiefenlager.

Die seit gut 30 Jahren in der Schweiz durchgeführten Arbeiten zur geologischen Tiefenlagerung haben zu einem soliden technisch-wissenschaftlichen Kenntnisstand geführt. Dazu gehört der Entsorgungsnachweis für die schwach- und mittelaktiven Abfälle (erbracht am Beispiel Oberbauenstock, Nagra 1985) und für die hochaktiven Abfälle (erbracht am Beispiel Opalinuston im Zürcher Weinland, Nagra 2002a, 2002b, 2002c), die Arbeiten zur Identifikation von Standorten bzw. Standortregionen für SMA-Lager (Nagra 1981, Nagra 1983, Nagra 1993a, HSK 2001) sowie die Arbeiten zur Abklärung der Möglichkeiten für die Lagerung der HAA (Nagra 2005a), inkl. Wahl des Opalinustons und des Zürcher Weinlands für den Entsorgungsnachweis HAA (Nagra 1985, Nagra 1988, Nagra 1991, Nagra 1994a, Nagra 1994c, AkEnd 2002a, HSK 2002, HSK 2005). Für SMA wurde mit dem Projekt Wellenberg Rahmenbewilligungsreife erreicht (GNW 1994, Nagra 1994b, HSK 1996). Nach zwei ablehnenden kantonalen Abstimmungen wurde das Projekt zurückgezogen. Heute sind somit die technisch-wissenschaftlichen Grundlagen für die weiteren Arbeiten im Hinblick auf die Realisierung der geologischen Tiefenlager für SMA bzw. HAA vorhanden.

---

[1] Für den Begriff "geologisches Tiefenlager" wird häufig der Kurzbegriff "Lager" verwendet, insbesondere die Begriffe "SMA-Lager" und "HAA-Lager".

Im Lager für die hochaktiven Abfälle werden die abgebrannten Brennelemente (kurz: BE), die verglasten hochaktiven Abfälle aus der Wiederaufarbeitung (kurz: HAA) und die langlebigen mittelaktiven Abfälle (kurz: LMA) eingelagert. Dabei werden alle schwach- und mittelaktiven Abfälle (SMA) und Alphatoxischen Abfälle (ATA), die zusammen mit den BE/HAA ins HAA-Lager eingebracht werden, als LMA bezeichnet.

Fig. 1.2-1 gibt eine schematische Übersicht über die Verursacher von radioaktiven Abfällen und das Entsorgungskonzept. Die wichtigsten Schritte im Entsorgungskonzept werden im Folgenden kurz vorgestellt; eine detaillierte Darstellung findet sich in Nagra (2008a).

Tab. 1.2-1: Die gegenwärtig in Betrieb stehenden Kernkraftwerke (KKW) der Schweiz.

KKW	**Reaktortyp** [1)]	**In Betrieb seit**	**Nettokapazität** [2)] [MW(e)]
Beznau I	DWR	1969	365
Beznau II	DWR	1972	365
Mühleberg	SWR	1972	355
Gösgen	DWR	1979	970
Leibstadt	SWR	1984	1165

1) SWR = Siedewasserreaktor, DWR = Druckwasserreaktor

2) Status: September 2008 (Monatsbericht swissnuclear)

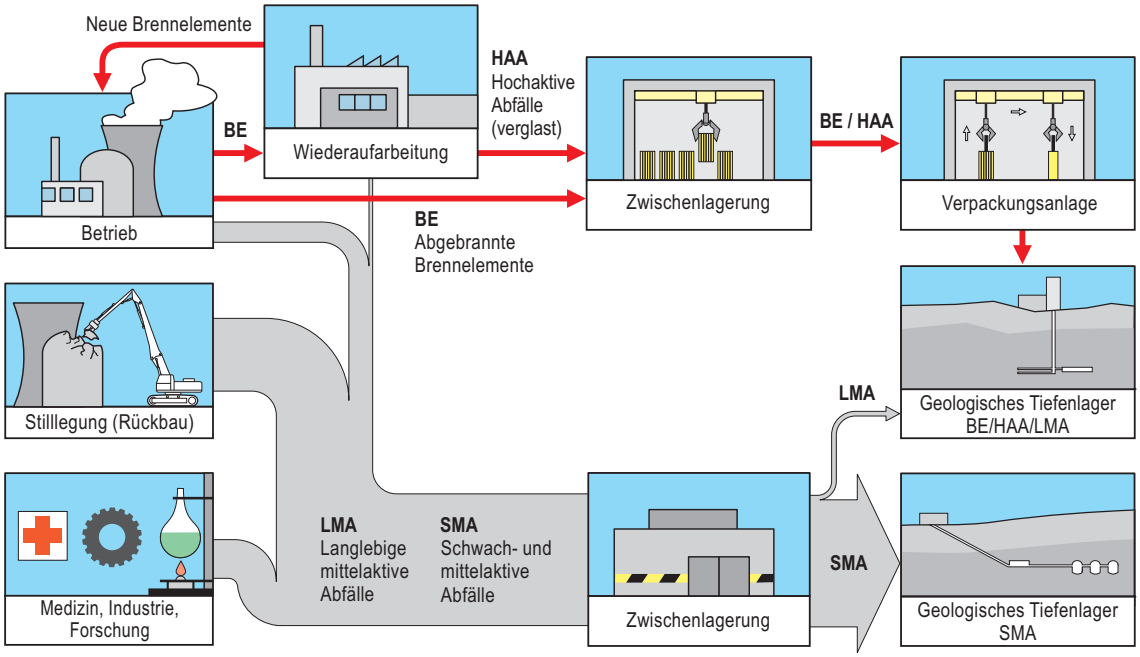


Fig. 1.2-1: Übersicht über die Verursacher von radioaktiven Abfällen und das Entsorgungskonzept.

1.2.1 Radioaktive Abfälle

Radioaktive Abfälle entstehen beim Betrieb und der Stilllegung von Kernkraftwerken, im Brennstoffkreislauf der Kernkraftwerke und aus Medizin, Industrie und Forschung. Um die Abfallvolumen und das entsprechende Nuklid- und Materialinventar abschätzen zu können,

müssen verschiedene Annahmen getroffen werden. Diese Annahmen und die entsprechenden Abfallvolumen und -inventare sind in Nagra (2007) und Nagra (2008d) dokumentiert und in Kap. 2.5.2 des vorliegenden Berichts detailliert diskutiert und zusammengefasst.

Ein Teil der abgebrannten Brennelemente aus der Kernenergieproduktion wird aufgearbeitet, wobei das spaltbare Material dazu verwendet wird, um neue Brennelemente herzustellen. Die Abfälle, die bei der Wiederaufarbeitung entstehen, müssen von der Schweiz zurückgenommen werden. Dabei handelt es sich einerseits um verglaste hochaktive Abfälle, andererseits um langlebige mittelaktive Abfälle. Die Schweiz hat mit der Sellafield Ltd (England) und mit der AREVA NC (Frankreich) Verträge zur Wiederaufarbeitung von abgebrannten Brennelementen abgeschlossen. Der grösste Teil dieser Brennelemente wurde bereits aufgearbeitet. Das Kernenergiegesetz (KEG 2003) enthält ein zehnjähriges[2] Moratorium für die Ausfuhr von abgebrannten Brennelementen zum Zweck der Wiederaufarbeitung. Deshalb wird angenommen, dass die Brennelemente, die nicht durch die bestehenden Verträge über die Wiederaufarbeitung abgedeckt sind, auch nicht aufgearbeitet werden, sondern nach einer technisch bedingten Zwischenlagerung direkt in einem geologischen Tiefenlager gelagert werden (sogenannte "direkte Endlagerung").

1.2.2 Zwischenlagerung

Vor der Entsorgung in geologischen Tiefenlagern werden alle radioaktiven Abfälle in Zwischenlager verbracht. Bei den abgebrannten Brennelementen und den verglasten hochaktiven Abfällen ist die notwendige Dauer der Zwischenlager zu berücksichtigen, damit die anfänglich hohe Wärmeleistung genügend abklingen kann, um eine langfristig sichere Entsorgung in einem geologischen Tiefenlager zu gewährleisten. Die Zwischenlager ZWILAG und ZWIBEZ, das Nasslager des KKW Gösgen, weitere Zwischenlager für Betriebsabfälle an den Standorten der Kernkraftwerke sowie das Bundeszwischenlager haben eine genügende Kapazität für sämtliche aus der Schweiz stammenden radioaktiven Abfälle, bis diese in ein geologisches Tiefenlager überführt werden können.

1.2.3 Geologische Tiefenlagerung

Für die geologische Tiefenlagerung sind grundsätzlich zwei verschiedene Lager vorgesehen: Eines für die schwach- und mittelaktiven Abfälle (SMA-Lager) und eines für die abgebrannten Brennelemente, die verglasten hochaktiven Abfälle aus der Wiederaufarbeitung von abgebrannten Brennelementen und die langlebigen mittelaktiven Abfälle (HAA-Lager). Das SMA- und das HAA-Lager können an zwei verschiedenen Standorten, bei einer entsprechenden geologischen Situation aber auch am gleichen Standort (mit den Lagerkammern für beide Lager entweder in der gleichen oder aber in unterschiedlichen geologischen Schichten) erstellt werden ('Kombilager').

1.3 Aufbau des Berichts

Der Bericht ist wie folgt aufgebaut: Kap. 1 erläutert den Zweck des Berichts und gibt einen Überblick über die Ausgangslage. Kap. 2 stellt die Vorgaben, Grundlagen und Prinzipien zusammen, die in den nachfolgenden Kapiteln benötigt werden. Kap. 3 diskutiert das Vorgehen bei der Abfallzuteilung zum SMA- bzw. HAA-Lager und präsentiert den entsprechenden Vorschlag der Entsorgungspflichtigen. Kap. 4 stellt das Sicherheitskonzept für SMA- und HAA-Lager vor, inkl. beispielhafte Lagerauslegung und Barrierensystem für die gewählte Abfallzutei-

[2] Beginn: 1. Juli 2006.

lung. Es wird aufgezeigt, welche Sicherheitsfunktionen die verschiedenen Elemente des Barrierensystems ausüben, und die Barrierenwirkung der einzelnen Elemente wird illustriert. Kap. 5 zeigt auf, wie die entsprechenden Anforderungen an die geologischen Tiefenlager festgelegt werden. Danach werden die Anforderungen präsentiert, basierend auf sicherheitstechnischen Überlegungen, Überlegungen zum Platzbedarf und zur bautechnischen Machbarkeit (Tab. 5.4-1). Kap. 6 enthält die Schlussfolgerungen. Anhang 1 enthält eine systematische Zusammenstellung der Begründungen für die in Kap. 5 vorgestellten Anforderungen an die Geologie. In Anhang 2 werden die benötigten Grundlagen zur Lagerkonfiguration präsentiert. In Anhang 3 werden wichtige Inputdaten für die sicherheitstechnischen Rechnungen dokumentiert. Anhang 4 erläutert die Methodik der dosisdominierenden Abfallsorten, und in Anhang 5 werden orientierende Sicherheitsbetrachtungen zur Illustration von ausgewählten Eigenschaften der Geosphäre präsentiert.

2 Vorgaben, Grundlagen und Prinzipien

2.1 Ziel und Aufbau des Kapitels

Das Ziel des vorliegenden Kapitels ist, die in den nachfolgenden Kapiteln benötigten Vorgaben, Grundlagen und Prinzipien zusammenzustellen. Dies umfasst die Vorgaben aus dem SGT (BFE 2008), aus dem Kernenergiegesetz (KEG 2003) und der Kernenergieverordnung (KEV 2004) sowie aus der behördlichen Richtlinie HSK-R-21 (HSK & KSA 1993)[3] sowie die Erfahrung der Nagra mit früheren nationalen Projekten.

Das Kapitel ist wie folgt aufgebaut. Kap. 2.2 stellt die wichtigsten Vorgaben aus dem SGT zum Einengungsverfahren zusammen. Kap. 2.3 dokumentiert weitere Vorgaben und Prinzipien bzgl. Sicherheits- und Barrierenkonzept sowie bzgl. Standortwahl und Auslegung. Da die bisherige Erfahrung mit Sicherheitsanalysen von geologischen Tiefenlagern sowohl bei der Abfallzuteilung als auch bei der Festlegung der Anforderungen an die Geologie eine zentrale Rolle spielt, werden in Kap. 2.4 die entsprechenden Informationen zusammengestellt. Kap. 2.5 dokumentiert die zum Zweck der generischen[4] Sicherheitsbetrachtungen getroffenen Annahmen zu den geologischen Tiefenlagern SMA und HAA (Inventar, Nahfeld, Geosphäre, Biosphäre). Kap. 2.6 enthält die Schlussfolgerungen.

2.2 Vorgaben aus dem Sachplan geologische Tiefenlager

2.2.1 Überblick und Begriffsdefinitionen

Gemäss SGT erfolgt die Auswahl von geologischen Standortgebieten und Standorten für die geologischen Tiefenlager[5] in der Schweiz in drei Etappen:

- Etappe 1: Auswahl von *geologischen Standortgebieten* je für ein geologisches Tiefenlager für SMA und für HAA[6]
- Etappe 2: Auswahl von *mindestens zwei Standorten* je für ein geologisches Tiefenlager für SMA und für HAA[6]
- Etappe 3: *Standortwahl* und Rahmenbewilligungsverfahren für je ein geologisches Tiefenlager für SMA und für HAA[6]

---

[3] Eine neue Richtlinie (G03) ist gegenwärtig in Bearbeitung (HSK 2008a) und wird die Richtlinie HSK-R-21 ersetzen.

[4] Der SGT spricht von "generischen (orientierenden) Sicherheitsbetrachtungen" (BFE 2008). Im vorliegenden Bericht werden beide Ausdrücke verwendet, wobei "generisch" darauf hinweist, dass es sich hier nicht um standortspezifische Rechnungen handelt und "orientierend" den Zweck andeutet, d.h. dass die entsprechenden Resultate als eine der Grundlagen für Festlegungen herangezogen werden.

[5] Als geologisches Tiefenlager wird eine Anlage im geologischen Untergrund bezeichnet, die verschlossen werden kann, sofern der dauernde Schutz von Mensch und Umwelt durch passive Barrieren sichergestellt wird (KEG 2003). Der Begriff "geologisches Tiefenlager" ersetzt den früher gebräuchlichen Begriff "Endlager".

[6] Erfüllt ein Standortgebiet oder Standort sowohl die Anforderungen für das SMA-Lager als auch für das HAA-Lager, so kann das Auswahlverfahren auch zu einem gemeinsamen Standort für das SMA- und das HAA-Lager führen, wo in einem sogenannten "Kombilager" alle radioaktiven Abfälle entsorgt werden (BFE 2008).

Gemäss SGT ist es die Aufgabe der Entsorgungspflichtigen in Etappe 1, aufgrund von Kriterien hinsichtlich Sicherheit und technischer Machbarkeit geologische Standortgebiete[7] für das SMA- und das HAA-Lager vorzuschlagen und diese in einem Bericht zuhanden der Behörden zu begründen. Dies wird mit dem Bericht Nagra (2008b) umgesetzt. Gemäss SGT ist bei der Evaluation von geologischen Standortgebieten in Etappe 1 (Vororientierung) ein schrittweises Einengungsverfahren zu wählen (s. Tab. 2.2-1). Zuerst stehen die grossräumigen, für die Langzeitsicherheit unabdingbaren Kriterien im Vordergrund. Damit werden geeignete geologisch-tektonische Grossräume und die darin vorkommenden potenziell geeigneten Wirtgesteine für die Aufnahme der geologischen Tiefenlager identifiziert. Anschliessend müssen die kleinräumig relevanten Kriterien einbezogen werden, anhand derer sich feststellen lässt, wo die potenziell geeigneten Wirtgesteine in geeigneter Konfiguration für das SMA- bzw. das HAA-Lager vorliegen.

Die schrittweise Einengung erfolgt gemäss SGT anhand von *Kriterien*, welche durch *zu beurteilende Aspekte* beschrieben und für die Einengung mit Hilfe von *Indikatoren* beurteilt und bewertet werden. Die im Einengungsverfahren zu berücksichtigenden 13 Kriterien, gegliedert in vier Kriteriengruppen, sind in Tabelle 1 des SGT aufgeführt (s. Kopie in Tab. 2.2-2). Unter *zu beurteilenden Aspekten* sind Systemeigenschaften und Zusammenhänge zu verstehen, die in ihrer Gesamtheit ein Kriterium beschreiben. Die zu beurteilenden Aspekte sind in den Tabellen A1-1 bis A1-13 im Anhang I des SGT für jedes der 13 Kriterien definiert. *Indikatoren* sind direkte oder indirekte Messgrössen für die zu beurteilenden Kriterien und Aspekte.

Tab. 2.2-1: Übersicht der Vorgaben im SGT (BFE 2008), Anhang I, Kap. 1.1, zu den übergeordneten Fragestellungen in Etappe 1.

Zur Verbesserung der Verständlichkeit ergänzt mit Angabe der Schritte (in Klammern).

Für die Erarbeitung von Vorschlägen geeigneter Standortgebiete für geologische Tiefenlager haben die Entsorgungspflichtigen aus sicherheitstechnischer Sicht folgende anwendungsgerechte Sequenz von Fragestellungen zu beantworten:

- Wie werden die Abfälle den beiden Lagertypen SMA und HAA zugeteilt? (Schritt 1)
- Welche Anforderungen müssen unter Berücksichtigung des zugeteilten Abfallinventars und des zugehörigen Sicherheits- bzw. Barrierenkonzeptes an die standortbezogenen geologischen Verhältnisse gestellt werden? (Schritt 2)
- Wo liegen geeignete geologisch-tektonische Grossräume, die den sicherheitstechnischen Anforderungen genügen? (Schritt 3)
- Welche Gesteine in diesen Grossräumen eignen sich potenziell als Wirtgesteine bzw. als einschlusswirksame Gebirgsbereiche? (Schritt 4)
- Wo liegen potenzielle Wirtgesteine in geeigneter Konfiguration (Ausbildung, Anordnung, Tiefenlage, Mächtigkeit, Erschliessung der untertägigen Bauwerke) vor? (Schritt 5)

Basierend auf der vorgenommenen Zuteilung der Abfälle auf das SMA- bzw. HAA-Lager (gemäss SGT, Anhang I handelt es sich dabei um **Schritt 1** in Etappe 1) werden das Barrieren- und Sicherheitskonzept definiert und die Anforderungen an die standortbezogenen geologischen

[7] Das geologische Standortgebiet wird durch die für die Lagerung der radioaktiven Abfälle geeigneten geologischen Gesteinskörper im Untergrund definiert (BFE 2008).

Verhältnisse festgelegt **(Schritt 2** gemäss SGT). Die Grundlagen, Erläuterungen und Festlegungen zur Abfallzuteilung, zum Barrieren- und Sicherheitskonzept und zu den Anforderungen an die Geologie sind in den folgenden Kapiteln des vorliegenden Berichts dokumentiert: Die Beschreibung der Abfälle und die Diskussion der Abfallzuteilung ist Gegenstand von Kap. 3, die Festlegung des auf die zugeteilten Abfälle abgestimmten Barrieren- bzw. Sicherheitskonzepts für das SMA- und HAA-Lager erfolgt in Kap. 4 und die Festlegung der Anforderungen an und Vorgaben für die geologischen Verhältnisse in Kap. 5.

Die effektive Umsetzung der in Tab. 2.2-1 definierten Einengungsschritte (Schritt 3 bis 5) ist in Nagra (2008b) dokumentiert. Für die detaillierten erdwissenschaftlichen Unterlagen und Begründungen für die Schritte 3 bis 5 wird auf den Bericht zu den geologischen Grundlagen hingewiesen (Nagra 2008c).

In **Schritt 3** gemäss SGT werden geeignete *geologisch-tektonische Grossräume*, die den sicherheitstechnischen Anforderungen genügen, identifiziert und beschrieben (vgl. Kap. 3 in Nagra 2008b). Als *Grossraum* wird ein grösserer zusammenhängender Raum in der Schweiz bezeichnet, der sich aufgrund der überall in diesem Raum ähnlichen geologisch-tektonischen Merkmale zusammenfassend beschreiben lässt.

Danach wird in **Schritt 4** gemäss SGT für diese Grossräume abgeklärt, welche Gesteine bzw. Gesteinsabfolgen sich potenziell als *Wirtgesteine* bzw. als *einschlusswirksame Gebirgsbereiche* eignen (vgl. Kap. 4 in Nagra 2008b). Als einschlusswirksamer Gebirgsbereich wird im SGT derjenige Teil der geologischen Barrieren bezeichnet, der bei der erwarteten Entwicklung des geologischen Tiefenlagers den Einschluss der Abfälle bzw. die Rückhaltung der Radionuklide innerhalb des Betrachtungszeitraums sicherstellt. Der einschlusswirksame Gebirgsbereich umfasst das Wirtgestein und allenfalls vorhandene Rahmengesteine.

In **Schritt 5** gemäss SGT wird geprüft, wo die potenziellen Wirtgesteine bzw. einschlusswirksamen Gebirgsbereiche in geeigneter *Konfiguration* vorliegen (Ausbildung, Grösse und laterale Ausdehnung, Tiefenlage, Mächtigkeit, allgemeine geologische Situation, Machbarkeit der Erschliessung der untertägigen Bauwerke; vgl. Kap. 5 in Nagra 2008b). Für die potenziellen Wirtgesteine werden *bevorzugte Bereiche* identifiziert, die sich aufgrund ihrer geologischen Merkmale voraussichtlich für die Aufnahme der Lagerkammern eines geologischen Tiefenlagers eignen. Anschliessend erfolgt eine Bewertung der bevorzugten Bereiche, die auch für eine Prioritätensetzung verwendet wird. Die bevorzugten Bereiche werden – unter Berücksichtigung der Prioritätensetzung – verwendet, um *geologische Standortgebiete* abzugrenzen. Die Bewertung der resultierenden Standortgebiete stützt sich auf die Bewertungen der in das jeweilige Standortgebiet integrierten Bereiche; dies führt schliesslich zum Vorschlag der geologischen Standortgebiete.

2.2.2 Kriteriengruppen und Kriterien für das Einengungsverfahren

Gemäss SGT haben die Entsorgungspflichtigen bei der Standortevaluation 13 Kriterien zu berücksichtigen, die entsprechend ihrer Funktion und Bedeutung für die Langzeitsicherheit und Machbarkeit des Tiefenlagers in vier Kriteriengruppen eingeteilt sind (Tab. 2.2-2):

- Kriteriengruppe 1 umfasst die *Eigenschaften des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs*. Dazu gehören primär geologische Eigenschaften (hydraulische Barrierenwirkung, geochemische Bedingungen, Freisetzungspfade) und raumbezogene Kriterien (räumliche Ausdehnung, d.h. Mächtigkeit und laterale Ausdehnung sowie die Tiefenlage). Das Wirtgestein bzw. der einschlusswirksame Gebirgsbereich tragen durch ihre Barrierenwirkung wesentlich zur Langzeitsicherheit des Tiefenlagers bei.

- Kriteriengruppe 2 bezieht sich auf die *Langzeitstabilität*, insbesondere auf die Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften einschliesslich der Erosion. In Kriteriengruppe 2 sind aber auch Einflüsse enthalten, die sich aus der Wechselwirkung zwischen Tiefenlager (Abfallgebinde und technische Barrieren) und der geologischen Barriere sowie aus Konflikten durch eine mögliche zukünftige Nutzung von Rohstoffen ergeben. Die Langzeitstabilität gewährleistet, dass die Barrierenwirkung des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs innerhalb des zu betrachtenden Zeitraums im erforderlichen Masse erhalten bleibt.
- Kriteriengruppe 3 betrifft die *Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen*, insbesondere die Charakterisierbarkeit der Gesteine, die Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse und die Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen. Der Begriff "Charakterisierbarkeit" bezieht sich auf die Erfassung der Eigenschaften des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs und deren Zuverlässigkeit, während der Begriff "Explorierbarkeit" zusätzlich Aussagen zu den geometrischen Verhältnissen und den Zustandsparametern sowie zur Zuverlässigkeit dieser Aussagen beinhaltet. Die "Prognostizierbarkeit" betrifft die Zuverlässigkeit der Aussagen über die zeitliche Entwicklung des Tiefenlagers bzw. der relevanten geologischen Aspekte innerhalb des zu betrachtenden Zeitraums[8]. Der Nachweis der Langzeitsicherheit hängt entscheidend von einer genügenden Zuverlässigkeit der dabei verwendeten geologischen Aussagen ab.
- Kriteriengruppe 4 umfasst Kriterien der *bautechnischen Eignung*, insbesondere felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen sowie Anforderungen im Zusammenhang mit der untertägigen Erschliessung der Lagerkammern des Tiefenlagers. Auch diese Kriterien liefern indirekt einen wesentlichen Beitrag zur Langzeitsicherheit des Tiefenlagers, weil durch sie die zuverlässige Erstellung des Tiefenlagers entsprechend den Anforderungen bezüglich Betriebs- und Langzeitsicherheit ermöglicht wird. Bautechnische Erschwernisse (inkl. resultierender zeitlicher Mehraufwand und Mehrkosten beim Bau) werden hingegen in Kauf genommen und fliessen nur untergeordnet in die Einengung und Bewertung ein; sie werden erst berücksichtigt beim Vergleich von sicherheitstechnisch gleichwertigen Varianten bei der Prioritätensetzung der bevorzugten Bereiche in Schritt 5.

[8] Innerhalb des betrachteten Zeitraums muss das Barrierensystem im Lager spezifische Anforderungen zur Gewährleistung des Schutzes von Mensch und Umwelt erfüllen. Nachher ist die Radiotoxizität durch radioaktiven Zerfall so weit reduziert, dass keine speziellen Anforderungen mehr zu erfüllen sind.

Tab. 2.2-2: Kriteriengruppen und Kriterien zur Sicherheit und technischen Machbarkeit für die Standortevaluation gemäss SGT.

Tab. 2.2-2 ist eine Kopie der Tabelle 1 des SGT (BFE 2008).

Kriterien zur Standortevaluation hinsichtlich Sicherheit und technischer Machbarkeit

Kriteriengruppe	Kriterien
1. Eigenschaften des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches	1.1 Räumliche Ausdehnung 1.2 Hydraulische Barrierenwirkung 1.3 Geochemische Bedingungen 1.4 Freisetzungspfade
2. Langzeitstabilität	2.1 Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften 2.2 Erosion 2.3 Lagerbedingte Einflüsse 2.4 Nutzungskonflikte
3. Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen	3.1 Charakterisierbarkeit der Gesteine 3.2 Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse 3.3 Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen
4. Bautechnische Eignung	4.1 Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen 4.2 Untertägige Erschliessung und Wasserhaltung

2.2.3 Vorgaben zu den Schritten 1 und 2

Im vorliegenden Bericht liegt das Hauptaugenmerk auf Schritt 1 (Zuteilung der Abfälle auf das SMA- bzw. HAA-Lager) und Schritt 2 (Festlegung des Barrieren- und Sicherheitskonzepts und der Anforderungen an die standortbezogenen geologischen Verhältnisse). Die entsprechenden Vorgaben sind in Tab. 2.2-3 und Tab. 2.2-4 detailliert aufgeführt und in Tab. 2.2-5 zusammengefasst.

Gemäss SGT, Anhang I, haben die Entsorgungspflichtigen in Schritt 1 den Behörden einen Vorschlag zu unterbreiten, wie die Zuteilung der Abfälle auf die beiden Lagertypen SMA und HAA vorgenommen werden soll (vgl. Tab. 2.2-3 und 2.2-5). Dabei sind die in Tab. 2.2-3 aufgeführten Abfalleigenschaften zu berücksichtigen. Das gewählte Vorgehen und die vorgeschlagene Abfallzuteilung sind in Kap. 3 detailliert dokumentiert.

Abgestimmt auf die gewählte Abfallzuteilung sind das Barrieren- und Sicherheitskonzept für das SMA- und das HAA-Lager festzulegen und zu erläutern (s. Tab. 2.2-4 und 2.2-5). Das Barrierenkonzept beschreibt die funktionale Beschaffenheit der verschiedenen technischen und geologischen Barrieren des Tiefenlagers, während das Sicherheitskonzept aufzeigt, wie die verschiedenen Barrieren zur Sicherheit des Gesamtsystems beitragen. Dies schliesst eine vorgängige qualitative Festlegung der erwünschten Beiträge der Elemente des Barrierensystems mit ein. Dabei sollen sowohl die technischen Barrieren als auch die geologischen Barrieren in signifikantem Masse zur Barrierenwirkung des Gesamtsystems beitragen. Die Festlegung des Barrieren- und Sicherheitskonzepts sowie die erwarteten Beiträge der Elemente des Barrierensystems sind Gegenstand von Kap. 4.

Tab. 2.2-3: Vorgaben zu Schritt 1 im SGT.

Aus Anhang I, Kap. 1.1.1 des SGT – Abfallzuteilung auf die beiden Lagertypen SMA und HAA (BFE 2008).

Das Konzept der Entsorgungspflichtigen geht von zwei Lagern aus: eines für die hochaktiven Abfälle (HAA-Lager) und eines für die schwach- und mittelaktiven Abfälle (SMA-Lager). Es sind grundsätzlich verschiedene Möglichkeiten denkbar, die Abfallkategorien nach KEV (HAA, ATA und SMA) auf die beiden Lagertypen aufzuteilen. Es obliegt den Entsorgungspflichtigen, geeignete Lösungen vorzuschlagen, die durch die Behörden geprüft werden.

Als ersten Schritt in Etappe 1 müssen die Entsorgungspflichtigen die Abfälle den beiden Lagertypen SMA und HAA zuteilen. Für die Zuteilung sind in erster Linie folgende Abfalleigenschaften massgebend:

- Inventar und Halbwertszeiten der Radionuklide
- Auswahl der sicherheitstechnisch relevanten Nuklide (Wertung der radiologischen Toxizität)
- Abfallvolumen
- Materialeigenschaften (Abfallmatrix, -behälter) und ihre möglichen Auswirkungen auf das Wirtgestein
- Wärmeentwicklung
- Gehalt an potenziell Gas produzierenden Bestandteilen (Metalle, Organika)
- Gehalt an Komplexbildnern

Anhand von generischen (orientierenden) Sicherheitsbetrachtungen und Überlegungen zur technischen Machbarkeit sind anschliessend die quantitativen und qualitativen Anforderungen an die geologische Barriere darzulegen und die Anforderungen und Vorgaben so weit als möglich zu quantifizieren. Nach Tab. 2.2-4 und 2.2-5 schliesst dies mit ein:

- Quantitative Anforderungen an das Wirtgestein und die Geosphäre: Betrachtungszeitraum, Grösse und Platzbedarf des Lagers
- Quantitative Zielvorgaben für ausgewählte Indikatoren einzelner Kriterien: 'Tiefenlage', 'Mächtigkeit' und 'Laterale Ausdehnung' (dabei handelt es sich um drei Indikatoren des Kriteriums 1.1), 'Hydraulische Durchlässigkeit' des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (Indikator des Kriteriums 1.2)
- Qualitative Bewertungsskalen (mit den Attributen *sehr günstig, günstig, bedingt günstig, ungünstig*) für alle anderen Kriterien zur Sicherheit und bautechnischen Machbarkeit

Zusätzlich zu den im SGT geforderten quantitativen Zielvorgaben werden an eine beschränkte Anzahl weiterer Indikatoren Mindestanforderungen gestellt. Diese Indikatoren betreffen für die Sicherheit und Machbarkeit ebenfalls sehr wichtige Merkmale. Alle Anforderungen an und Vorgaben für die Geologie werden in Kap. 5 zusammengefasst und in Anhang 1 erläutert.

Tab. 2.2-4: Vorgaben zu Schritt 2 im SGT.

Aus Anhang I, Kap. 1.1.2 des SGT – Festlegung des Sicherheitskonzepts und der kriterienbezogenen quantitativen und qualitativen Anforderungen und Vorgaben (BFE 2008).

Basierend auf dem zugeteilten Abfallinventar müssen die Entsorgungspflichtigen das Sicherheitskonzept für die beiden Lagertypen SMA und HAA beschreiben, anhand von generischen (orientierenden) Sicherheitsbetrachtungen (…) die quantitativen und qualitativen Anforderungen sowie die Zielvorgaben an die geologische Barriere darlegen und die sicherheitstechnischen Kriterien gemäss Tabelle 1 des Sachplans so weit möglich quantifizieren. Dazu haben die Entsorgungspflichtigen für die beiden Lagertypen folgende Vorgaben festzulegen und zu erläutern:

- Barrieren- und Sicherheitskonzept des Lagers
- Erwartete Beiträge der verschiedenen Elemente des Barrierensystems zur Sicherheit des gesamten Lagers
- Quantitative Anforderungen an das Wirtgestein und die Geosphäre bezüglich des zu betrachtenden Zeitraums, der Grösse und des Platzbedarfs des Lagers
- Quantitative Zielvorgaben bezüglich Tiefenlage, Mächtigkeit, laterale Ausdehnung und hydraulische Durchlässigkeit des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs

Qualitative Bewertungsskala (z.B. *sehr günstig*/*günstig*/*bedingt günstig*/*ungünstig*) für die Anwendung der weiteren Kriterien zur Sicherheit und bautechnischen Machbarkeit (vgl. Tabelle 1 des Sachplans). Der Bewertungsmassstab wird in Bezug auf die Ergebnisse der generischen Sicherheitsbetrachtungen sowie gestützt auf Erfahrungswerte für die betreffende Eigenschaft erläutert. Neben der qualitativen Bewertungsskala ist auch das Vorgehen bei der zusammenfassenden Bewertung zu beschreiben. Die zusammenfassende Bewertung der Standortgebiete ist auf einer entsprechenden qualitativen Bewertungsskala der Eignung (das heisst: *sehr geeignet*/*geeignet*/*bedingt geeignet*/*weniger geeignet*) darzustellen.

Tab. 2.2-5: Zusammenfassung der Vorgaben zu den Schritten 1 und 2 im SGT.

Aus Anhang I, Kap. 1.1.5, Tabelle A1-14 des SGT (BFE 2008; Layout geringfügig modifiziert).

Schritt	Vorgaben für das Einengungsverfahren	Relevante Grössen/Eigenschaften
1. Abfallzuteilung auf die beiden Lagertypen SMA und HAA	- Abfallzuteilung auf die beiden Lagertypen SMA und HAA	Abfallvolumen, Nuklidinventar, Toxizität, chemische und physikalische Eigenschaften
2. Festlegung des Sicherheitskonzepts und der kriterienbezogenen quantitativen und qualitativen Anforderungen und Vorgaben für die Standortevaluation	- Festlegung des Barrieren- und Sicherheitskonzeptes - Erwartete Beiträge der verschiedenen Elemente des Barrierensystems zur Sicherheit - Quantitative Anforderungen und Zielvorgaben an das Wirtgestein und die Geosphäre - Qualitative Bewertungsskala für die weiteren Kriterien zu Sicherheit und technischer Machbarkeit	Ausgestaltung der technischen Barrieren, Auslegung der Lagerstollen bzw. -kavernen Resultate der generischen Sicherheitsbetrachtungen Quantifizierung von: - Betrachtungszeitraum - Grösse und Platzbedarf des Lagers - Tiefenlage, Mächtigkeit, laterale Ausdehnung und hydraulische Durchlässigkeit des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs

Die detaillierten Vorgaben zu den Schritten 3 bis 5 gemäss SGT, in denen die eigentliche Einengung von Grossräumen über Wirtgesteine zu geeigneten Konfigurationen erfolgt, sind in Nagra (2008b) aufgeführt; sie werden hier nicht wiederholt, da der Schwerpunkt des vorliegenden Berichts auf den Schritten 1 und 2 liegt. Die Vorgaben zu den Schritten 3 bis 5 gemäss SGT definieren die Zuordnung der Kriterien und Indikatoren zu den drei Einengungsschritten und liefern den Kontext für die Festlegung der Anforderungen an die standortbezogenen geologischen Verhältnisse. Aus diesem Grund sind diese Vorgaben auch für den vorliegenden Bericht relevant und werden bei der Ableitung von Anforderungen und Vorgaben für die Standortevaluation berücksichtigt.

2.3 Weitere Vorgaben und Prinzipien bezüglich Barrieren- und Sicherheitskonzept sowie Standortwahl und Lagerauslegung

2.3.1 Übersicht

Gemäss SGT hat die Sicherheit höchste Priorität bei der Auswahl von geologischen Standortgebieten für SMA- und HAA-Lager. Oberstes Ziel bei der Entsorgung radioaktiver Abfälle ist der langfristige Schutz von Mensch und Umwelt. Weltweit herrscht ein breiter Konsens, dass für die Entsorgung von abgebrannten Brennelementen, hochaktiven und langlebigen mittelaktiven Abfällen nur die geologische Tiefenlagerung in stabilen, einschlusswirksamen Gebirgsbereichen die Sicherheit über die erforderlichen Zeiträume gewährleisten kann. Dieser Grundsatz ist im Kernenergiegesetz (KEG 2003) verankert und gilt in der Schweiz für alle Kategorien von radioaktiven Abfällen, einschliesslich der schwach- und mittelaktiven Abfälle.

Die bei der Entsorgung radioaktiver Abfälle in der Schweiz zu beachtenden Prinzipien und Vorgaben werden in den folgenden Kapiteln diskutiert. Dabei handelt es sich insbesondere um die gesetzlichen Grundlagen im Kernenergiegesetz (KEG 2003), in der Kernenergieverordnung (KEV 2004) und in der Richtlinie HSK-R-21 (HSK & KSA 1993)[9].

Weitere Prinzipien bzgl. des Gesamtsystems, der Standortwahl und der Lagerauslegung sind in Nagra (2002c) zusammengestellt. Allen diesen Prinzipien ist gemeinsam, dass sie dem Zweck dienen, die übergeordneten Zielsetzungen der Sicherheit und Robustheit des Systems zu erfüllen, sowie die Wahrscheinlichkeit und die Auswirkungen eines menschlichen Eindringens in das geologische Tiefenlager zu verringern.

2.3.2 Anforderungen gemäss Kernenergiegesetz

Das KEG (2003) enthält die folgenden Anforderungen bzgl. Standortwahl und Auslegung eines geologischen Tiefenlagers in der Schweiz:

- Alle radioaktiven Abfälle sind in geologischen Tiefenlagern zu entsorgen (Art. 31).
- Der dauernde Schutz von Mensch und Umwelt muss durch passive Barrieren sichergestellt werden (Art. 1, 3, 13, 16, 20 und 30).
- Nach Abschluss der Einlagerung der radioaktiven Abfälle muss das Tiefenlager während eines längeren Zeitraums überwacht werden, bevor es verschlossen wird (Art. 3 und 39).
- Die Rückholbarkeit der Abfälle bis zu einem allfälligen Verschluss muss ohne grossen Aufwand möglich sein (Art. 37).
- Zur Gewährleistung der Sicherheit sind alle Vorkehrungen zu treffen, die nach der Erfahrung und dem Stand von Wissenschaft und Technik notwendig sind (Art. 4). Dies umfasst auch Schutzmassnahmen nach international anerkannten Grundsätzen, insbesondere den Einsatz gestaffelter Sicherheitsbarrieren sowie Sicherungsmassnahmen gegen unbefugtes Einwirken und gegen die Entwendung von Abfällen (Art. 5).

2.3.3 Anforderungen gemäss Kernenergieverordnung

Gestützt auf das KEG (2003) sind in der Kernenergieverordnung (KEV 2004) im Hinblick auf die Standortwahl und die Auslegung geologischer Tiefenlager die folgenden Anforderungen festgehalten:

- Der Standort für ein geologisches Tiefenlager muss zur Gewährleistung der Langzeitsicherheit folgende Eigenschaften aufweisen (Art. 11):
  - ausreichende Ausdehnung von geeignetem Wirtgestein
  - günstige hydrogeologische Verhältnisse
  - geologische Langzeitstabilität
- Ein geologisches Tiefenlager ist so auszulegen (Art. 10 und 11), dass
  - die Langzeitsicherheit durch gestaffelte passive Sicherheitsbarrieren gewährleistet wird,
  - die Sicherheitsfunktionen nach den Grundsätzen der Redundanz und der Diversität erfolgen,

---

[9] Eine neue Richtlinie (G03) ist gegenwärtig in Bearbeitung (HSK 2008a) und wird die Richtlinie HSK-R-21 ersetzen.

  - Vorkehrungen zur Erleichterung von Überwachung und Reparaturen des Lagers oder zur Rückholung der Abfälle die passiven Sicherheitsbarrieren nach dem Verschluss nicht beeinträchtigen und
  - das Lager innert einiger Jahre verschlossen werden kann.
- Ein geologisches Tiefenlager besteht aus den folgenden drei Elementen (Art. 64, 65 und 66):
  - dem Hauptlager zur Aufnahme der radioaktiven Abfälle,
  - dem Pilotlager, in welchem das Verhalten der Abfälle, der technischen Barrieren und des Wirtgesteins bis zum Ablauf der Beobachtungsphase überwacht wird, und
  - verschiedenen Testbereichen, in welchen die sicherheitsrelevanten Eigenschaften des Wirtgesteins zur Erhärtung des Sicherheitsnachweises vertieft abzuklären sind.
- Nach Einlagerung der Abfallgebinde sind die Lagerkavernen und -stollen so zu verfüllen, dass die Langzeitsicherheit gewährleistet und eine Rückholung der Abfälle ohne grossen Aufwand möglich ist (Art. 67). Vor dem Verschluss des geologischen Tiefenlagers ist eine Beobachtungsphase mit geeigneten Massnahmen zur Überwachung des Tiefenlagers vorzusehen (Art. 68).
- Beim Verschluss hat der Eigentümer des geologischen Tiefenlagers sämtliche noch offenen Teile des Lagers zu verfüllen und die für die Langzeitsicherheit massgebenden Teile zu versiegeln (Art. 69). Insbesondere hat er zu gewährleisten, dass
  - keine unzulässige Freisetzung von Radionukliden über die verfüllten Zugänge erfolgt,
  - die vor der Errichtung des Tiefenlagers bestehende Trennung der wasserführenden Gesteinsschichten langfristig wieder hergestellt wird, und
  - die Markierung des geologischen Tiefenlagers dauerhaft ist.

2.3.4 Anforderungen gemäss Richtlinie HSK-R-21 bzw. G03

Neben den in Kap. 2.3.2 und 2.3.3 aufgelisteten Anforderungen der Kernenergiegesetzgebung muss ein geologisches Tiefenlager auch die quantitativen Schutzziele der Richtlinie HSK-R-21 (HSK & KSA 1993) erfüllen (vgl. Tab. 2.3-1). Eine neue Richtlinie (G03) mit spezifischen Auslegungsgrundsätzen für geologische Tiefenlager ist gegenwärtig in Bearbeitung (HSK 2008a) und wird die Richtlinie HSK-R-21 ersetzen.

Der in Schutzziel 1 festgelegte Dosis-Grenzwert von 0.1 mSv/a ist vergleichsweise tief angesetzt; er

- liegt deutlich unter der durchschnittlichen Dosis der Bevölkerung infolge kosmischer und terrestrischer Strahlung sowie Strahlung aus Radon und seiner Zerfallsprodukte in Wohnräumen von 2.8 mSv/a in der Schweiz (KSR 2005);
- beträgt lediglich ein Zehntel des gemäss Strahlenschutzverordnung festgelegten Grenzwerts von 1 mSv/a für nichtberuflich strahlenexponierte Personen (StSV 1994);
- entspricht einem Drittel des international empfohlenen Richtwerts von 0.3 mSv/a (IAEA 2006).

Das in Schutzziel 2 begrenzte, radiologische Todesfallrisiko von 10^{-6} pro Jahr liegt ebenfalls deutlich unter dem international empfohlenen Risiko-Richtwert von 10^{-5} pro Jahr (IAEA 2006).

Das Schutzziel 3 legt die Anforderungen bzgl. des Verschlusses des geologischen Tiefenlagers fest; es enthält die in Art. 11 der Kernenergieverordnung festgehaltene Bestimmung bzgl. des raschen Verschlusses des Lagers (vgl. Kap. 2.3.3).

Tab. 2.3-1: Schutzziele der Richtlinie HSK-R-21.

Zitat aus HSK & KSA (1993).

Die Schutzziele 1 und 2 der Richtlinie HSK-R-21 entsprechen den Schutzkriterien 1 und 2 der neuen Richtlinie G03 (HSK 2008a); das Schutzziel 3 der HSK-R-21 wurde sinngemäss in die Kernenergieverordnung (KEV 2004) übernommen.

Schutzziel 1 *Die Freisetzung von Radionukliden aus einem verschlossenen Endlager infolge realistischerweise anzunehmender Vorgänge und Ereignisse soll zu keiner Zeit zu jährlichen Individualdosen führen, die 0.1 mSv übersteigen.*
Schutzziel 2 *Das aus einem verschlossenen Endlager infolge unwahrscheinlicher, unter Schutzziel 1 nicht berücksichtigter Vorgänge und Ereignisse zu erwartende radiologische Todesfallrisiko für eine Einzelperson soll zu keiner Zeit ein Millionstel pro Jahr übersteigen.*
Schutzziel 3 *Nach dem Verschluss eines Endlagers sollen keine weiteren Massnahmen zur Gewährleistung der Sicherheit erforderlich sein. Das Endlager soll innert einiger Jahre verschlossen werden können.*

Weitere Bestimmungen in HSK & KSA (1993) betreffen die Standortwahl und die Auslegung des geologischen Tiefenlagers:

- Eine geeignete Standortwahl ist eine wesentliche Voraussetzung dafür, dass für ein geologisches Tiefenlager die Sicherheit erreicht und der entsprechende Nachweis erbracht werden kann.
- Hinsichtlich der Langzeitsicherheit sind die Anforderungen an die Standort- und Wirtgesteinseigenschaften aus der Art der einzulagernden Abfälle abzuleiten.
- Im Hinblick auf den Sicherheitsnachweis sind räumlich und zeitlich gut prognostizierbare Verhältnisse zu bevorzugen.
- Die Sicherheitsanalyse für ein Rahmenbewilligungsgesuch hat sich auf die Ergebnisse einer ausführlichen Standorterkundung abzustützen. Der Umfang der Erkundung richtet sich nach der Prognostizierbarkeit der geologischen Eigenschaften des Standorts. Dabei ist jedoch darauf zu achten, dass die Qualität des Standorts durch die Erkundungstätigkeiten nicht signifikant beeinträchtigt wird.
- Bei der Tiefenlagerung hochaktiver Abfälle ist während der anfänglichen Phase (bis etwa 1000 Jahre) ein besonders hohes Gefährdungspotenzial vorhanden. Während dieser Phase ist ein vollständiger Einschluss der Radionuklide im Tiefenlager anzustreben.
- Auch wenn die in den Schutzzielen 1 und 2 festgelegten Limiten eingehalten werden, sind die radiologischen Auswirkungen aus dem Endlager mit geeigneten Massnahmen so weit zu reduzieren, als dies nach dem Stand von Wissenschaft und Technik möglich und zumutbar ist.

Zur Behandlung von langen Zeiten in der Sicherheitsanalyse enthält die neue Richtlinie G03 (HSK 2008a) detailliertere Anweisungen:

"Für den Nachweiszeitraum ist die zeitliche Entwicklung des radiologischen Gefährdungspotenzials der eingelagerten Abfälle massgebend. Für einen Zeitraum bis zu einer Million Jahren[10] ist im Rahmen des Sicherheitsnachweises zur Bewertung des geforderten Schutzes die Einhaltung der Schutzkriterien nachzuweisen. Für spätere Zeiten ist der Variationsbereich der von einem geologischen Tiefenlager ausgehenden möglichen regionalen radiologischen Auswirkungen unter Berücksichtigung der inhärent vorhandenen Ungewissheiten zu ermitteln und mit natürlichen radiologischen Umweltrisiken zu vergleichen. Szenarien, in denen der Tiefenlagerbereich aufgrund geologischer Vorgänge zunehmend Einflüssen der Erdoberfläche ausgesetzt wird, sind in diese Betrachtungen einzubeziehen."

2.3.5 Weitere Prinzipien

Die übergeordneten Zielsetzungen und Prinzipien, die bei der geologischen Tiefenlagerung einzuhalten sind, wurden im Rahmen des Projekts Entsorgungsnachweis/Opalinuston ausführlich diskutiert (Kap. 2.6 in Nagra 2002c). Dabei handelt es sich um:

- Zielsetzungen der geologischen Tiefenlagerung und zugeordnete Prinzipien
- systemorientierte Zielsetzungen und zugeordnete Prinzipien
- Zielsetzungen zur schrittweisen Implementierung und zugeordnete Prinzipien
- Prinzipien zum Sicherheitsnachweis

Für die Standortevaluation und die Auslegung des geologischen Tiefenlagers sind primär die Zielsetzungen der geologischen Tiefenlagerung und die systemorientierten Zielsetzungen sowie deren zugeordnete Prinzipien relevant (vgl. Tab. 2.3-2). Allen hier aufgeführten Prinzipien ist gemeinsam, dass sie dem Zweck dienen, die übergeordneten Zielsetzungen der Sicherheit und Robustheit des Systems zu erfüllen, sowie die Wahrscheinlichkeit und die Auswirkungen eines menschlichen Eindringens in das geologische Tiefenlager zu verringern. Die Prinzipien werden entsprechend ihrer Relevanz für die Sicherheit und Standortevaluation in drei Klassen eingeteilt:

- Rot markierte Prinzipien sind Grundanforderungen an das Sicherheitskonzept (vgl. Kap. 4) und müssen in allen geologischen Standortgebieten gleichermassen erfüllt werden. Sie diskriminieren nicht zwischen verschiedenen Standortgebieten und werden deshalb nicht für die Einengung in Etappe 1 des Standortevaluationsverfahrens berücksichtigt.
- Gelb markierte Prinzipien finden Eingang in die Sicherheitsfunktionen (vgl. Kap. 4) und spielen dadurch im Einengungsverfahren in Etappe 1 eine wichtige Rolle (vgl. Kap. 5).
- Grün markierte Prinzipien sind unabhängig von den Sicherheitsfunktionen; sie sind aber für das Einengungsverfahren in Etappe 1 ebenfalls relevant und werden separat berücksichtigt (vgl. folgende Diskussion).

---

[10] Im Erläuterungsbericht zur Richtlinie G03 hält die HSK fest (HSK 2008b): "Der Zeitraum, für den im Sicherheitsnachweis die Einhaltung der Schutzkriterien quantitativ aufzuzeigen ist, richtet sich nach dem radiologischen Gefährdungspotential der Abfälle. Der geforderte maximale Nachweiszeitraum von einer Million Jahren ist abgeleitet vom zeitlichen Verlauf des radiologischen Gefährdungspotentials der eingelagerten abgebrannten Brennelemente und von den Zeiträumen (bis zu einigen Millionen Jahren), in denen belastbare Aussagen zur geologischen Langzeitentwicklung in der Schweiz möglich sind. Bei den Sicherheitsbetrachtungen gibt es jedoch keinen scharfen zeitlichen Endpunkt. Die Sicherheitsbetrachtungen beruhen auf dem für den Sicherheitsnachweis vorgesehenen Nachweiszeitraum (quantitative Schutzkriterien) und für spätere Zeiten auf den zusätzlichen notwendigen Abklärungen zu den regionalen radiologischen Auswirkungen eines Tiefenlagers.

Falls gezeigt werden kann, dass durch das geologische Tiefenlager aufgrund des radiologischen Gefährdungspotentials der Abfälle bereits nach weniger als einer Million Jahren nur noch vernachlässigbar kleine radiologische Auswirkungen für Mensch und Umwelt zu erwarten sind, kann der Nachweis auch für kürzere Zeiträume geführt werden."

Tab. 2.3-2: Prinzipien bzgl. Standortevaluation und Lagerauslegung.

Auszug aus Tab. 2.6-1 in Nagra (2002c), übersetzt aus dem Englischen.

Rot markierte Prinzipien sind Grundanforderungen an das Sicherheitskonzept (vgl. Kap. 4) und müssen in allen geologischen Standortgebieten gleichermassen erfüllt werden. Sie diskriminieren nicht zwischen verschiedenen Standortgebieten und werden deshalb nicht für die Einengung in Etappe 1 des Standortevaluationsverfahrens berücksichtigt.

Gelb markierte Prinzipien finden Eingang in die Sicherheitsfunktionen (vgl. Kap. 4) und spielen dadurch im Einengungsverfahren in Etappe 1 eine wichtige Rolle (vgl. Kap. 5).

Grün markierte Prinzipien sind unabhängig von den Sicherheitsfunktionen; sie sind aber für das Einengungsverfahren in Etappe 1 ebenfalls relevant und werden separat berücksichtigt (vgl. Kap. 5).

Zielsetzung	**Übergeordnete Prinzipien**	
Zielsetzung der geologischen Tiefenlagerung	Passive Sicherheit und Sicherung durch geologische Tiefenlagerung	
Systemorientierte Zielsetzung	**Prinzipien bzgl. Standortevaluation**	**Prinzipien bzgl. Lagerauslegung**
Sicherheit und Robustheit	Mehrfache, passive Sicherheits-barrieren	Mehrfache, passive Sicherheitsbarrieren
	Mehrfache Sicherheitsfunktionen, die durch die Elemente des Barrierensystems gewährleistet werden	Mehrfache Sicherheitsfunktionen, die durch die Elemente des Barrierensystems gewährleistet werden
	Stabilität und Langlebigkeit des Barrierensystems	Stabilität und Langlebigkeit des Barrierensystems
	Vermeidung von bzw. Unempfindlichkeit gegenüber Störeinflüssen	Vermeidung von bzw. Unempfindlichkeit gegenüber Störeinflüssen
	Prognostizierbarkeit von Langzeitveränderungen	Prognostizierbarkeit von Langzeitveränderungen
	Stabilität der geologischen Situation	Rückhaltung und Konzentrationsverminderung
	Günstige Wirtgesteins-Eigenschaften	Einschluss
	Explorierbarkeit	Redundanz
	Charakterisierbarkeit[1]	Zuverlässigkeit der Implementierung
		Sicherheit während des Betriebs[1]
		Zuverlässigkeit des Lagerverschlusses
Reduzierte Wahrscheinlichkeit und Auswirkungen eines menschlichen Eindringens	Archivierung von Informationen über das Tiefenlager	Archivierung von Informationen über das Tiefenlager
	Vermeidung von Rohstoffkonflikten	Kompartimentierung und Abfallverfestigung

[1)] Diese Prinzipien stammen nicht aus Nagra (2002c), sondern werden hier zusätzlich eingeführt, um einerseits zwischen der Charakterisierung der Gesteinseigenschaften (Charakterisierbarkeit) und deren erdwissenschaftlicher Erkundung (Explorierbarkeit) zu unterscheiden sowie andererseits Aspekte der Betriebssicherheit zu berücksichtigen.

Die Zielsetzungen/Prinzipien zur schrittweisen Implementierung und die Prinzipien zum Sicherheitsnachweis sind im Kontext der Standortevaluation nur von untergeordneter Bedeutung und werden hier nicht weiter diskutiert.

Die in Tab. 2.3-2 grün markierten Prinzipien betreffen die zuverlässige Erstellung der geologischen Tiefenlager und die Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen:

Zuverlässige Erstellung der geologischen Tiefenlager

Diese Gruppe von Prinzipien umfasst die *Zuverlässigkeit der Implementierung*, die *Sicherheit während des Betriebs* und die *Zuverlässigkeit des Lagerverschlusses*. Diese Prinzipien stellen sicher, dass das Tiefenlager entsprechend den Anforderungen bzgl. Betriebs- und Langzeitsicherheit zuverlässig erstellt, betrieben und verschlossen wird. Auch diese Prinzipien liefern indirekt einen wesentlichen Beitrag zur Langzeitsicherheit des Tiefenlagers.

Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen

Diese Gruppe von Prinzipien umfasst die *Charakterisierbarkeit* der Gesteine, die *Explorierbarkeit* der geometrischen Verhältnisse (inkl. Erfassung der Zustandsparameter) und die *Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen*. Der Begriff *Charakterisierbarkeit* bezieht sich auf die Eigenschaften des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs, während der Begriff *Explorierbarkeit* zusätzlich die geometrischen Verhältnisse und die Zustandsparameter beschreibt in Hinblick auf die Zuverlässigkeit der erdwissenschaftlichen Aussagen. Die *Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen* betrifft die Zuverlässigkeit der Aussagen über die zeitliche Entwicklung des Tiefenlagers innerhalb des Betrachtungszeitraums. Der Nachweis der Langzeitsicherheit hängt entscheidend von einer genügenden Zuverlässigkeit der dabei verwendeten geologischen Aussagen ab.

2.3.6 Umsetzung der Prinzipien, Grundsätze und Anforderungen im Barrieren- und Sicherheitskonzept

Die konzeptuelle Umsetzung der in Kap. 2.3.2 bis 2.3.5 erläuterten Prinzipien, Grundsätze und gesetzlichen Anforderungen erfolgt im Barrieren- und Sicherheitskonzept.

Das Barrierenkonzept beschreibt die funktionale Beschaffenheit der verschiedenen technischen und geologischen Barrieren des Tiefenlagers. Je nach Art der einzulagernden Abfälle sind die Anforderungen an die Sicherheitsfunktionen, welche durch die verschiedenen Elemente des Barrierensystems gewährleistet werden, unterschiedlich. Diese Unterschiede betreffen insbesondere die Anforderung an den Einschluss der Abfälle während der anfänglichen Phase (z.B. vollständiger Einschluss der HAA für mindestens 1000 Jahre) und die Anforderungen an die Langzeitstabilität des Lagersystems (Isolation der Abfälle vom Lebensraum des Menschen während des Betrachtungszeitraums). Dementsprechend wird das Barrierenkonzept auf die Art der einzulagernden Abfälle abgestimmt.

Das Sicherheitskonzept zeigt auf, wie die verschiedenen technischen und geologischen Barrieren zur Sicherheit des Gesamtsystems beitragen; es legt somit dar, wie das geologische Tiefenlager den Schutz des Menschen und der Umwelt gewährleistet.

Die Grundzüge des Barrieren- und Sicherheitskonzepts sind im Rahmen früherer Projekte des Schweizerischen Entsorgungsprogrammes – Projekte Gewähr (Nagra 1985), SMA/Wellenberg (Nagra 1994b), Kristallin-I (Nagra 1994a) und Entsorgungsnachweis (Nagra 2002c) – festgelegt

und laufend verfeinert worden; die in den Sicherheitsanalysen zu den Projekten Wellenberg, Kristallin-I und Entsorgungsnachweis gemachten Erfahrungen werden in Kap. 2.4 ausführlich beschrieben. Gemäss SGT ist das Barrieren- und Sicherheitskonzept erst *nach* der Abfallzuteilung definitiv festzulegen, als Bestandteil des Schritts 2 des Einengungsverfahrens (vgl. Tab. 2.2-4). Dementsprechend erfolgt die definitive Festlegung des Barrieren- und Sicherheitskonzepts in Kap. 4 des vorliegenden Berichts. Dies ist als Resultat eines iterativen Prozesses zu verstehen, in dessen Verlauf das Barrieren- und Sicherheitskonzept die Abfallzuteilung mitbestimmt und umgekehrt das Barrieren- und Sicherheitskonzept auf die Abfallzuteilung abgestimmt wird.

2.4 Bisherige Erfahrungen bei der Planung von Lagerprojekten

2.4.1 Einleitung

In der Schweiz ist zwar noch kein geologisches Tiefenlager in Betrieb, aber es besteht eine gute technisch-wissenschaftliche Basis, und es sind breite Erfahrungen für die Erarbeitung der Lagerprojekte und der zugehörigen Grundlagen vorhanden. Sowohl für SMA als auch für HAA wurden auf die Standorteigenschaften und die Abfalleigenschaften abgestimmte Lagerkonzepte entwickelt, welche die notwendige Sicherheit gewährleisten; vgl. dazu die verschiedenen Meilensteinberichte (Nagra 1985, Nagra 1993b, Nagra 1994a-b, Nagra 1997, Nagra 1998, Nagra 2002a-e, GNW 1994, GNW 2000), die von den Behörden und ihren Experten beurteilt wurden (HSK 1986, HSK 1996, HSK 2000, HSK 2004, NEA 2004a, HSK 2005, KNE 2005, KSA 2005). Dazu gehört insbesondere auch der von den Behörden als erbracht beurteilte Entsorgungsnachweis für SMA und für HAA.

Heute sind somit die technisch-wissenschaftlichen Grundlagen für die Wahl von Standortgebieten für ein geologisches Tiefenlager für SMA bzw. HAA vorhanden. Basierend auf der Erfahrung, die bei den oben erwähnten Arbeiten gesammelt wurde, werden im folgenden Kapitel die wichtigsten Erkenntnisse aus bisherigen Sicherheitsanalysen für geologische Tiefenlager SMA und HAA zusammengestellt.

2.4.2 Erkenntnisse aus bisherigen Sicherheitsanalysen

In diesem Teilkapitel werden Erkenntnisse aus früher durchgeführten Sicherheitsanalysen zusammengestellt. Für SMA-Lager wird als Referenzprojekt das Wellenberg-Projekt verwendet; für HAA-Lager die Projekte Entsorgungsnachweis und Kristallin-I.

2.4.2.1 SMA-Lager (Projekt Wellenberg)

Im vorliegenden Kapitel werden die Erkenntnisse aus der Sicherheitsanalyse zum Rahmenbewilligungsgesuch für ein SMA-Lager am Standort Wellenberg (Nagra 1994b) sowie aus weiteren Dokumenten (Nagra 1997, Nagra 1998, Nagra 2001, GNW 2000, HSK 1996, HSK 2000) zusammengefasst[11]. Im Rahmen dieses Projekts wurde die bisher umfassendste Sicherheitsanalyse für ein SMA-Lager in der Schweiz durchgeführt. In diese Analyse flossen auch die Erkenntnisse aus früheren sicherheitstechnischen Untersuchungen für ein SMA-Lager (Nagra 1993b, Nagra 1985) und für Projekt Gewähr (Nagra 1985) die entsprechende behördliche Stellungnahme (HSK 1986) ein. Im vorliegenden Kapitel dient das Projekt Wellenberg deshalb als Referenzprojekt für alle bisher durchgeführten sicherheitstechnischen Untersuchungen für ein SMA-Lager in der Schweiz.

[11] Im Folgenden mit *Projekt Wellenberg* abgekürzt.

Im Rahmen des Projekts Wellenberg wurde eine vereinfachte Szenarienanalyse mit dem Ziel durchgeführt, mögliche zukünftige Entwicklungen des SMA-Lagers und die sich daraus ergebenden Vorgänge und Ereignisse (FEP[12]), die in der Sicherheitsanalyse zu berücksichtigen sind, zu identifizieren. Aus der Szenarienanalyse wurde eine strukturierte Liste von zu betrachtenden Rechenfällen abgeleitet, mit dem Zweck, vorhandene Ungewissheiten bzgl. der Lagerentwicklung sowie deren modellhafter Umsetzung abzudecken (vgl. Tab. 2.4-1).

Tab. 2.4-1: Maxima der im Projekt Wellenberg für ein SMA-Lager berechneten Gesamtdosen für die Rechenfälle des Referenz-Szenariums, der alternativen Szenarien und des robusten Ansatzes.

Entspricht Tab. 7.1-1 in Nagra (1994b).

Rechenfall	**Gesamtdosis** [mSv/a]
Referenz-Szenarium	
Referenz-Modellansatz (Referenzfall)	1.8×10^{-3}
Alternative Modellansätze	
Kalkbankabfolgen	1.8×10^{-3}
Gasinduzierte Freisetzung aus dem Nahfeld	5.2×10^{-3}
Kolloide (Nahfeld und Geosphäre)[1]	1.8×10^{-3}
Erhöhung der Wirtgesteins-Durchlässigkeit infolge frühzeitiger Erosion	1.8×10^{-3}
Exfiltrationsort	
Secklis Bach	8.8×10^{-2}
Altzellen	6.1×10^{-2}
Alternative Szenarien	
Freisetzung entlang Verbindungsstollen	1.8×10^{-3}
Erosive Freilegung des Endlagers	6.9×10^{-4}
Menschliche Tätigkeiten im untertägigen Endlagerbereich[2]	–
Freisetzung flüchtiger Nuklide über den Gaspfad	8.0×10^{-2}
Robuster Ansatz	6.1×10^{-2}

1) Die Untersuchungen zeigten, dass mit dem Referenz-Modellansatz auch die Effekte von Kolloiden (mit reversibler Radionuklidsorption) im Nahfeld und in der Geosphäre abgedeckt werden.

2) Menschliche Tätigkeiten im untertägigen Endlagerbereich werden nicht erwartet; wird trotzdem ein Anbohren postuliert, ergeben sich für das mit den Bohrarbeiten betraute Personal Dosen unter 0.1 mSv.

Das Referenz-Szenarium, welches die mutmassliche Entwicklung des Lagersystems beschreibt, basiert auf der Grundannahme einer Freisetzung von gelösten Radionukliden mit dem Tiefengrundwasser. Zur Quantifizierung von Ungewissheiten bzgl. der komplexen Wechselwirkungen zwischen den FEPs, welche im Referenz-Szenarium zu berücksichtigen sind, wurden verschiedene Modellansätze identifiziert, von denen einer als Referenz-Modellansatz (realistisch-konservative Modellierung der relevanten FEPs) und die anderen als alternative Modellansätze

12 FEP ist die englische Abkürzung für *Feature, Event or Process*.

(alternative Modellierung relevanter FEPs zur Quantifizierung des Einflusses von Kalkbankabfolgen, Gasfreisetzung, Nahfeld- und Geosphärenkolloide, Erosion und alternativen Exfiltrationsorten) bezeichnet wurden. Der Referenzfall basiert auf einer Kombination des Referenz-Modellansatzes mit dem Referenz-Datensatz.

Neben dem Referenz-Szenarium wurden auch alternative Szenarien zur Radionuklidfreisetzung entlang des Verbindungsstollens, zur erosiven Freilegung des Lagers[13], zu den Auswirkungen von menschlichen Tätigkeiten und zur Radionuklidfreisetzung über den Gaspfad untersucht. Im Rahmen eines sogenannten robusten Ansatzes wurde das Verhalten des Lagersystems unter hypothetischen, abdeckenden Modellannahmen bzgl. der Geosphärentransportbarriere beschrieben.

Die Resultate der Sicherheitsanalyse im Projekt Wellenberg weisen eine genügende Sicherheit gemäss der behördlichen Richtlinie HSK-R-21 (HSK & KSA 1993) auf, auch ohne dass das Barrierenpotenzial des Standorts Wellenberg in den Analysen vollständig ausgenutzt wurde. Die Berücksichtigung der im Projekt Wellenberg ausgewiesenen Ungewissheiten bzgl. des Verhaltens des Tiefenlagers und der relevanten FEPs führen zu keinen Resultaten, welche das SMA-Lager grundsätzlich in Frage stellen würden (vgl. Tab. 2.4-1).

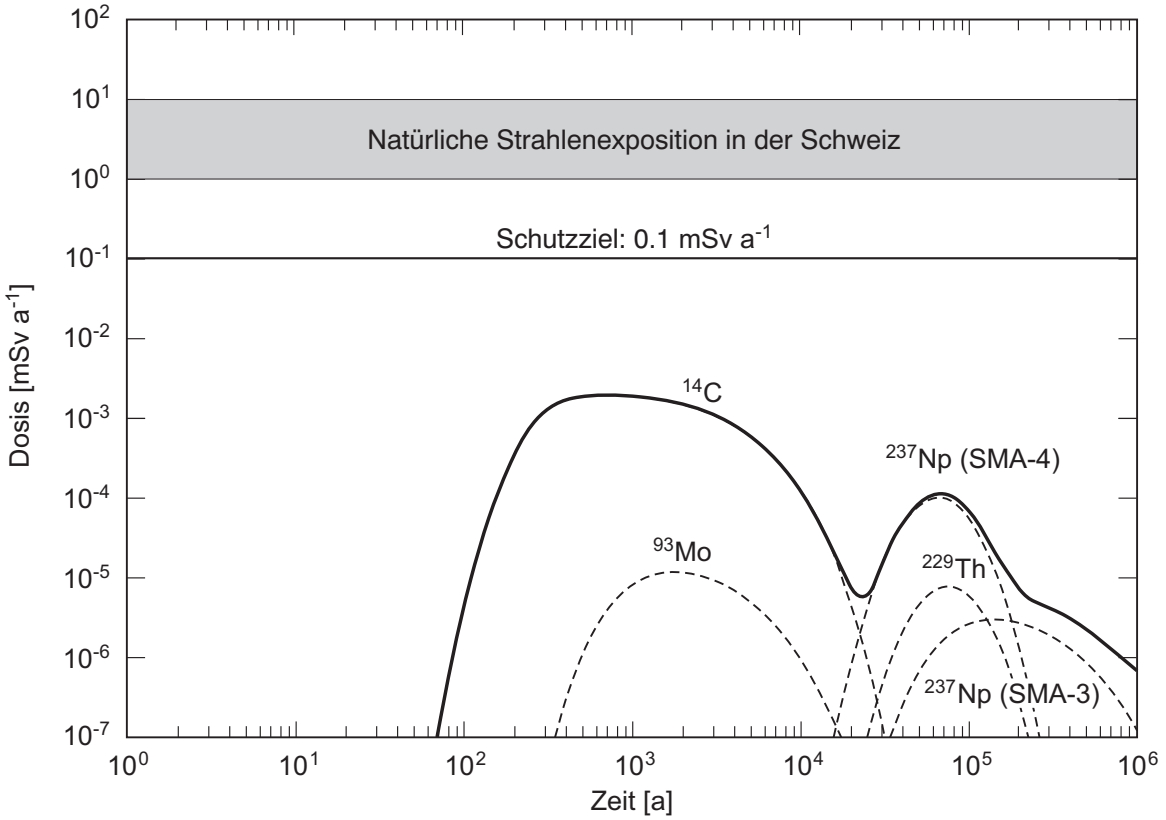


Fig. 2.4-1: Zeitlicher Verlauf der im Projekt Wellenberg für ein SMA-Lager berechneten Gesamtdosis für den Referenzfall.

Gesamtdosis berechnet aus Summe über die vier betrachteten Abfallgruppen im SMA-Lager (entspricht Fig. 7.1-1 aus Nagra 1994b).

[13] Dies umfasste auch Dosisberechnungen, die zeigten, dass bei einem Betrachtungszeitraum von 100'000 Jahren das Schutzziel eingehalten werden kann.

Der zeitliche Verlauf der berechneten Gesamtdosis für den Referenzfall liegt deutlich unterhalb des behördlichen Schutzziels von 0.1 mSv/a (Fig. 2.4-1); sie wird durch langlebige Radionuklide aus dem SMA-Abfallinventar dominiert, insbesondere durch organisches ^{14}C aus den Abfällen aus Medizin, Industrie und Forschung. Auch für die alternativen Modellansätze im Referenz-Szenarium ergeben sich Gesamtdosen unterhalb des Schutzziels – die Sicherheitsreserven fallen jedoch für gewisse Rechenfälle (alternative Exfiltrationsorte) kleiner aus (Tab. 2.4-1).

Die Berechnungen zu den alternativen Szenarien überschreiten das Schutzziel ebenfalls nicht, obschon die entsprechenden Modellrechnungen teilweise auf stark vereinfachenden, pessimistischen Annahmen beruhen (erosive Freilegung des SMA-Lagers, Freisetzung flüchtiger Radionuklide über den Gaspfad, vgl. Tab. 2.4-1). Schliesslich zeigen die Resultate des robusten Ansatzes, dass selbst mit hypothetischen, stark pessimistischen Annahmen zu den Ungewissheiten bzgl. der Qualität der Geosphärentransportbarriere keine Gesamtdosen über dem Schutzziel resultieren.

Im Projekt Wellenberg wurden folgende Faktoren als bestimmend für die Langzeitsicherheit des SMA-Lagers identifiziert:

- die Radionuklid-Rückhaltung im Nahfeld, welche durch die Sorption der Radionuklide im günstigen chemischen Milieu des technischen Barrierensystems sowie durch den geringen Wasserfluss im kavernennahen Wirtgestein gewährleistet wird
- die Barrierenwirkung des Wirtgesteins bzgl. Wasserfluss und Radionuklidtransport sowie der durch die Geosphäre gewährleistete Schutz der Lagerkammern vor frühzeitiger erosiver Freilegung und vor unerwünschten menschlichen Tätigkeiten im untertägigen Lagerbereich
- das Verdünnungspotenzial in der Biosphäre

Aus den im Rahmen des Projekts Wellenberg durchgeführten Berechnungen wurden die folgenden Anforderungen an die Geologie für ein SMA-Lager am Standort Wellenberg abgeleitet:

- Betrachtungszeitraum (d.h. der Zeitraum, während dessen die Geosphäre Schutz vor einer erosiven Freilegung der Lagerkammern bieten muss): $\geq 10^5$ Jahre
- Distanz zur nächstgelegenen auslegungsbestimmenden Diskontinuität[14]: ≥ 100 m
- Transmissivität von Fliesspfaden:
  - Mittlere Transmissivität von Diskontinuitäten: $\leq 10^{-8}$ m^2/s
  - Transmissivität einzelner Channels: $\leq 10^{-6}$ m^2/s
- Grossräumige hydraulische Durchlässigkeit: $\leq 10^{-9}$ m/s
- Zulässige Erhöhung der Wirtgesteins-Durchlässigkeit infolge frühzeitiger Erosion nach Ablauf von 50'000 Jahren nach Lagerverschluss: ≤ ca. Faktor 100

Unter Berücksichtigung von Empfehlungen der Expertengruppe Entsorgungskonzepte für radioaktive Abfälle (EKRA 2000) hat die HSK Ausschlusskriterien für den betrachteten Wirtgesteinsbereich am Standort Wellenberg formuliert, die sich auf allfällige Befunde aus einem Sondierstollen bzw. Teststollen beziehen (HSK 2000). Diese Ausschlusskriterien hätten im Verlaufe der Standortexploration letztendlich über Fortsetzung oder Abbruch des Projekts Wellenberg entschieden.

---

[14] Der angegebene Zielwert kann auch Transportpfadsegmente innerhalb von Kalkbankabfolgen umfassen; ein bedeutend kürzerer barrierenwirksamer Anteil der Transportpfadlänge (≥ 20 m) gewährleistet eine genügende Sicherheit.

Gemäss HSK (2000) handelt es sich um die folgenden, auf den Standort Wellenberg bezogenen Ausschlusskriterien:

1. Ausscheidung von wasserführenden Zonen: "Jede im Teststollen angeschnittene wasserführende Zone (z.B. Störungszone, offene Kluft, verkarstete Malmscholle), die einen Wasserzufluss von mehr als 4 Liter pro Minute[15] aufweist, ist als ungeeigneter Bereich auszuscheiden. Der Wert bezieht sich auf den Zufluss, der ein Jahr nach Ausbruch des Stollens gemessen wird."
2. Ausscheidung von Zonen mit gering mineralisierten Wässern: "Die Gesamtmenge der im Tiefenwasser gelösten Feststoffe (TDS = total dissolved solids) muss grösser als 400 mg/l sein. Dieses Kriterium ist im Teststollen auf alle Zuflussstellen anzuwenden, die ein Jahr nach dem Stollenvortrieb noch eine Schüttung aufweisen."
3. Minimale Ausdehnung der Wirtgesteinsbereiche: "Nach den Ausscheidungen gemäss Kriterien 1 und 2 müssen im Teststollen zusammenhängende Wirtgesteinsbereiche von jeweils mindestens 250 m Länge vorhanden sein."
4. Wasserfluss in den verbleibenden Stollenabschnitten: "In den Stollenabschnitten, die nach Anwendung des Kriteriums 3 noch übrig bleiben, müssen zusammenhängende Strecken von mindestens 250 m Länge vorhanden sein, deren mittlerer Wasserfluss, bezogen auf 1 m Stollenlänge, ein Jahr nach Stollenvortrieb 0.05 Liter pro Minute[16] nicht übersteigt."

Nach HSK (2000) gelten diese Ausschlusskriterien als eingehalten, wenn nach diesen vier Ausscheidungsschritten ein oder mehrere Stollenabschnitte übrig blieben. Ansonsten wäre der mit dem Teststollen untersuchte Wirtgesteinsbereich am Standort Wellenberg als ungeeignet zu beurteilen.

2.4.2.2 HAA-Lager (Projekt Kristallin-I)

Im vorliegenden Kapitel werden die Erkenntnisse aus der Sicherheitsanalyse für ein HAA-Lager im kristallinen Grundgebirge der Nordschweiz[17] (Nagra 1994a) zusammengefasst. Die Hauptzielsetzung des Projekts Kristallin-I bestand darin, eine Neubewertung des kristallinen Grundgebirges der Nordschweiz als Wirtgestein für ein HAA-Lager vorzunehmen. Im Rahmen des Projekts wurde ein besseres Verständnis des Verhaltens der technischen und geologischen Barrieren angestrebt sowie eine Evaluation wichtiger Daten und Werkzeuge der Sicherheitsanalyse durchgeführt.

Im Rahmen des Projekts Kristallin-I wurde eine detaillierte Szenarienanalyse mit dem Ziel durchgeführt, die Auswirkungen der drei folgenden Typen von Ungewissheiten auf die Entwicklung des HAA-Lagers zu quantifizieren: i) Ungewissheiten bzgl. der Auswahl und Kombination der relevanten FEPs (quantifiziert anhand der Rechenfälle des Referenz-Szenariums und alternativer Szenarien), ii) Ungewissheiten in der Modellierung wichtiger FEPs (quantifiziert anhand eines Referenz-Modellansatzes und verschiedener alternativer Modellansätze) und iii) Ungewissheiten bzgl. der Tragweite wichtiger FEPs (quantifiziert durch Parametervariationen). Daraus wurde eine strukturierte Liste der in der Sicherheitsanalyse zu betrachtenden Rechenfälle abgeleitet (vgl. Tab. 2.4-2a/b).

---

[15] Eine Zuflussrate von 4 Liter pro Minute nach einem Jahr entspricht einer Transmissivität in der Grössenordnung von 10^{-7} m^2/s (basierend auf generischen Werten für die hydraulische Druckhöhe von 500 m und für den Radius des Teststollens von 2 m).

[16] Eine Zuflussrate von 0.05 Liter pro Minute pro Meter Stollenlänge nach einem Jahr entspricht einer hydraulischen Durchlässigkeit in der Grössenordnung von 10^{-9} m/s (basierend auf generischen Werten für die hydraulische Druckhöhe von 500 m und für den Radius des Teststollens von 2 m).

[17] Im Folgenden mit *Projekt Kristallin-I* abgekürzt. Die Sicherheitsanalyse beschränkt sich auf verglaste hochaktive Abfälle.

Das Referenz-Szenarium (Tab. 2.4-2a) beschreibt die mutmassliche Entwicklung des Lagersystems. Es wird analysiert mittels Rechnungen zur Freisetzung von gelösten Radionukliden mit dem Tiefengrundwasser. Zur Quantifizierung von Ungewissheiten bzgl. der komplexen Wechselwirkungen zwischen den FEPs, welche im Referenz-Szenarium zu berücksichtigen sind, wurden verschiedene Modellansätze identifiziert, von denen einer als Referenz-Modellansatz (realistisch-konservative Modellierung der relevanten FEPs) und die anderen als alternative Modellansätze (alternative Modellierung relevanter FEPs zur Quantifizierung der Auswirkungen alternativer Annahmen zu den wasserführenden Systemen, zur Matrixdiffusion, zu Transportpfaden, zur Rolle von Kolloiden und zum hydrogeologischen Regime) bezeichnet wurden. Der Referenzfall basiert auf einer Kombination des Referenz-Modellansatzes mit dem Referenz-Datensatz.

Neben dem Referenz-Szenarium wurden auch die folgenden alternativen Szenarien untersucht (Tab. 2.4-2b): Trinkwasserfassung in grosser Tiefe, Versiegelungsversagen, alternative Entwicklungen der Biosphäre (Trockenklima, Feuchtklima, periglaziales Klima, geomorphologische Veränderungen am Ort der Radionuklidfreisetzung).

Im Rahmen eines sogenannten robusten Szenariums wurde schliesslich das Verhalten des Lagersystems unter pessimistischen Annahmen zum Verhalten der technischen Barrieren und unter Annahme einer hypothetischen, direkten Radionuklidfreisetzung vom Nahfeld in die Referenz-Biosphäre beschrieben (nicht in Tab. 2.4-2a/b aufgeführt).

Die Resultate der Sicherheitsanalyse im Projekt Kristallin-I zeigen, dass die Langzeitsicherheit für ein HAA-Lager im kristallinen Grundgebirge der Nordschweiz gemäss der behördlichen Richtlinie HSK-R-21 (HSK & KSA 1993) gewährleistet ist, auch ohne dass das Barrierenpotenzial der technischen und geologischen Barrieren in den Analysen vollständig ausgenutzt wird. Voraussetzung für diese Schlussfolgerung ist allerdings, dass ausreichend grosse Gesteinsblöcke mit geeigneten hydrogeologischen Eigenschaften und in geeigneter Konfiguration gefunden werden können, für welche die Sicherheit standortspezifisch nachgewiesen werden kann (HSK 2004). Die Chancen für eine erfolgreiche Exploration eines Standorts (Identifikation und Nachweis genügend grosser Gesteinsblöcke mit geeigneten Gesteinseigenschaften) werden als kritisch eingeschätzt.

Der zeitliche Verlauf der berechneten Gesamtdosis für die verglasten hochaktiven Abfälle im Referenzfall liegt deutlich unterhalb des behördlichen Schutzziels von 0.1 mSv/a (Fig. 2.4-2); sie wird durch die langlebigen Radionuklide ^{135}Cs und ^{79}Se (im Zeitbereich bis eine Million Jahre) sowie durch ^{99}Tc und gewisse Actiniden (im späteren Zeitbereich) dominiert. Auch für die alternativen Modellansätze im Referenz-Szenarium ergeben sich durchwegs Gesamtdosen, die deutlich unterhalb des Schutzziels liegen.

Die Berechnungen zu den alternativen Szenarien überschreiten das Schutzziel ebenfalls nicht, obschon die entsprechenden Modellrechnungen teilweise auf stark vereinfachenden, pessimistischen Annahmen beruhen (Trinkwasserfassung in grosser Tiefe, Versiegelungsversagen, alternative Annahmen zur Biosphäre, vgl. Tab. 2.4-2b). Die Sicherheitsreserven fallen jedoch für gewisse Rechenfälle kleiner aus. Schliesslich zeigen die Resultate des robusten Szenariums, dass selbst unter pessimistischen Annahmen zum Verhalten der technischen Barrieren sowie unter Annahme einer direkten Radionuklidfreisetzung vom Nahfeld in die Biosphäre keine Gesamtdosen über dem Schutzziel resultieren.

Tab. 2.4-2a: Maxima der im Projekt Kristallin-I berechneten Gesamtdosen für die Rechenfälle des Referenz-Szenariums.

Entspricht Tab. 6.5.1 in Nagra (1994a)

Reference Scenario		**Max. Annual Individual Dose** [mSv y^{-1}]
Reference Model Assumptions	**Alternative Model Assumptions**	
Geometry of Water-Conducting Features		
All transport takes place in cataclastic/ jointed zones with broad, widely-spaced channels.	Transport in aplite/pegmatite dykes and aplitic gneisses	3×10^{-5}
	Transport in cataclastic/jointed zones with narrow, closely-spaced channels	7×10^{-7}
Matrix Diffusion		
Matrix diffusion is limited to the altered wallrock adjacent to the fractures. Unaltered wallrock is inaccessible to diffusion.	Unlimited matrix diffusion; transport in: (i) cataclastic/jointed zones with broad, widely-spaced channels	1×10^{-4}
	(ii) aplite/pegmatite dykes and aplitic gneisses	1×10^{-6}
	(iii) cataclastic/jointed zones with narrow, closely-spaced channels	7×10^{-7}
Radionuclide Migration Path		
Radionuclides are transported through the low-permeability domain directly (upwards) to the higher-permeability domain and thence to the biosphere.	Radionuclides are transported through the low-permeability domain to major water-conducting faults, upwards to the higher-permeability domain and thence to the biosphere.	2×10^{-4}
Colloid Transport		
Radionuclide sorption on groundwater colloids is neglected. (The maximum dose for the 4N + 1 chain in the Reference Case is 9×10^{-7} mSv y^{-1}.)	Radionuclides sorb onto a constant background population of groundwater colloids (the effect of this assumption has been evaluated for the 4N + 1 actinide chain; it is likely to be unimportant for the fission/activation products).	4N + 1 chain: 5×10^{-6}
Distribution Groundwater Flow		
Water-conducting features are all assigned an identical flowrate.	Groundwater flow is distributed between water-conducting features according to a probability distribution. Radionuclide release to the biosphere is obtained from a weighted superposition of Reference-Case results and results with flowrates increased 10- and 100-fold.	6×10^{-4}
Reference-Case Result		2×10^{-4}

Tab. 2.4-2b: Maxima der im Projekt Kristallin-I berechneten Gesamtdosen für die Rechenfälle der alternativen Szenarien.

Entspricht Tab. 6.5.2 in Nagra (1994a).

Alternative Scenarios	**Max. Annual Individual Dose** [mSv y^{-1}]
(i) Deep Groundwater Well	
All radionuclides are captured by a deep well.	6×10^{-4}
(ii) Tunnel/Shaft Seal Failure	
Radionuclides are transported through the shaft backfill.	2×10^{-3}
Radionuclides are transported through the shaft excavation-disturbed zone.	2×10^{-3}
(iii) Alternative Climate-Related Scenarios	
Dry Climate State, with reduced precipitation and incrased evapotranspiration; increased irrigation from aquifer, present-day subsistence agricultue.	4×10^{-3}
Humid Climate State, with increased precipitation and evapotranspiration; no irrigation, present-day subsistence agriculture.	6×10^{-5}
Periglacial Climate State, in which permafrost prevents interaction with the aquifer (assumed frozen); all water obtained from the river, modified Rhine with reduced flow because of reduced precipitation, reduced evapotranspiration.	1×10^{-10} periglacial conditions at either 2×10^{4} years (^{79}Se) or 2×10^{5} years (^{135}Cs) (after repository closure)
Rhine Gravels Absent, no local aquifer, present-day subsistence agriculture:	
release to the Rhine water	1×10^{-7}
release to deep soil	2×10^{-3}

Im Projekt Kristallin-I wurden folgende Faktoren als bestimmend für die Langzeitsicherheit des HAA-Lagers identifiziert:

- Die Radionuklid-Rückhaltung in den technischen Barrieren wird durch eine geringe Glasauflöserate, Sorption und Löslichkeitsbegrenzung der Radionuklide im günstigen chemischen Milieu des Bentonits sowie durch den geringen Wasserfluss im kavernennahen Wirtgestein gewährleistet. Die Sicherheitsanalyse des Projekts Kristallin-I, welche den Ungewissheiten bzgl. der hydrogeologischen Eigenschaften der Geosphäre gebührend Rechnung trägt, zeigt, dass die Radionuklidrückhaltung der technischen über die geologischen Barrieren dominiert und sogar ausreicht, um das behördliche Schutzziel einzuhalten.
- Die Hauptfunktion des kristallinen Wirtgesteins ist, günstige Bedingungen für die technischen Barrieren zu bieten. Dazu gehören günstige geochemische Bedingungen und ausreichend geringe Wasserflüsse sowie der mechanische Schutz der Abfälle vor den Folgen der Erosion und menschlicher Tätigkeiten im untertägigen Lagerbereich. Unter günstigen hydrogeologischen Bedingungen kann die Geosphäre auch einen substanziellen Beitrag zur Radionuklidrückhaltung beisteuern.

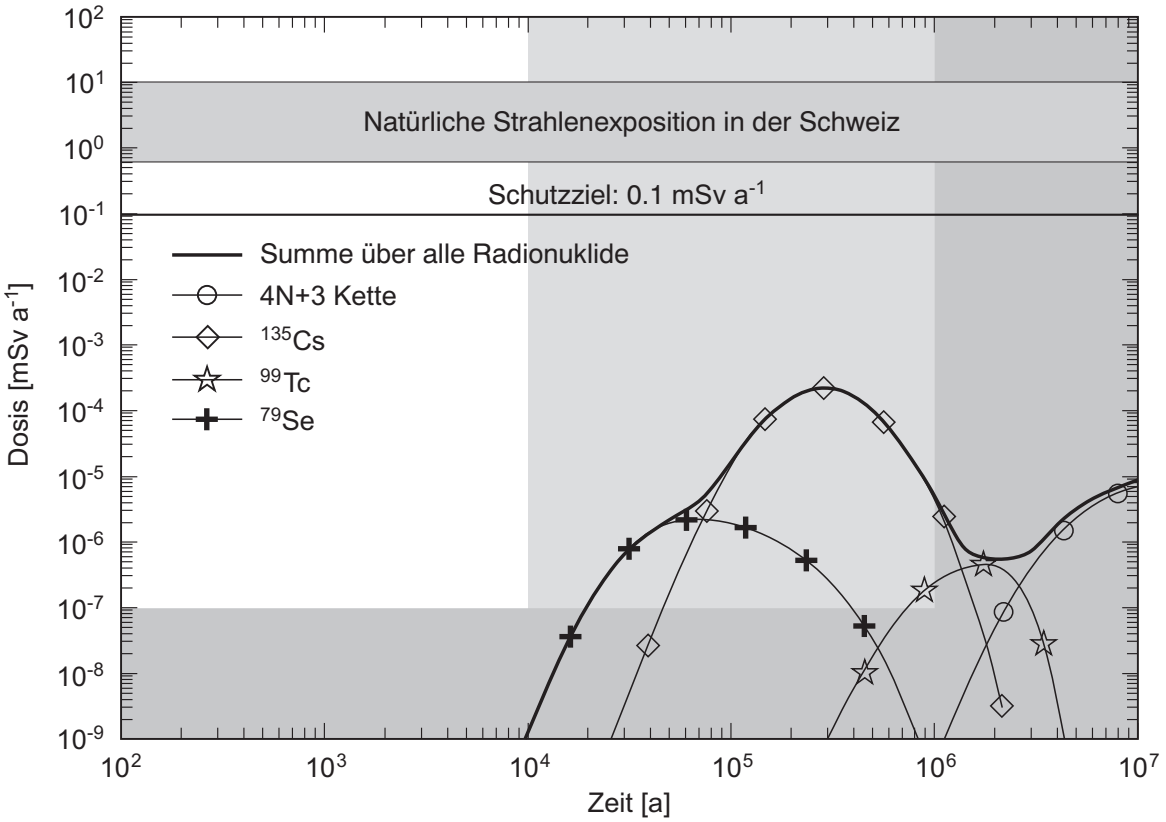


Fig. 2.4-2: Zeitlicher Verlauf der im Projekt Kristallin-I für ein HAA-Lager berechneten Gesamtdosis für den Referenzfall.

Gesamtdosis berechnet aus Summe der Beiträgen der verglasten hochaktiven Abfälle im HAA-Lager. Entspricht der Fig. 7.2.1 aus Nagra (1994a).

Aus den im Rahmen des Projekts Kristallin-I durchgeführten Berechnungen wurden die folgenden Anforderungen an die Geologie für ein HAA-Lager abgeleitet:

- Betrachtungszeitraum (d.h. der Zeitraum, während dessen die Geosphäre Schutz vor einer erosiven Freilegung der Lagerkammern bieten muss): $\geq 10^6$ Jahre
- Transportdistanz zur nächstgelegenen auslegungsbestimmenden Diskontinuität: ≥ 100 m
- Transmissivität einzelner offener Channels[18]: $\leq 10^{-8}$ m^2/s
- Grossräumige hydraulische Durchlässigkeit[19]: $\leq 10^{-9}$ m/s

Im Projekt Kristallin-I wurden ausschliesslich verglaste hochaktive Abfälle betrachtet. Nach Abschluss des Projekts wurden zusätzliche ergänzende Arbeiten durchgeführt, in denen auch

[18] Abgeleitet aus den Schlussfolgerungen bzgl. der Rolle der Geosphäre als Transportbarriere für den Fall, dass die technischen Barrieren nur eine geringe Barrierenwirkung entfalten würden (Kap. 7.4.3 in Nagra 1994a): Eine hydraulische Durchlässigkeit von 10^{-9} m/s (bei einem hydraulischen Gradienten von ca. 0.01 m/m) kombiniert mit einer Dichte an offenen Channels von 10^{-3} m/m^2 (Referenzwert) würden ausreichen, um die Barrierenwirkung der Geosphäre so zur Entfaltung zu bringen, dass das Schutzziel (mit einer gewissen Reserve) eingehalten werden könnte. Dies entspricht einer Channel-Transmissivität von 10^{-8} m^2/s.

[19] Abgeleitet aus den Schlussfolgerungen bzgl. der Rolle der Geosphäre als hydraulische Barriere für die technischen Barrieren in Kap. 7.4.2 in Nagra (1994a): Eine hydraulische Durchlässigkeit von 10^{-9} m/s (bei einem hydraulischen Gradienten von ca. 0.01 m/m) würde ausreichen, um die Barrierenwirkung der Bentonit-Barriere zur vollen Entfaltung zu bringen und um das Schutzziel (mit einer gewissen Reserve) einzuhalten.

Rechenfälle mit abgebrannten Brennelementen in einem geologischen Tiefenlager im Kristallin analysiert wurden (Schneider et al. 1996 und 1997). Die Resultate dieser Arbeiten zeigten, dass – unter der Voraussetzung, dass ausreichend grosse Gesteinsblöcke mit geeigneten Eigenschaften[20] und in geeigneter Konfiguration gefunden werden können – die Sicherheit für ein geologisches Tiefenlager im Kristallin, das neben verglasten hochaktiven Abfällen auch abgebrannte Brennelemente enthält, gewährleistet werden könnte.

2.4.2.3 HAA-Lager (Projekt Entsorgungsnachweis)

Mit dem Projekt Entsorgungsnachweis ist die Nagra der gesetzlichen Auflage nachgekommen, den Nachweis der grundsätzlichen Machbarkeit der geologischen Tiefenlagerung für BE, HAA und LMA an einem konkreten Standort in der Schweiz zu erbringen. Zu diesem Zweck reichte die Nagra Ende 2002 eine Dokumentation für ein HAA-Lager im Opalinuston des Zürcher Weinlands ein, die einen Sicherheits-, Standort- und Machbarkeitsnachweis umfasste (Nagra 2002a-c). 2003 begann eine umfassende behördliche Überprüfung, die im September 2005 abgeschlossen wurde. Die Gutachten und Stellungnahmen (HSK 2005, KSA 2005, KNE 2005, NEA 2004a) kamen zum grundsätzlichen Ergebnis, dass der Entsorgungsnachweis erbracht sei und die HSK empfahl dem Bundesrat, dem Antrag der Nagra, den Entsorgungsnachweis als erbracht zu genehmigen, zuzustimmen. Sämtliche Unterlagen und Berichte zum Entsorgungsnachweis wurden anschliessend öffentlich aufgelegt. In seiner Botschaft vom 28. Juni 2006 ist der Bundesrat der Empfehlung der HSK gefolgt und hat den Entsorgungsnachweis für ein HAA-Lager als erbracht genehmigt.

Im vorliegenden Kapitel werden die Erkenntnisse aus dem Sicherheitsbericht zum Entsorgungsnachweis für ein HAA-Lager im Opalinuston im Zürcher Weinland[21] (Nagra 2002c, d) zusammengefasst, in dem ein breites Spektrum von Rechenfällen analysiert wurde. Diese Rechenfälle sind in Tab. 2.4-3 zusammengefasst. Mit diesem Spektrum von Rechenfällen wurde sichergestellt, dass die bestehenden Ungewissheiten bzgl. Szenarien, Modell-Konzeptualisierungen und Daten adäquat berücksichtigt wurden.

Das Referenz-Szenarium, welches die mutmassliche Entwicklung des Lagersystems beschreibt, basiert auf der Grundannahme einer Freisetzung von gelösten Radionukliden mit dem Tiefengrundwasser. Zur Quantifizierung von Ungewissheiten bzgl. der komplexen Wechselwirkungen zwischen den FEPs, welche im Referenz-Szenarium zu berücksichtigen sind, wurden verschiedene Modell-Konzeptualisierungen identifiziert. Eine realistisch-konservative Modellierung der relevanten FEPs wurde als Referenz-Modell-Konzeptualisierung bezeichnet, die anderen als alternative Modell-Konzeptualisierungen (alternative Modellierung relevanter FEPs zur Quantifizierung des Einflusses einer löslichkeitslimitierten Brennstoffauflösung, einer thermischen Beanspruchung des Bentonits, des glazial-induzierten Wasserflusses im Opalinuston, der Beiträge der Rahmengesteine zur Barrierenwirkung, einer Radionuklidfreisetzung durch die Rampe und den Schacht sowie einer Konvergenz- und Gas-induzierten Radionuklidfreisetzung). Der Referenzfall basiert auf einer Kombination der Referenz-Modell-Konzeptualisierung mit dem Referenz-Datensatz.

Neben dem Referenz-Szenarium wurden auch zwei alternative Szenarien zur Freisetzung flüchtiger Radionuklide über den Gaspfad und zu den Auswirkungen menschlicher Tätigkeiten im untertägigen Lagerbereich auf die Radionuklidfreisetzung untersucht. Im Rahmen sogenannter

---

[20] D.h. Eigenschaften, wie sie für die verglasten HAA im Projekt Kristallin-I im Referenzfall und für ausgewählte Parametervariationen angenommen wurden (Nagra 1994a).

[21] Im Folgenden mit "Projekt Entsorgungsnachweis" abgekürzt.

"what if?"-Fälle wurde das Verhalten des Lagersystems unter hypothetischen, abdeckenden Modellannahmen bzgl. der Nahfeld- und Geosphärentransportbarriere beschrieben.

Zusätzliche Rechenfälle betreffen Design- und Systemoptionen (erhöhtes Abfallaufkommen, alternative Abfallkonditionierung der LMA und Kupfer-Behälter für abgebrannte Brennelemente) sowie Ungewissheiten bzgl. der Biosphären-Geomorphologie und bzgl. klimatischer Langzeitveränderungen.

Das Maximum der berechneten Gesamtdosis für den Referenzfall liegt mehr als drei Grössenordnungen unterhalb des behördlichen Schutzziels von 0.1 mSv/a (Fig. 2.4-3); sie wird durch langlebige Radionuklide dominiert, insbesondere durch ^{129}I, ^{36}Cl, ^{79}Se und organisches ^{14}C aus den hochaktiven Abfällen. Auch für die alternativen Modell-Konzeptualisierungen im Referenz-Szenarium ergeben sich Gesamtdosen, die um zwei oder mehr Grössenordnungen unterhalb des Schutzziels liegen (Tab. 2.4-3).

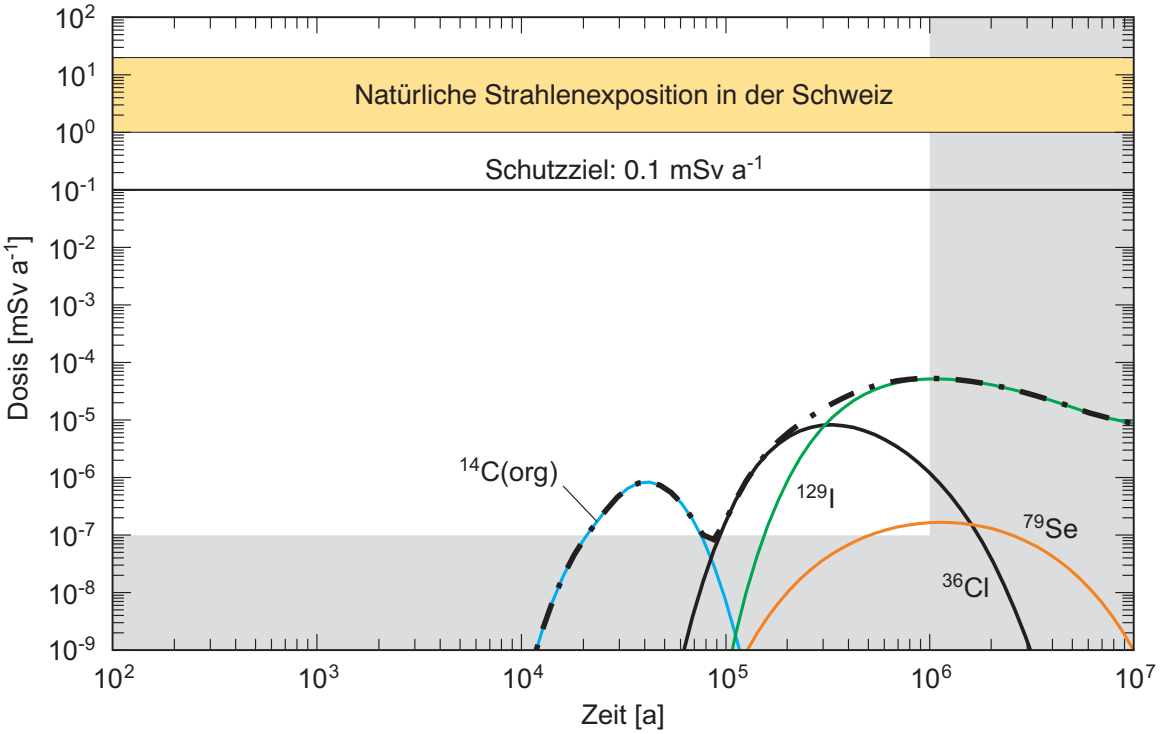


Fig. 2.4-3: Zeitlicher Verlauf der im Projekt Entsorgungsnachweis für ein HAA-Lager berechneten Gesamtdosis für den Referenzfall.

Gesamtdosis berechnet aus Summe der Beiträge der abgebrannten Brennelemente, der verglasten hochaktiven Abfälle sowie der langlebigen mittelaktiven Abfälle im HAA-Lager (entspricht Fig. 8.2-1 aus Nagra 2002c).

Die Berechnungen zu den alternativen Szenarien liegen ebenfalls allesamt deutlich unterhalb des Schutzziels, obschon die verwendeten Rechenmodelle teilweise auf stark vereinfachenden, pessimistischen Annahmen beruhen (Freisetzung flüchtiger Radionuklide über den Gaspfad und Auswirkungen von Bohrloch-Penetrationen im Zuge zukünftiger Explorationstätigkeiten, vgl. Tab. 2.4-3).

Die Resultate der "what if?"-Fälle zeigen, dass selbst mit hypothetischen, stark pessimistischen Annahmen zu den Ungewissheiten bzgl. der Qualität der Nahfeld- und Geosphärentransportbarriere keine Gesamtdosen über dem Schutzziel resultieren. Die Sicherheitsreserven fallen jedoch für gewisse Rechenfälle kleiner aus (insbesondere unter Annahme hypothetisch stark erhöhter Wasserflüsse in der Gesteinsmatrix oder in Diskontinuitäten im Opalinuston).

Schliesslich zeigen die Resultate zu den Design- und Systemoptionen und die Illustrationen zu Ungewissheiten bzgl. der zukünftigen Entwicklung der Biosphäre relativ geringe Dosisabweichungen im Vergleich mit dem Referenzfall.

Im Projekt Entsorgungsnachweis wurden folgende Faktoren als bestimmend für die Langzeitsicherheit des HAA-Lagers identifiziert:

- Die überragende Barrierenwirkung des Opalinustons bzgl. Wasserfluss und Radionuklidtransport, welche sich überdies dank dem Selbstabdichtungsvermögen des Opalinustons in den sicherheitstechnischen Untersuchungen als ausgesprochen robust erweist, sowie der durch die Geosphäre gewährleistete Schutz der Lagerkammern vor frühzeitiger erosiver Freilegung und vor unerwünschten menschlichen Tätigkeiten im untertägigen Lagerbereich;
- die Radionuklid-Rückhaltung im Nahfeld, welche durch eine geringe Brennstoffmatrix- bzw. Glasauflöserate, Sorption und Löslichkeitsbegrenzung der Radionuklide im günstigen chemischen Milieu des technischen Barrierensystems, durch die günstigen hydraulischen Eigenschaften der Verfüllmaterialien (Bentonit) und den geringen Wasserfluss im kavernennahen Wirtgestein gewährleistet wird.

Die im Rahmen des Projekts Entsorgungsnachweis durchgeführte Sicherheitsanalyse – welche neben den Modellrechnungen auch ergänzende qualitative Argumente umfasst – zeigt, dass für die folgenden (teilweise hypothetischen) Annahmen noch eine genügende Sicherheit erreicht wird:

- Betrachtungszeitraum (d.h. der Zeitraum, während dessen die Geosphäre Schutz vor einer erosiven Freilegung der Lagerkammern bieten muss)[22]: 10^6 Jahre
- Transportdistanz zur nächstgelegenen auslegungsbestimmenden Diskontinuität[23]: ≥ 20 m
- Mittlere Transmissivität von Diskontinuitäten[24]: $\leq 10^{-9}$ m^2/s
- Grossräumige hydraulische Durchlässigkeit[25]: $\leq 10^{-10}$ m/s

---

22 Vgl. Kap. 2.5.4.1 in Nagra (2002c).

23 Die Modellrechnungen zeigen, dass das Schutzziel bei einer reduzierten Transportpfadlänge im Opalinuston von 30 m um ca. drei Grössenordnungen unterschritten wird (Tab. 2.4-3, Rechenfall 4.11). Andererseits zeigt Fig. 6.7-7 in Nagra (2002c), dass die kombinierte Barrierenwirkung des Bentonits und des Opalinustons für eine Transportpfadlänge zwischen 20 m und 30 m nur unbedeutend abnimmt. Der aufgeführte Wert von 20 m weist deshalb noch beträchtliche Sicherheitsreserven auf.

24 Die Modellrechnungen zeigen, dass das Schutzziel auch bei Anwesenheit von Störungszonen im Opalinuston mit einer Transmissivität von 10^{-9} m^2/s um ca. eine Grössenordnung unterschritten wird (Tab. 2.4-3, Rechenfälle 4.2d, e, f).

25 Abgeleitet aus Fig. 6.5-1, 6.5-2 und Fig. 6.7-6 in Nagra (2002c). Fig. 6.5-1 und 6.5-2 zeigen, dass die Bentonit-Barriere unter Referenz-Bedingungen alleine ausreicht, um das Schutzziel einzuhalten. Fig. 6.7-6 zeigt erstens, dass die Barrierenwirkung des Bentonits nur geringfügig vom spezifischen Wasserfluss im Opalinuston abhängt und zweitens, dass die Freisetzungsrate von ^{129}I ab einem spezifischen Wasserfluss von 10^{-10} m/s durch die Bentonit-Barriere bestimmt wird. Dieser Wasserfluss entspricht einer Durchlässigkeit von 10^{-10} m/s (unter Annahme eines hydraulischen Gradienten im Referenzfall von 1 m/m). Jenseits dieses Schwellenwertes müsste langfristig mit einer zunehmenden Degradation des Bentonits – und damit mit einer Überschreitung des Schutzziels – gerechnet werden.

Tab. 2.4-3: Maxima der im Projekt Entsorgungsnachweis berechneten Gesamtdosen für die Rechenfälle des Referenz-Szenariums, der alternativen Szenarien, der "what if?"-Fälle, der Design-/Systemoptionen und der Biosphären-Illustrationen.

Entspricht der Tab. 8.2-2 in Nagra (2002c).

Scenario	**Conceptualisation**	**Parameter variation**	**Summed dose maximum** [mSv a^{-1}]
1. Reference Scenario Release of dissolved radionuclides	**1.1 Reference Conceptualisation**	**1.1a Reference Case (RC)**	5.3×10^{-5}
		1.1b Variability in canister inventory	See Table 7.10-1
		1.1c Reduced canister lifetime	5.7×10^{-5}
		1.1d Pessimistic nearfield geochemical dataset	6.3×10^{-5}
		1.1e Increased glass dissolution rate in HLW	5.3×10^{-5}
		1.1f Increased water flowrate in geosphere (10-fold increase)	2.1×10^{-4}
		1.1g Decreased water flowrate in geosphere (10-fold decrease)	4.1×10^{-5}
		1.1h Pessimistic geosphere sorption constants	1.0×10^{-4}
		1.1i Pessimistic nearfield and geosphere geochemical dataset	1.2×10^{-4}
		1.1j Pessimistic geosphere diffusion constants	4.5×10^{-4}
		1.1k Pessimistic treatment of ^{14}C (organic) in SF	5.3×10^{-5}
	1.2 Solubility-limited dissolution of SF	1.2a Base Case only	4.1×10^{-5}
	1.3 Bentonite thermal alteration	1.3a Base Case only	5.3×10^{-5}
	1.4 Glacially-induced flow in the Opalinus Clay	1.4a Base Case only	8.4×10^{-5}
	1.5 Additional barrier provided by confining units	1.5a Vertical transport through confining units	2.5×10^{-5}
		1.5b Horizontal transport in local aquifers	3.8×10^{-6}
	1.6 Radionuclide release affected by ramp/shaft	1.6a Base Case	5.1×10^{-5}
		1.6b Increased hydraulic conductivity of EDZ (100-fold increase)	5.0×10^{-5}
	1.7 Convergence-induced release affected by ramp (ILW)	1.7a Steady-state hydraulics	5.3×10^{-5}
		1.7b Water pulse	5.2×10^{-5}
	1.8 Gas-induced release of dissolved radionuclides affected by ramp/shaft	**1.8a Base Case (ILW: 50 %, 0.05 m^3a^{-1})**	2.3×10^{-5}
		1.8b Increased water flowrate in ILW (100 %, 0.3 m^3a^{-1})	4.6×10^{-5}

Tab. 2.4-3: (Fortsetzung)

Scenario	**Conceptualisation**	**Parameter variation**		**Summed dose maximum** [mSv a^{-1}]
2. Alternative Scenario 1 Release of volatile radionuclides along gas pathways	2.1 Release of ^{14}C from SF and ILW as volatile species in the gas phase not affected by ramp/ shaft ("tight seals")	Gas permeability [m^2]	**2.1a (10^{-23})**	6.8×10^{-7}
			2.1b (10^{-22})	3.9×10^{-6}
			2.1c (0)	6.2×10^{-7}
	2.2 Release of ^{14}C from SF and ILW as volatile species in the gas phase affected by ramp/shaft ("leaky seals")	Gas permeability [m^2]	**2.2a (10^{-23})**	4.4×10^{-5}
			2.2b (10^{-22})	4.2×10^{-5}
			2.2c (0)	4.4×10^{-5}
3. Alternative scenario 2 Release of radionuclides affected by human actions	3.1 Borehole penetration	**3.1a Near hit, 2 canisters/1 ILW-1 tunnel affected**		1.9×10^{-4}
		3.1b Near-hit, 4 canisters affected		2.1×10^{-4}
		3.1c Near hit, 2 canisters/1 ILW-1 tunnel affected, increased water flow rate		1.4×10^{-2}
		3.1d Near hit, 2 canisters/1 ILW-1 tunnel affected, decreased water flowrate		5.1×10^{-5}
		3.1e Direct hit		1.6×10^{-3}
		3.1f Direct hit, increased water flowrate		2.5×10^{-3}
		3.1g Direct hit, decreased water flowrate		1.3×10^{-4}
	3.2 Deep groundwater extraction from Malm aquifer (production of well as dilution)	Plume capture efficiency	**3.2a (10 %)**	5.8×10^{-5}
			3.2b (100 %)	1.1×10^{-4}
	3.3 Abandoned repository	3.3a Base Case only		5.0×10^{-5}
4. "What if?" cases to investigate robustness of the disposal system	4.1 High water flowrate in geosphere	4.1a Increased water flowrate in geosphere (100-fold increase)		2.0×10^{-3}
	4.2 Transport along transmissive discontinuities	**4.2a/c 1 discontinuity ($T = 10^{-10}$ m^2 s^{-1}) affecting 27 SF/HLW canisters and entire ILW repository**		2.7×10^{-4}
		4.2b 2 discontinuities ($T = 10^{-10}$ m^2 s^{-1}) affecting 108 SF/HLW canisters		6.7×10^{-4}
		4.2d/f 1 discontinuity ($T = 10^{-9} m^2$ s^{-1}) affecting 27 SF/HLW canisters and entire ILW repository		1.1×10^{-2}
		4.2e 2 discontinuities ($T = 10^{-9}$ m^2 s^{-1}) affecting 108 SF/HLW canisters		1.1×10^{-2}
	4.3 SF: Increased fuel dissolution rate	**4.3a 10-fold increase**		1.9×10^{-4}
		4.3b 100-fold increase		5.1×10^{-4}
	4.4 Redox-front (SF/ILW compacted hulls)	4.4a Base Case only		1.9×10^{-4}
	4.5 ILW: Gas-induced release of dissolved radionuclides through the ramp only	Water flowrate	**4.5a (50 %, 0.05 m^3a^{-1})**	5.3×10^{-5}
			4.5b (100 %, 0.3 m^3a^{-1})	3.4×10^{-4}

Tab. 2.4-3: (Fortsetzung)

Scenario	**Conceptualisation**	**Parameter variation**		**Summed dose maximum** [mSv a^{-1}]
4. "What if?" cases to investigate robustness of the disposal system	4.6 Unretarded transport of ^{14}C from SF and ILW released as volatile species through host rock; retardation in confining units taken into account	Gas permeability [m^2]	**4.6a (10^{-23})**	5.8×10^{-5}
			4.6b (10^{-22})	5.5×10^{-5}
			4.6c (0)	5.8×10^{-5}
	4.7 Poor near field and pessimistic near-field/geosphere geochemical dataset	Water flowrate in geosphere	**4.7a RC flowrate**	4.5×10^{-4}
			4.7b 10-fold increase	1.6×10^{-3}
			4.7c 100-fold increase	1.1×10^{-2}
	4.8 No advection in geosphere (diffusive transport only)	4.8a Base Case only		1.9×10^{-5}
	4.9 SF: Increased cladding corrosion rate	4.9a Base Case only		5.3×10^{-5}
	4.10 Kd(I) for NF and geosphere = 0	4.10a Base Case only		1.2×10^{-4}
	4.11 Decreased transport distance in Opalinus Clay (30 m)	4.11a Base Case only		8.8×10^{-5}
5. Design and system options	5.1 Increased waste arisings (300 GWa(e))	5.1a Base Case only		8.6×10^{-5}
	5.2 ILW high force compacted waste option	5.2a Base Case only		5.3×10^{-5}
	5.3 SF canister with Cu shell	**5.3a Canister breaching at 10^5 a**		4.8×10^{-5}
		5.3b Initial defect (small initial pinhole, full breaching at 10^5 years) [1]		5.3×10^{-5}
		5.3c Initial defect (Large initial pinhole, full breaching at 10^5 years) [1]		5.3×10^{-5}
6. Illustration of effects of biosphere uncertainty	6.1 Reference and alternative geomorphology	**6.1a Reference area (RC)**		5.3×10^{-5}
		6.1b Sedimentation area		2.5×10^{-5}
		6.1c Wetland		4.8×10^{-6}
		6.1d Exfiltration to spring located at valley side		1.0×10^{-4}
	6.2 Reference and alternative climates	**6.2a Present-day climate (RC)**		5.3×10^{-5}
		6.2b Drier/warmer than present-day climate		5.8×10^{-4}
		6.2c Wetter/warmer than present-day climate		1.8×10^{-5}
		6.2d Periglacial climate		5.3×10^{-7} to 5.3×10^{-5}

[1] Summed dose maximum for a single canister.

2.4.3 Zusammenfassung

In den vorangehenden Kapiteln wurden die wichtigsten Erkenntnisse aus den Sicherheitsanalysen zu den Projekten Wellenberg (für ein SMA-Lager) sowie Kristallin-I und Entsorgungsnachweis (beide für ein HAA-Lager) diskutiert. Als wichtigstes Szenarium wurde in allen diesen Projekten die Freisetzung gelöster Radionuklide mit dem Tiefengrundwasser (Referenz-Szenarium) identifiziert. Die innerhalb des Referenz-Szenariums bestehenden Ungewissheiten wurden mit verschiedenen Modellansätzen und Parametervariationen sicherheitstechnisch bewertet. Neben dem Referenz-Szenarium wurden auch die radiologischen Auswirkungen verschiedener alternativer Szenarien zur Radionuklidfreisetzung (u.a. langfristige Hebung/Erosion, alternative Biosphären-Szenarien, Radionuklidfreisetzung entlang der Zugangsbauwerke und über den Gaspfad, Auswirkungen menschlicher Tätigkeiten im untertägigen Lagerbereich) untersucht. Zusätzlich wurden in allen diesen Projekten abdeckende, hypothetische Modellrechnungen durchgeführt (robuster Ansatz im Projekt Wellenberg, robustes Szenarium im Projekt Kristallin-I bzw. "what if?"-Fälle im Projekt Entsorgungsnachweis).

Die Grundzüge des Sicherheitskonzepts sind in allen untersuchten Projekten ähnlich, obwohl die einzelnen Sicherheitsbarrieren in den verschiedenen Lagersystemen unterschiedliches Gewicht haben. Die Radionuklid-Rückhaltung im Nahfeld, welche primär durch die Sorption und z.T. durch die Löslichkeitsbegrenzung der Radionuklide im günstigen chemischen Milieu des technischen Barrierensystems sowie durch den geringen Wasserfluss im kavernennahen Wirtgestein gewährleistet wird, spielt in allen Lagersystemen ein wichtige Rolle[26]. Die Geologie bietet geeignete hydrogeologische Verhältnisse sowie Schutz der Lagerkammern vor frühzeitiger erosiver Freilegung und vor unerwünschten menschlichen Tätigkeiten im untertägigen Lagerbereich. Darüber hinaus kann sie (insbesondere im Falle des Opalinustons) in bedeutendem Masse zur Radionuklidrückhaltung beitragen.

Als wichtigste Einflussgrössen für die Standortevaluation wurden der erforderliche Betrachtungszeitraum, die grossräumige hydraulische Durchlässigkeit des Wirtgesteins, die Transmissivität der Fliesspfade und die Transportpfadlänge innerhalb des Wirtgesteins identifiziert. Der Betrachtungszeitraum, d.h. der Zeitraum, während dessen die Geosphäre Schutz vor einer erosiven Freilegung der Lagerkammern bieten muss, beträgt 10^5 Jahre (SMA-Lager) bzw. 10^6 Jahre (HAA-Lager). Die grossräumige hydraulische Durchlässigkeit ist ein Mass für den Wasserfluss im Wirtgestein und soll 10^{-9} m/s (SMA-Lager) bzw. 10^{-10} m/s (HAA-Lager) nicht überschreiten. Die Transmissivität der Fliesspfade und die Transportpfadlänge innerhalb dieser Fliesspfade sind wichtige Einflussgrössen für die Radionuklid-Rückhaltung im Wirtgestein. Für diese Einflussgrössen können keine generell gültigen Mindestanforderungen abgeleitet werden, da sie untereinander (und auch mit der hydraulischen Durchlässigkeit) gekoppelt sind sowie vom detaillierten Zusammenspiel aus abfall- und standortspezifischen Gegebenheiten abhängen.

---

[26] Bei den HAA leisten auch der Behälter, die Brennstoff- bzw. Glasmatrix und die Löslichkeitsbegrenzung einiger Radionuklide einen wichtigen Beitrag zur Radionuklid-Rückhaltung im Nahfeld.

2.5 Annahmen zum SMA- bzw. HAA-Lager für die sicherheitstechnischen Betrachtungen

2.5.1 Einleitung

Die zeitliche Entwicklung des Lagersystems (Abfälle, technische Sicherheitsbarrieren, Wirtgestein und allenfalls vorhandene Rahmengesteine) und die Möglichkeiten einer Freisetzung von radioaktiven Substanzen aus dem Lager in die Biosphäre und deren radiologische Konsequenzen wurden im Rahmen verschiedener Szenarien- und Sicherheitsanalysen systematisch untersucht und kontinuierlich weiter entwickelt (vgl. Kap. 2.4).

Die entsprechenden Untersuchungen haben wiederholt bestätigt, dass der Freisetzung der Radionuklide im Tiefengrundwasser eine zentrale Bedeutung zukommt und gewöhnlich als "Referenzszenarium" behandelt wird. Das Grundwasserszenarium geht von einem langzeitlichen Einschluss der radioaktiven Abfälle in tiefen, gering durchlässigen Gesteinsformationen aus und beruht somit auf einer langfristigen Überlagerung des Tiefenlagers durch stabile geologische Einheiten. Dies wiederum heisst, dass dem Zeitpunkt und den Auswirkungen einer allfälligen erosiven Freilegung des Tiefenlagers in den Analysen zur Langzeitsicherheit ebenfalls ein besonderes Augenmerk gewidmet werden (s. Kap. 2.5.6).

Ein weiteres wichtiges Szenarium mit potenziellen radiologischen Auswirkungen auf Mensch und Umwelt betrifft das unabsichtliche menschliche Eindringen in die Lagerstollen der geologischen Tiefenlager. Die bisherigen Analysen zeigen, dass für die meist betroffene Bevölkerungsgruppe auch für ein solches Szenarium nicht mit einer Überschreitung des Schutzziels gerechnet werden muss (Nagra 1994b, Nagra 2002c). Trotzdem wird durch Vermeiden von absehbaren Nutzungskonflikten im Zusammenhang mit Rohstoffvorkommen bei der Standortwahl die Eintretenswahrscheinlichkeit für ein solches Szenarium minimiert.

In Bezug auf das Grundwasserszenarium wird die Sicherheit des Lagersystems vorerst durch den vollständigen Einschluss der Radionuklide (mit entsprechendem radioaktiven Zerfall) durch die intakten Endlagerbehälter gewährleistet; dies gilt besonders für verbrauchte Brennelemente und verglaste hochradioaktive Abfälle aus der Wiederaufarbeitung mit entsprechender Behälterauslegung. Nach der Aufsättigung der Lagerstollen resp. -tunnel und dem Behälterversagen sorgen günstige chemische Bedingungen für eine verzögerte und abgeschwächte Freisetzung der Radionuklide aus der Abfall- bzw. Verfestigungsmatrix. Schliesslich sorgen vorteilhafte hydraulische Bedingungen und verschiedene geochemische Prozesse für eine effiziente Rückhaltung der Radionuklide in den technischen Barrieren und in der Geosphäre.

Für die Radionuklidfreisetzung sind insbesondere die folgenden Prozesse zu berücksichtigen:

- Aufsättigung des Lagers
- Mobilisierung der Radionuklide in der Abfallmatrix (langsame Auflösung der Brennstoff- bzw. Glasmatrix (BE/HAA) resp. langsame Korrosion von aktiviertem Stahl (LMA/ SMA)
- Rückhaltung der Radionuklide im technischen Barrierensystem (beschränkte Löslichkeit bzw. Ausfällung, Sorption auf spezifischen Mineralphasen des Verfüllmaterials)
- Freisetzung der Radionuklide aus dem Wirtgestein bzw. Geosphäre (geringer advektiver Wasserfluss bzw. diffusive Radionuklidausbreitung, Matrixdiffusion und Sorption beim Transport entlang von Klüften)
- Radioaktiver Zerfall des Hauptteils der Radionuklide innerhalb der technischen und geologischen Barrieren sowie Verdünnung der übrigen Radionuklide in regionalen Grundwasserträgern und an der Oberfläche

- Lagerbedingte Einflüsse
  - Komplexbildner und andere Stoffe mit dem Potenzial zur Beeinträchtigung der Barrierenwirkung
  - pH-Fahne
  - Nahfeld-Kolloide
  - Gasbildung
  - Wärmeeintrag

Die Strahlenexposition einer Bevölkerungsgruppe im Einflussbereich des geologischen Tiefenlagers ergibt sich aus dem Konsum von Trinkwasser und Nahrungsmitteln mit Spurenkonzentrationen von Radionukliden, der Inhalation von Staub sowie aus der Direktstrahlung.

2.5.2 Inventar

In der Schweiz werden für die Erfassung der Abfalleigenschaften zwei verschiedene Wege verfolgt, die sich bezüglich Zielsetzung und Inhalt unterscheiden. Die vorhandenen bzw. jetzt anfallenden (realen) Abfälle werden in detaillierten Spezifikationen beschrieben und im "Informationssystem für Radioaktive Materialien" (ISRAM) erfasst und verwaltet. Dabei werden Einzelgebinde mit vergleichbaren Eigenschaften zu Abfallgebindetypen zusammengefasst. Mit der Dokumentation der Abfallgebindetypen werden die heute anfallenden Gebinde detailliert erfasst. Da jeweils kleine Modifikationen bei einem bestimmten Typ zu einem neuen Typ führen, ergibt sich eine grosse Zahl von Typen mit zum Teil sehr ähnlichen Eigenschaften. Dies hat zur Folge, dass eine umfangreiche Datenmenge entsteht mit einem Informationsumfang, der für viele Zwecke (z.B. für sicherheitstechnische Betrachtungen) zu detailliert ist. Parallel zu ISRAM wird daher ein "Modellhaftes Inventar Radioaktiver Materialien" (MIRAM) geführt. Mit MIRAM werden für die Projektarbeiten Unterlagen zu den Abfällen in angemessenem Detaillierungsgrad zur Verfügung gestellt. Übergeordnetes Ziel von MIRAM ist die Vollständigkeit des beschriebenen Inventars für die ganze bei der Lagerplanung betrachtete Periode. Es umfasst deshalb im Gegensatz zu ISRAM auch Abfälle, welche zum heutigen Zeitpunkt noch nicht angefallen sind (z.B. Stilllegungsabfälle). Der Detaillierungsgrad ist jedoch entsprechend dem Verwendungszweck geringer, da ähnliche Abfallgebindetypen zu Abfallsorten zusammengefasst werden. Für die in MIRAM dokumentierten Abfallsorten werden Bezeichnungen gewählt, die allgemeiner sind als die Namen der Abfallgebindetypen. MIRAM (früher: "Modellhaftes Inventar Radioaktiver Abfälle" – MIRA) wird periodisch aktualisiert (Nagra 1984, Alder & McGinnes 1994, McGinnes 2002, Nagra 2007, Nagra 2008d).

Für die Beschreibung der Abfälle werden die Kategorien gemäss Art. 51 der Kernenergieverordnung (KEV 2004) verwendet. Dies sind:

a. hochaktive Abfälle (HAA):
   1. abgebrannte Brennelemente, die nicht weiter verwendet werden
   2. verglaste Spaltproduktlösungen aus der Wiederaufarbeitung von abgebrannten Brennelementen

b. alphatoxische Abfälle (ATA): Abfälle, deren Gehalt an Alphastrahlern den Wert von 20'000 Becquerel/g konditionierter Abfall übersteigt

c. schwach- und mittelaktive Abfälle (SMA): alle anderen radioaktiven Abfälle

Um Transparenz und Nachvollziehbarkeit zu gewährleisten, wird für die sicherheitstechnischen Betrachtungen ein klar definiertes und transparent abgeleitetes modellhaftes Nuklid- und Materialinventar benötigt. Dieses entspricht im vorliegenden Bericht grundsätzlich dem Referenzszenario "50 Jahre KKW-Betrieb" des aktuellen MIRAM, s. Nagra 2008d[27]. Dieses Inventar ist genügend repräsentativ für zusätzliche KKW, welche – zusammen mit den bestehenden – durch ein umhüllendes Abfallinventar dargestellt werden. Unter Berücksichtigung der Ungewissheiten können die Schlussfolgerungen bzgl. Abfallzuteilung, Barrierenkonzept und sicherheitstechnischer Anforderungen grundsätzlich auch für das umhüllende Abfallinventar verwendet werden. Für die Planung der Anlagenauslegung (und insbesondere für die Festlegung der Anforderungen bzgl. Platzbedarf) wird vom umhüllenden Abfallinventar ausgegangen (aufgerundete Summe der Volumen in den Tab. 2.5-1a, 2.5-1b, 2.5-1c, s. auch Anhang 2).

Ausgangspunkt für die orientierenden sicherheitstechnischen Betrachtungen ist das Szenario, welches die Abfälle aus den bestehenden KKW bei einer angenommenen Betriebsdauer von 50 Jahren und die Abfälle aus Medizin, Industrie und Forschung umfasst, bei einer Sammelperiode bis Ende Einlagerung der Abfälle aus den bestehenden KKW in das SMA-Lager (bis 2050). Dies schliesst auch die Abfälle der Kleinproduzenten sowie Abfälle von grossen Forschungseinrichtungen (Paul Scherrer Institut, CERN) und Stilllegungsabfälle von Forschungsreaktoren und -einrichtungen verschiedener Hochschulen und Universitäten ein. Die diesbezüglich erwarteten Abfallmengen sind in Tab. 2.5-1a aufgeführt.

Zur Illustration möglicher zusätzlicher Abfallmengen wird in Tab. 2.5-1b und c aufgezeigt, welche Abfallmengen bei einer Verlängerung der Betriebsdauer der bestehenden KKW sowie einer Verlängerung der Sammelperiode der Abfälle aus dem MIF-Bereich um 10 Jahre bzw. bei einer zusätzlichen Elektrizitätsproduktion von 5 GWe während 60 Jahren[28] durch neue KKW zu erwarten wären. In Tab. 2.5-1c sind auch die wegen Verlängerung der Sammelperiode zusätzlich anfallenden MIF-Abfälle aufgeführt[29], die zusätzlich 25'000 m^3 Abfälle aus der Stilllegung von angenommenen neuen, noch nicht geplanten Forschungseinrichtungen einschliessen. Eine detaillierte Beschreibung der Abfalleigenschaften findet sich in Nagra (2008d).

---

[27] Als Input für die orientierenden sicherheitstechnischen Rechnungen (Abfallzuteilung, Ableitung der Anforderungen an die Geologie) wurde die Version des MIRAM vom September 2007 (Nagra 2007) verwendet. Die zurzeit aktuellste Version des MIRAM ist in Nagra (2008d) dokumentiert. Die Unterschiede zwischen den beiden Versionen haben einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Resultate der orientierenden sicherheitstechnischen Rechnungen und sind für die davon abgeleiteten Festlegungen bzgl. Abfallzuteilung und Anforderungen an die Geologie von keiner Bedeutung. Auch in Zukunft wird MIRAM periodisch aktualisiert.

[28] Dies entspricht einem Zeitraum von etwa 100 Jahren und würde den Ersatz der heute bestehenden KKW und der auslaufenden Lieferverträge mit Frankreich unter Berücksichtigung einer moderaten Zunahme des Strombedarfs abdecken (vgl. z.B. Angaben in Nuklearforum 2007).

Die Kernkraftwerk Niederamt AG (KKN), eine Tochtergesellschaft der Atel Holding AG, hat am 9. Juni 2008 ein Rahmenbewilligungsgesuch für ein neues Kernkraftwerk im solothurnischen Niederamt eingereicht.

Axpo und BKW haben angekündigt, dass auch sie im Jahr 2008 Rahmenbewilligungsgesuche für zwei neue KKW einreichen wollen im Zusammenhang mit der sich abzeichnenden Produktionslücke in der Höhe von ca. 3'200 MW_e.

[29] Sammelperiode bis Ende Einlagerung der Abfälle aus den neuen KKW in das SMA-Lager (modellhafte Annahme: bis 2120).

Tab. 2.5-1a: Abfallmengen in Kubikmeter (gerundet) bei 50 Jahren Betriebszeit der bestehenden KKW und einer Sammelperiode der Abfälle aus dem MIF-Bereich bis 2050.

Erläuterung: Volumen der konditionierten Abfälle und Volumen, bei denen die konditionierten Abfälle zusätzlich in Endlagerbehälter verpackt sind (Zahlen in Klammern). Die Angaben sind gegliedert nach Kategorien gemäss KEV Art. 51 (HAA: hochaktive Abfälle, ATA: alphatoxische Abfälle, SMA: schwach- und mittelaktive Abfälle) und bezüglich Herkunft (BE: abgebrannte Brennelemente; HAA: verglaste hochaktive Abfälle aus der Wiederaufarbeitung; WA-MA: mittelaktive Abfälle aus der Wiederaufarbeitung; BA: Betriebsabfälle der KKW (inkl. austauschbarer Kernkomponenten der KKW (RA)); SA: Stilllegungsabfälle der KKW; MIF: Abfälle aus Medizin, Industrie und Forschung; BEVA: Abfälle aus dem Betrieb und der Stilllegung der Verpackungsanlage für BE und HAA).

Diese Tabelle ist identisch mit Tab. 2.2-1a in Nagra (2008b).

		Herkunft							**Total**
		BE	**HAA**	**WA-MA**	**BA**	**SA**	**MIF** [3]	**BEVA**	
Kategorie nach KEV	**HAA**	1'135 [1] (6'595)	115 [2] (730)				0.2 (2)		1'250 (7'325)
	ATA			200 [2] (1'320)	10 (40)		325 (920)		535 (2'280)
	SMA				7'645 (26'100)	28'885 (28'920)	27'270 (32'170)	2'220 (2'220)	66'020 (89'410)
	Total	1'135 (6'595)	115 (730)	200 (1'320)	7'655 (26'140)	28'885 (28'920)	27'595 (33'090)	2'220 (2'220)	67'805 (99'015)

[1] Entspricht 2'435 tU.

[2] Diese Abfälle resultieren aus der Wiederaufarbeitung von 1'140 tU.

[3] Darin enthalten sind auch die Abfälle aus der Stilllegung von Forschungseinrichtungen sowie für die Planung eine Reserve von 12'000 m^3 für heute noch nicht im Detail spezifizierte SMA-Abfälle, z.B. aus dem CERN und dem PSI. Es ist zu erwarten, dass es sich dabei ausschliesslich um SMA-Abfälle handelt.

Tab. 2.5-1b: Zusätzlich erwartete Abfallmengen in Kubikmeter (gerundet) bei einer Verlängerung der Betriebsdauer der bestehenden KKW um 10 Jahre und der Sammelperiode für die Abfälle aus dem MIF-Bereich um 10 Jahre (bis 2060).

Die angegebenen Abfallmengen werden verwendet zur Beurteilung des erforderlichen Platzbedarfs infolge möglicher zusätzlicher Abfallmengen. Erläuterungen: vgl. Tab. 2.5-1a.

Diese Tabelle ist identisch mit Tab. 2.2-1b in Nagra (2008b).

		Herkunft							**Total**
		BE	**HAA**	**WA-MA**	**BA**	**SA**	**MIF**	**BEVA**	
Kategorie nach KEV	**HAA**	270 [1)] (2'130)	–				–		270 (2'130)
	ATA			–	5 (5)		40 (120)		45 (125)
	SMA				1'085 (3'700)	–	445 (985)	280 (280)	1'810 (4'965)
	Total	270 (2'130)	–	–	1'090 (3'705)	–	485 (1'105)	280 (280)	2'125 (7'220)

[1)] Entspricht 575 tU.

Tab. 2.5-1c: Zusätzliche Abfallmengen in Kubikmeter (gerundet) bei einer optionalen Elektrizitätsproduktion von zusätzlich 5 GWe während 60 Jahren durch neue KKW.

Für die neuen KKW wird konservativ angenommen, dass die abgebrannten Brennelemente nicht der Wiederaufarbeitung zugeführt werden. Für die MIF-Abfälle werden die zusätzlichen Abfälle wegen Verlängerung der Sammelperiode bis Ende der Einlagerung der SMA-Abfälle der neuen KKW (bis 2120) und zusätzlich 25'000 m^3 Abfälle aus der Stilllegung von angenommenen neuen, noch nicht geplanten Forschungseinrichtungen aufgeführt.

Die angegebenen Abfallmengen werden verwendet zur Beurteilung des erforderlichen Platzbedarfs infolge möglicher zusätzlicher Abfallmengen. Erläuterungen: vgl. Tab. 2.5-1a.

Diese Tabelle ist identisch mit Tab. 2.2-1c in Nagra (2008b).

		Herkunft						**Total**
		BE	**HAA/WA**	**BA**	**SA**	**MIF**	**BEVA**	
Kategorie nach KEV	**HAA**	2'000 [1)] (10'265)	–					2'000 (10'265)
	ATA		–	125 (500)		280 (840)		405 (1'340)
	SMA		–	11'385 (38'785)	16'740 (16'740)	28'115 (31'895)	3'430 (3'430)	59'670 (90'850)
	Total	2000 (10'265)	–	11'510 (39'285)	16'740 (16'740)	28'395 (32'735)	3'430 (3'430)	62'075 (102'455)

[1)] Entspricht 4'800 tU.

2.5.3 Lagerkonzepte

Die technischen Barrieren des geologischen Tiefenlagers gewährleisten den primären Einschluss der Abfälle. Die meisten Radionuklide zerfallen innerhalb der technischen Barrieren auf ein insignifikantes Niveau, bevor sie ins geologische Umfeld freigesetzt werden. Die geologischen Barrieren ihrerseits liefern eine stabile bzw. schützende Umgebung für die technischen Barrieren und gewährleisten damit deren Langlebigkeit. Ferner bewirken die geologischen Barrieren eine effiziente Rückhaltung (mit entsprechendem radioaktiven Zerfall) für diejenigen Radionuklide, die aus den technischen Barrieren freigesetzt werden. Die Rückhaltekapazität der technischen Barrieren lässt sich durch eine geeignete Wahl des Wirtgesteins und des Lagerstandorts in einer tektonisch stabilen Region und geeigneter Tiefenlage weiter optimieren.

2.5.3.1 SMA-Lager

Im Rahmen der Planung wurde eine standortunabhängige modellhafte Auslegung des SMA-Lagers erarbeitet, welche die folgenden Elemente umfasst:

- Obertägige Empfangsanlage
- Zugangsstollen
- Schacht
- Zentraler Bereich
- Betriebstunnel und Anschlussstollen für die Lagerkavernen
- Testlager (*in-situ* Felslabor)
- Pilotlager für einen kleinen (aber repräsentativen) Teil der SMA
- Lagerkavernen für den Hauptteil der SMA

Der modellhafte Grundriss und die modellhaften Stollen- und Kavernenquerschnitte sind in Fig. 2.5-1 dargestellt. Der Zugang zu den untertägigen Lagerkavernen erfolgt über eine Rampe (Zugangsstollen) und einen (Lüftungs-) Schacht. Diese modellhafte Auslegung eines SMA-Lagers bildet die Grundlage für die generischen sicherheitstechnischen Betrachtungen.

Das System der technischen Sicherheitsbarrieren eines Tiefenlagers SMA umfasst die folgenden Komponenten:

- Abfallgebinde (vorwiegend 200-Liter Stahlfässer) mit den mehrheitlich in einer Zementmatrix konditionierten Rohabfällen
- Endlagerbehälter (Beton) mit den Abfallgebinden und dem porösen Verfüllmaterial (Zementmörtel); sperrige Stilllegungsabfälle werden zum Teil direkt in die Endlagerbehälter einzementiert
- Lagerkavernen mit den darin eingelagerten Endlagerbehältern und porösem Verfüllmaterial (Zementmörtel)
- Kavernenverkleidung (Beton)

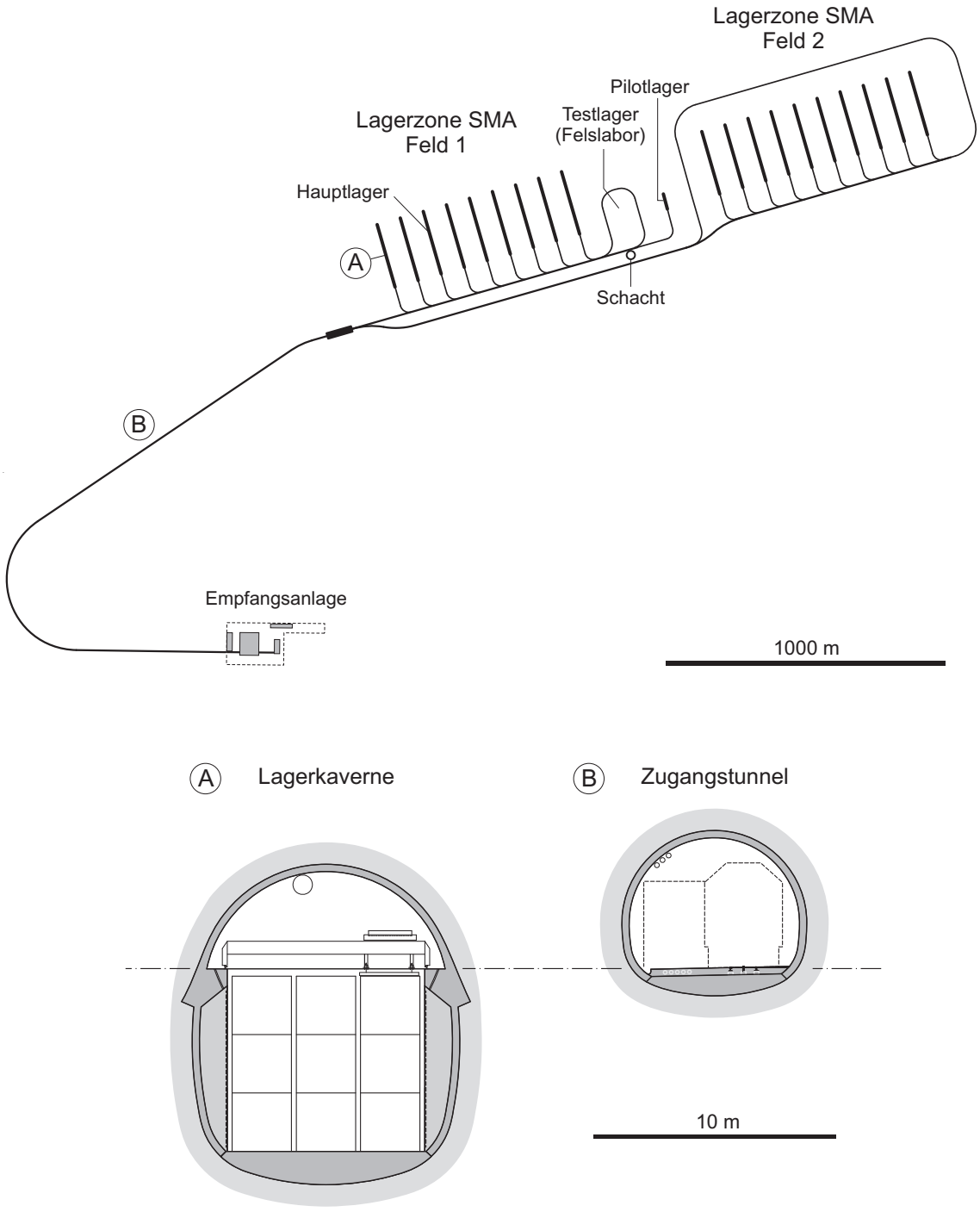


Fig. 2.5-1: Modellhafte Lagerauslegung SMA für das umhüllende Abfallinventar.

Lagerkavernen sowie Schlüsselstellen entlang der untertägigen Verbindungs- und Zugangstunnel werden durch spezifische Bauwerke hydraulisch versiegelt.

Für die Langzeitentwicklung des durch Zementmaterial dominierten SMA-Lagers werden für die sicherheitstechnischen Betrachtungen die folgenden Annahmen getroffen:

- Eine angemessene geologische Tiefenlage gewährleistet einen langfristigen Einschluss der radioaktiven Abfälle und schützt das SMA-Lager vor äusseren (mechanischen) Einwirkungen bzw. menschlichem Zugriff; die Tiefenlage verhindert eine unerwünscht frühe Freilegung des Lagerinhalts durch erosive Vorgänge.
- Das Wirtgestein soll seine sicherheitsrelevanten Eigenschaften über sehr lange Zeiträume aufrecht erhalten und die sicherheitsrelevanten Eigenschaften sollen durch die Gegenwart des Lagers (z.B. durch die Produktion von Gasen), durch geologische und klimatische Ereignisse sowie durch menschliche Aktivitäten nicht erheblich beeinträchtigt werden. Der Transport der Radionuklide wird durch die geringe hydraulische Durchlässigkeit des Wirtgesteins (und der einschlusswirksamen Gesteinsbereiche) stark eingeschränkt. Der versiegelte Zugangstunnel und der Schacht stellen keine bevorzugten Freisetzungspfade dar, obwohl ein beschränkter Radionuklidtransport entlang dieser bautechnischen Komponenten möglich ist.
- Das Material im SMA-Lager besteht zu über 90 Masse-% aus Beton und zu wenigen Prozenten aus Stahl, organischen Abfallkomponenten und anderen chemischen Stoffen. Beton (Zementstein und Zuschlagstoffe), sowie Stahl und ggf. organische Abfallstoffe bestimmen in Verbindung mit dem zufliessenden Tiefengrundwasser über lange Zeiträume die chemischen Eigenschaften des Nahfelds, welche für den Transport bzw. die Rückhaltung der Radionuklide von grosser Bedeutung sind.
- Die Radionuklide sorbieren vorwiegend an der Zementphase, welche durch das Tiefengrundwasser über lange Zeiträume kontinuierlich ausgelaugt wird. Die Korrosionsprodukte des Stahls bestimmen den Redox-Zustand des SMA-Nahfelds, welcher wiederum Auswirkungen hat auf die Sorption der Radionuklide. Es wird angenommen, dass sich das Porenwasser zu jedem Zeitpunkt im Gleichgewicht mit den entsprechenden Festphasen befindet. Damit ist in Verbindung mit möglichst geringen Grundwasserflüssen die Voraussetzung gegeben für günstige und stabile chemische Verhältnisse im SMA-Nahfeld.
- Damit die Verfüllung des Endlagerbehälters sowie die Kavernenverfüllung im vollen Umfang für die Rückhaltung der Radionuklide zur Verfügung steht, wird durch die Wahl eines geeigneten (porösen) Verfüllmörtels sichergestellt, dass keine signifikanten hydraulischen Kurzschlüsse (präferenzielle Fliesswege wie Risse oder Hohlräume) entstehen. Wie oben erwähnt, sorgt die grosse Zementmenge über lange Zeiträume für günstige chemische Bedingungen, welche sich vorteilhaft auf die Sorption der Radionuklide auswirkt.
- Die Freisetzung des Radionuklidinventars erfolgt in erster Linie mit dem Tiefengrundwasser durch die hydraulisch gesättigten Sicherheitsbarrieren und über die bautechnisch bedingte Auflockerungszone in das angrenzende Wirtgestein. Zugangs- und Verbindungsstollen sollen im jetzigen Zusammenhang und mit dem Hinweis auf die vorgesehenen Versiegelungsmassnahmen keine präferenziellen Fliesspfade darstellen, obwohl ein beschränkter Radionuklidfluss entlang dieser bautechnischen Komponenten grundsätzlich möglich ist.

Der lagerbedingten Gasproduktion durch Korrosion metallischer Abfall- und Systemkomponenten sowie durch mikrobiellen Abbau organischer Substanzen (insb. Zellulose) wird durch eine angepasste Lagerauslegung Rechnung getragen, so dass der Gasdruck in den Lagerkavernen selbst in dichten Wirtgesteinen keine unzulässigen Werte erreicht und auch keine gasinduzierte Freisetzung von Radionukliden entlang des Zugangstunnels erwartet wird (Wannenkonzept, poröse Verfüllmaterialien, gasdurchlässige Versiegelungsmaterialien, s. Nagra 2008h).

Im Folgenden wird dargestellt, wie die Schlüsselphänomene bzgl. Langzeitsicherheit für die einzelnen Systemkomponenten des Nahfelds modellhaft umgesetzt werden.

Organika und Komplexbildner im SMA-Rohabfall

Organische und anorganische Komplexbildner als Bestandteile (oder Degradationsprodukte) des Rohabfalls können die Sorption von Radionukliden im Endlagernahfeld signifikant vermindern. In Übereinstimmung mit der bisherigen Praxis (Nagra 1994b, 2002c) ist vorgesehen, diejenigen Abfallsorten, die Stoffe enthalten, die einen negativen Einfluss auf die Mobilität der Radionuklide im Zementnahfeld haben können (d.h. Abfallsorten, die entweder zu den ATA oder den SMA gehören), diesbezüglich zu analysieren und entsprechend dem Gehalt an solchen Stoffen in zwei Gruppen einzuteilen. Dabei werden der Gruppe 1 solche Abfälle zugeteilt, die im Hinblick auf eine mögliche Beeinträchtigung der geochemischen Rückhaltemechanismen nur geringe Konzentrationen von Störstoffen enthalten, der Gruppe 2 alle übrigen Abfälle. Sowohl im geologischen Tiefenlager SMA als auch HAA (LMA-Teil) ist vorgesehen, die beiden Gruppen in räumlich getrennten Lagerteilen (Kavernen resp. Tunnel) einzulagern. Für die sicherheitstechnischen Rechnungen werden den zwei Abfallgruppen unterschiedliche Sorptionsdatenbanken zugeordnet, die den Gehalt an Störstoffen berücksichtigen.

Die folgenden Kriterien bezüglich im Abfall vorhandener Stoffe wurden für die Zuteilung zu Gruppe 2 berücksichtigt:

- Ein hoher Gehalt an organischen Stoffen kann durch mikrobiologisch katalysierte Zersetzung zu CH_4 und CO_2 und damit zu Zementdegradation führen (Verlust eines wesentlichen Teils des sorbierenden Zementsteins).
- Ein Gehalt an Zellulose, welcher durch Zersetzung im alkalischen Milieu des Zements zu Mengen an komplexbildenden Verbindungen (hauptsächlich Isosaccharinsäure) führt, bewirkt unter Lagerbedingungen eine Reduktion der Sorption von Radionukliden an Zement (Van Loon & Glaus 1998).
- Gehalte an organischen oder anorganischen Verbindungen, wie EDTA oder Berliner Blau (kann Cyanid freisetzen) erhöhen durch Komplexbildung die Mobilität von Radionukliden.
- Ein hoher Nitratgehalt kann mikrobiologisch katalysiert zu unerwünschten oxidierenden Bedingungen führen.

Abfallmatrix

Für die sicherheitstechnischen Betrachtungen wird angenommen, dass sich das Radionuklidinventar zum Zeitpunkt der Freisetzung homogen über die wässrige Phase und die Zementphase der Abfallmatrix, des Endlagerbehälters (inklusive poröse Verfüllung) sowie der Verfüllung der Lagerkavernen – unter Berücksichtigung eines linearen Sorptionsgleichgewichts und der Zugehörigkeit des Abfalls zur entsprechenden Abfallgruppe – verteilt hat. Die Radionuklid-Rückhaltung in der Abfallmatrix[30], in den Abfallgebinden und in den Endlagerbehältern wird dabei konservativ vernachlässigt.

Bei der Berechnung des Sorptionsgleichgewichts wird berücksichtigt, dass der Zementstein der zementierten Nahfeldbarrieren durch den kontinuierlichen Austausch des Porenwassers ausgelaugt werden kann, indem die für die Sorption wichtigen Festphasen (insbesondere Hydrate von Aluminium-, Calcium-, Eisen- und Siliziumoxiden sowie Alkalihydroxide) aufgelöst und in Sekundärphasen (insbesondere Calcit) umgewandelt werden. Vereinfacht bedeutet dies für die Modellierung, dass sich die Sorptionskoeffizienten für das anfänglich intakte Zementsystem in Abhängigkeit des Wasserflusses durch die Kavernen und linear mit der Zeit in die Werte für ein Calcitsystem umwandeln (Nagra 2008j). Dieser Prozess ist abhängig vom Wasserfluss und ist

[30] Ausnahme: Freisetzung von C-14 aus metallischen Komponenten in gewissen Abfallsorten.

unter den erwarteten Bedingungen sehr langsam. So wurde im Projekt Entsorgungsnachweis für die LMA-Tunnel im Opalinuston gezeigt, dass selbst nach einer Million Jahren noch mit einem intakten Zementnahfeld gerechnet werden kann.

Die (elementspezifischen) Löslichkeitslimiten sind in Anbetracht der geringen Radionuklidkonzentrationen in einem SMA-Lager nur von untergeordneter Bedeutung und werden in den Rechenmodellen konservativ ausser Acht gelassen.

Abfallbehälter

Der Abfallbehälter (typischerweise 200-Liter Stahlfass) ist hauptsächlich für die Handhabung der Abfälle von Bedeutung; ihm wird in den sicherheitstechnischen Betrachtungen in Bezug auf das langzeitliche Einschlussvermögen keine Barrierenwirkung zugeordnet.

Endlagerbehälter, Endlagerbehälterverfüllung und Zementverfüllung der Lagerkavernen

Obwohl aus armiertem Beton fabriziert, werden in den hier durchgeführten sicherheitstechnischen Betrachtungen dem Endlagerbehälter keine speziellen hydraulischen Eigenschaften zugeordnet; d.h. die hydraulische Durchlässigkeit der Containerwände entspricht modellhaft derjenigen der Abfallmatrix, der Containerverfüllung und der Zementverfüllung der Lagerkavernen (konservative Vereinfachung). In Bezug auf die Sorption der Radionuklide wurden für die Containerwände dieselben Gesetzmässigkeiten wie für die übrigen Nahfeldkomponenten angenommen.

Kavernenauskleidung

Im aktuellen Modellkonzept wird der Kavernenverkleidung keine spezielle hydraulische Barrierenwirkung zugeordnet; d.h. der Wasserfluss durch das Innere der Lagerkavernen wird vorwiegend durch die hydraulischen Eigenschaften des Wirtgesteins bestimmt.

Bezüglich der Sorption werden für die Kavernenverkleidung dieselben Modellannahmen getroffen wie für das Kaverneninnere (Abfallmatrix, Endlagerbehälter, Endlagerbehälterverfüllung und Zementverfüllung der Lagerkavernen).

Wirtgestein und Auflockerungszone

Das Wirtgestein bzw. die Auflockerungszone um die Lagerkavernen sind wichtige Bestandteile des Nahfeldmodells, welche direkten Bezug nehmen auf die zu betrachtende hydrogeologische Gesamtsituation des SMA-Lagers. Die hydraulischen Kennwerte des Wirtgesteins (hydraulische Durchlässigkeit und Gradient) legen weitgehend den Wasserfluss durch das System der technischen (Nahfeld-) Barrieren fest.

Tunnelverfüllung und Versiegelung

Im Fall einer Ausrichtung der Lagerkavernen parallel zum Grundwasser-Strömungsfeld (Längsdurchströmung) umfasst das in den sicherheitstechnischen Rechnungen verwendete geometrische Modell des SMA-Lagers zusätzlich einen vereinfacht abgebildeten Umladebereich und Zugangsstollen, während diese beiden Komponenten bei querdurchströmter Lagergeometrie nicht berücksichtigt werden.

Für den Beginn der Freisetzung wird in den sicherheitstechnischen Rechnungen konservativ angenommen, dass sich das Radionuklidinventar bereits homogen über das Porenwasser und die Festphasen des gesamten Kaverneninneren verteilt hat und sich die wässrige Phase mit den sorbierten Anteilen im geochemischen Gleichgewicht befindet. Die Radionuklidsorption in den Komponenten des zementierten Nahfelds wird durch elementspezifische Sorptionskoeffizienten beschrieben, welche die organischen Materialanteile im Rohabfall sowie die kontinuierliche Degradation (Auslaugung) des Zements berücksichtigen.

Der Radionuklidtransport erfolgt advektiv/dispersiv bzw. diffusiv aus dem (modellhaft) als homogen angenommenen Kaverneninneren (Abfallmatrix, Endlagerbehälter inklusive Verfüllung, Kavernenverfüllung) unter Berücksichtigung der Sorption und des radioaktiven Zerfalls durch die Kavernenverkleidung und die Auflockerungszone ins umgebende Wirtgestein.

Tab. A3.2-1 fasst die wichtigsten Modellparameter für die Berechnung der Radionuklidfreisetzung aus dem SMA-Lager zusammen.

Die in den Modellrechnungen verwendeten Sorptionsdaten für das ursprüngliche Zementsystem sowie für das später zu erwartende Calcitsystem sind getrennt nach Abfallgruppe 1 und 2 (ohne signifikante Mengen an komplexbildenden Substanzen bzw. mit Komplexbildnern) in Tab. A3.2-3 aufgelistet.

Numerisches Modell zur Berechnung der Radionuklidfreisetzung aus dem Nahfeld

VPAC, oder *Versatile Performance Assessment Code*, berechnet den zwei- bzw. dreidimensionalen Grundwasserfluss und Radionuklidtransport in homogenen oder heterogenen (geklüfteten) gesättigten Medien, welche das Barrierensystem eines geologischen Tiefenlagers und das umgebende Wirtgestein abbilden. Das Programm berücksichtigt ein elementspezifisches lineares Sorptionsgleichgewicht zwischen Lösung und Festphase, ggf. eine limitierte elementspezifische Löslichkeit der Radionuklide sowie den radioaktiven Zerfall bzw. den radioaktiven Aufbau im Fall von Zerfallsketten.

Die Radionuklide liegen entweder von Beginn in vollständig mobilisierter Form vor oder werden mit einer durch den Benutzer zu spezifizierenden konstanten bzw. zeitabhängigen Rate aus der Abfallmatrix freigesetzt. Der Transport erfolgt advektiv/dispersiv bzw. diffusiv in den einzeln als homogen-porös charakterisierbaren Materialklassen (bautechnische Lagerkomponenten, Auflockerungszone, Klüfte bzw. Störungszonen, ungestörte Gesteinsmatrix).

VPAC benützt eine (gemischte Hybrid-) Finite-Elemente-Methode für die numerische Lösung der entsprechenden Transportgleichungen. Dieser Ansatz ermöglicht die Berechnung exakter Flussraten an beliebigen Grenzflächen innerhalb des Modellgebiets. Ferner kann die Zeitabhängigkeit von Modellparametern bzgl. Hydraulik (hydraulische Durchlässigkeit) und Sorption berücksichtigt werden. Dies ermöglicht z.B. eine zeitabhängige Degradation des Zementnahfelds aufgrund des Wasserflusses bzw. deren Einfluss auf die Radionuklidsorption zu modellieren.

Eine vollständige Beschreibung des neu entwickelten Programms VPAC inklusive der zu Grunde liegenden Modellannahmen, Beschreibung der Parameter und Resultate der Programmverifikation ist in Nagra (2008f) gegeben.

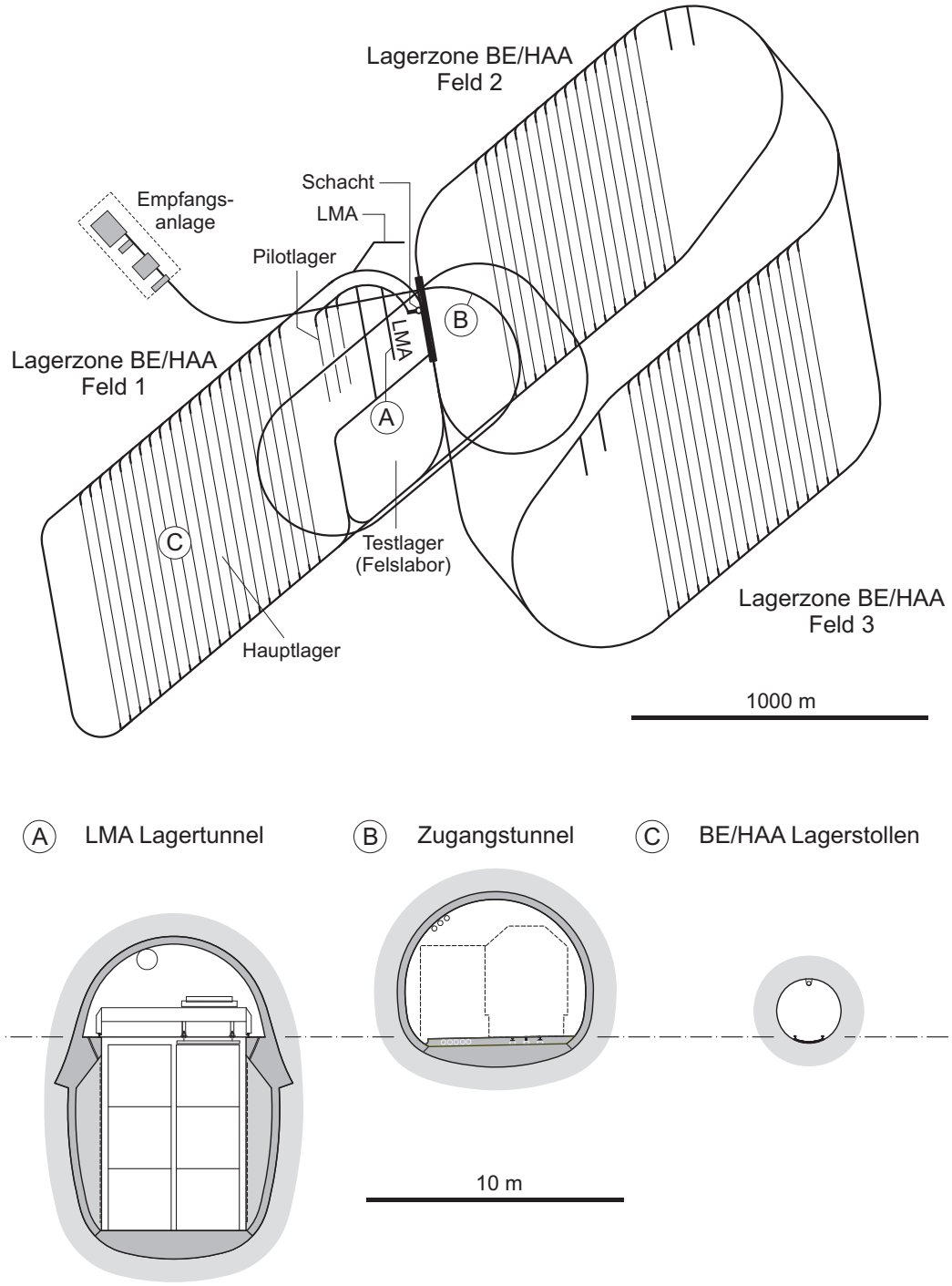


Fig. 2.5-2: Modellhafte Lagerauslegung HAA für das umhüllende Abfallinventar.

2.5.3.2 HAA-Lager

Das geologische Tiefenlager für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive Abfälle und langlebige mittelaktive Abfälle setzt sich aus den folgenden Systemkomponenten zusammen:

- Tunnelsystem bestehend aus Zugangsrampe, Bau- und Betriebstunnel, zentrale Empfangsanlage und Vertikalschacht

- Testlager (untertägiges Felslabor) zur Beschaffung der notwendigen (hydrogeologischen, geomechanischen und geochemischen) Informationen vor dem eigentlichen Bau der Lagerstollen resp. -tunnels und dem Beginn des Einlagerungsbetriebs
- Pilotlager für einen kleinen, aber repräsentativen Teil der Abfälle; als Informationsquelle bezüglich des Verhaltens der technischen Barrieren und zur Überprüfung voraussagender Modelle
- Hauptlager bestehend aus einer Anordnung von (parallelen) Lagerstollen von 800 m Länge im Abstand von 40 m
- Lagertunnels für langlebige mittelaktive Abfälle (LMA)

Der modellhafte Grundriss und die modellhaften Stollen-/Tunnelquerschnitte sind in Fig. 2.5-2 dargestellt.

Das System der technischen Barrieren eines geologischen Tiefenlagers HAA umfasst die Brennstoffmatrix und die Zirkaloy-Hüllrohre bei den abgebrannten Brennelementen bzw. die Glasmatrix und die dünnwandige Stahlkokille bei den hochaktiven Abfällen aus der Wiederaufarbeitung. Die HAA werden in massiven Endlagerbehältern eingeschlossen, welche ihrerseits vollständig eingeschlossen sind von stark tonhaltigem Verfüllmaterial (Bentonitgranulat). Die Lagerung erfolgt horizontal in der Achse der entsprechenden Lagerstollen, welche an beiden Enden versiegelt werden. Mit diesem System wird sichergestellt, dass relativ geringe Abfallvolumen durch erhebliche Mengen von Barrierenmaterialien umgeben sind, womit die Stabilität der physikalischen und chemischen Eigenschaften der technischen Barrieren über lange Zeiträume gewährleistet wird (Pufferkapazität).

Die langlebigen mittelaktiven Abfälle (LMA) werden in Endlagerbehälter, welche entweder die Abfallgebinde oder direkt die einzulagernden Abfälle (z.B. metallische Stilllegungsabfälle) enthalten, verpackt und mit Zementmörtel verfüllt. Die mit Beton ausgekleideten horizontalen Einlagerungstunnel mit den Endlagerbehältern werden mit Zementmörtel verfüllt und anschliessend versiegelt.

Für die Langzeitentwicklung des HAA-Lagers werden für die sicherheitstechnischen Betrachtungen die folgenden Annahmen getroffen:

- Eine angemessene Tiefenlage des HAA-Lagers soll die Isolation der radioaktiven Abfälle vom menschlichen Lebensraum über sehr lange Zeiträume gewährleisten.
- Das Wirtgestein soll seine sicherheitsrelevanten Eigenschaften über sehr lange Zeiträume aufrecht erhalten und die sicherheitsrelevanten Eigenschaften sollen durch die Gegenwart des Lagers (z.B. durch die Produktion von Gasen), durch geologische und klimatische Ereignisse sowie durch menschliche Aktivitäten nicht erheblich beeinträchtigt werden. Der Transport der Radionuklide wird durch die geringe hydraulische Durchlässigkeit des Wirtgesteins (und der einschlusswirksamen Gesteinsbereiche) stark eingeschränkt. Der versiegelte Zugangstunnel und der Schacht stellen keine bevorzugten Freisetzungspfade dar, obwohl ein beschränkter Radionuklidtransport entlang dieser bautechnischen Komponenten möglich ist.
- Die günstigen chemischen Bedingungen werden für sehr lange Zeiten Bestand haben und damit die Voraussetzung schaffen für eine geochemische Immobilisierung und Rückhaltung der Radionuklide.
- Im Fall der abgebrannten Brennelemente und der verglasten hochaktiven Abfälle stellt die Bentonitverfüllung eine gut definierte Schnittstelle zwischen den Endlagerbehältern und

dem Wirtgestein dar; sie wird ihre sicherheitsrelevanten (d.h. geomechanischen und geochemischen) Eigenschaften über sehr lange Zeiträume aufrecht erhalten.

- Im Fall der abgebrannten Brennelemente und der verglasten hochaktiven Abfälle wird die Abfallmatrix nach dem Versagen der Endlagerbehälter die meisten Radionuklide für sehr lange Zeiten zurückbehalten.
- Die Endlagerbehälter für abgebrannte Brennelemente und verglaste hochaktive Abfälle gewährleisten für eine beträchtliche Zeit einen absoluten Einschluss der Radionuklide.

Im Folgenden wird dargelegt, wie die Schlüsselphänomene bzgl. Langzeitsicherheit für die einzelnen Systemkomponenten des Nahfelds in den sicherheitstechnischen Betrachtungen modellhaft umgesetzt werden.

Abgebrannte Brennelemente und verglaste hochaktive Abfälle

Brennstoffmatrix und Zirkaloy-Hüllrohre

Für die orientierenden sicherheitstechnischen Rechnungen wird angenommen, dass die Freisetzung eines gewissen Aktivitätsanteils (*instant release fraction* IRF) sofort nach dem Versagen des Endlagerbehälters erfolgt (konservative Vernachlässigung des Einschlusses der Brennstofftabletten in den Hüllrohren), während die übrigen Anteile kongruent mit der sich proportional zur vorhandenen Alpha-Aktivität auflösenden Brennstoffmatrix freigesetzt werden. Für das Isotop ^{14}C aus dem Brennstoff (inklusive IRF) wird eine anorganische Verbindungsform angenommen, während für ^{14}C aus den Zirkaloy-Hüllrohren (inklusive IRF aus den Hüllrohren) eine organische Form unterstellt wird. Damit enthält die IRF sowohl eine organische als auch eine anorganische Komponente für ^{14}C.

Für die Zirkaloy-Hüllrohre wird eine 20-prozentige IRF von ^{14}C angenommen (Nagra 2002c). Die übrigen Radionuklide aus den Hüllrohren werden kongruent mit der Hüllrohrkorrosion freigesetzt, wobei eine konstante Korrosionsrate unterstellt wird.

Glasmatrix

Das Glas liefert eine korrosionsresistente und feste Matrix für die hochaktiven Abfälle aus der Wiederaufarbeitung. Nach dem Behälterversagen gelangt das Porenwasser in Kontakt mit dem Glaskörper und löst diesen mit einer konstanten Rate langsam auf. Es wird angenommen, dass der Glaskörper aufgrund von thermischen Beanspruchungen in kleinen Bruchstücken vorliegt; d.h. die für die Korrosion verfügbare Glasoberfläche ist bedeutend grösser als die Oberfläche des monolithischen Glaskörpers.

Endlagerbehälter

Für den Endlagerbehälter wird eine (Auslegungs-) Lebensdauer von 10'000 Jahren nach Einlagerung vorausgesetzt – ein Wert, der in Realität weit überschritten werden dürfte (Johnson & King 2003). Wegen bestehender Ungewissheiten hinsichtlich Korrosionsrate, Korrosionsmodus (evtl. Lochfrass), mechanischer Beanspruchung sowie Einzelheiten des Behälterversagens wird aber auf eine realistischere Annahme verzichtet.

Bentonitverfüllung

Der Transport der Radionuklide durch den kompaktierten Bentonit wird mit einer elementspezifischen scheinbaren (apparenten) Diffusionskonstante beschrieben. Die apparente Diffusions-

konstante wird gewöhnlich als Quotient einer Porendiffusionskonstanten und eines Retentionsfaktors ausgedrückt. Die Porendiffusionskonstante berücksichtigt die Rückhaltung der Radionuklide durch die Tortuosität und Konstriktivität des Bentonit-Porenraums und insgesamt auf Grund verschiedener physikalisch-chemischer Prozesse wie z.B. Ionenausschluss. Der Retentionsfaktor beinhaltet die Rückhaltung basierend auf der chemischen Wechselwirkung (Sorption) der Radionuklide mit den Mineraloberflächen des Bentonits. Die geringe Löslichkeit[31] vieler Schlüsselradionuklide ist eine wichtige Begrenzung für deren Konzentration im Porenwasser und limitiert damit die Diffusion durch die Bentonit-Barriere. Die elementspezifischen Löslichkeitslimiten und die Gleichgewichts-Verteilungskoeffizienten (Sorptionskoeffizienten) zur Berechnung des Retentionsfaktors für das (Bentonit-) Nahfeld wurden im Rahmen der vorliegenden Studie neu zusammengestellt und sind im Anhang 3 aufgeführt.

Tab. A3.2-5 und A3.2-6 fassen die relevanten Modellparameter als Basis für die Berechnung der Nahfeldfreisetzung für den Fall der HAA zusammen. In Tab. A3.2-7 sind die elementspezifischen Eigenschaften (Löslichkeitslimiten, effektive Diffusionskoeffizienten, Sorptionskonstanten und Porositätsfaktoren) und in Tab. A3.2-8 die zeitabhängigen Auflöseraten für die Brennstoffmatrix der Brennelemente zusammengestellt.

Tunnelverfüllung und Versiegelung

Bei Lagerverschluss werden Zugangsrampe, Tunnel und der Schacht verfüllt und an geeigneten Schlüsselstellen mit hochqualitativen Elementen versiegelt.

Langlebige mittelaktive Abfälle

Gestützt auf eine geschätzte Zeitdauer für die vollständige Aufsättigung des Lagersystems sowie die anfängliche Immobilisierung der Radionuklide innerhalb der Endlagerbehälter wird für die Berechnung der Radionuklidfreisetzung aus den LMA-Tunneln angenommen, dass die Freisetzung frühestens 100 Jahre nach Einlagerung beginnen kann (Nagra 2002c). Nach diesem Zeitpunkt wird eine Immobilisierung (z.B. für Aktivierungsprodukte in den "Hülsen und Endstücken") konservativerweise vernachlässigt.

Für den Beginn der Freisetzung wird angenommen, dass sich die Radionuklide bereits gleichmässig bis über die Zementverfüllung der Lagerkammern ausgebreitet und sich mit dem entsprechenden Porenwasser vermischt haben und dass sich die gelöste, sorbierte und ausgefällte Phase im geochemischen Gleichgewicht befindet. Für die Sorption wird ein lineares Gleichgewicht auf Grundlage elementspezifischer Sorptionskoeffizienten in einem Zement-Milieu unterstellt. Ferner sind die Radionuklidkonzentrationen im Porenwasser durch die entsprechenden (elementspezifischen) Löslichkeitslimiten begrenzt, wobei es zur Ausfällung kommt, falls die Konzentrationen (summiert über alle Isotope) die elementspezifischen Limiten überschreiten bzw. zu einer Wiederauflösung, falls die Konzentrationen fallen.

Tab. A3.2-2 gibt eine Übersicht über wichtige Modellparameter für die Modellierung der (diffusiven) Radionuklidfreisetzung aus dem LMA-Lager.

[31] Die "Löslichkeitslimite" bezeichnet den Nahfeldparameter, welcher die maximale Lösungskonzentration definiert, welche durch das betrachtete chemische Element erreicht werden kann; jede weitere Zugabe des Elements führt zu einer chemischen Ausfällung einer Festphase.

Numerisches Modell zur Berechnung der Radionuklidfreisetzung aus dem Nahfeld

Das Nahfeldmodell für das HAA-Lager mit abgebrannten Brennelementen, verglasten hochaktiven Abfällen bzw. langlebigen mittelaktiven Abfällen wurde in einem Programm mit der Bezeichnung STMAN formalisiert. Das Programm berechnet

im Fall der hochaktiven Abfälle

- die Freisetzung der Radionuklide aus der Abfallmatrix ins Bentonit-Porenwasser unter Berücksichtigung der beschränkten (elementspezifischen) Löslichkeiten (ab dem Zeitpunkt des Behälterversagens)
- die Diffusion der Radionuklide durch die Bentonitverfüllung
- die Freisetzung der Radionuklide ins Porenwasser an der Schnittstelle Bentonit–Wirtgestein

im Fall der langlebigen mittelaktiven Abfälle[32]

- die Mobilisierung der Radionuklide im Zement-Porenwasser unter Berücksichtigung der Löslichkeit und der Sorption
- die Diffusion der Radionuklide durch die Tunnelverkleidung
- die Freisetzung der Radionuklide ins Grundwasser an der Schnittstelle Tunnelverkleidung–Wirtgestein

Eine vollständige Beschreibung von STMAN, inklusive der zu Grunde liegenden Modellannahmen, Beschreibung der Parameter und der Resultate der Programmverifikation ist in Nagra (2002d) gegeben.

2.5.4 Geosphäre

Die Bedeutung des geologischen Umfelds für den Sicherheitsnachweis eines geologischen Tiefenlagers liegt in der Begrenzung des Wasserflusses durch das Tiefenlager, im Schutz des technischen Barrierensystems vor mechanischen Einwirkungen, der Gewährleistung eines günstigen und langzeitlich stabilen chemischen Milieus und in der Verringerung der Radionuklidfreisetzung durch – im Verhältnis zu den Halbwertszeiten der zu betrachtenden Radionuklide – lange Transportzeiten.

In Bezug auf die Langzeitsicherheit wird die Wirksamkeit der Geosphäre als Barriere für den Radionuklidtransport einerseits durch die hydrogeologischen Eigenschaften und andererseits die geochemischen Verhältnisse des Wirtgesteins (WG) bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (EG) bestimmt. Vorteilhafte hydrogeologische Situationen zeichnen sich aus durch geringe Grundwasserfliessraten (Produkt aus hydraulischem Gradient und hydraulischer Durchlässigkeit), einem günstigen kleinräumigen Aufbau der wasserführenden Systeme (kleine Transmissivität, grosse Oberflächenbenetzung, diffusionszugängliche Porosität des Nebengesteins) und einem möglichst langen Migrationspfad zwischen den Lagerkammern und dem menschlichen Lebensraum (Biosphäre).

Die Rückhaltung der Radionuklide durch Sorption am Gestein führt für eine bedeutende Zahl von sicherheitsrelevanten Radionukliden zu einer signifikanten Reduktion der Aktivitätsfreisetzung aus der Geosphäre in die Biosphäre. Abhängig von der spezifischen Mineralogie von

---

[32] Für die Modellierung der LMA-Rechenfälle wurde z.T. auch das Programm VPAC benützt (s. Kap. 2.5.3.1, A4.3.2).

WG und EG ist es insbesondere eine günstige Porenwasserchemie, d.h. reduzierende chemische Bedingungen entlang des Transportpfads, ein annähernd neutraler pH-Wert, eine geringe Salinität und eine niedrige Konzentration von komplexbildenden chemischen Substanzen im Tiefengrundwasser, welche die Radionuklidfreisetzung in die Biosphäre begrenzt.

Die Radionuklidrückhaltung kann durch die Diffusion der Radionuklide in Gesteinsbereiche mit stagnierendem Porenwasser weiter verstärkt werden (Matrixdiffusion). Hingegen kann die Rückhaltung bei fehlender Filtration von Kolloiden aus dem Nahfeld und der Geosphäre, sowie speziell bei den Tiefenlagern SMA und LMA durch (organische) Komplexbildner aus den Abfällen und durch die pH-Fahne aus dem zementbefrachteten Nahfeld beeinträchtigt werden.

Im Folgenden werden die konzeptuellen Annahmen zur Geosphäre vorgestellt, welche für die generischen Sicherheitsbetrachtungen zur Ableitung von Varianten der Abfallzuteilung und von Anforderungen an das WG bzw. den EG sowie von Ansprüchen an die geologische Situation verwendet werden.

2.5.4.1 Konzeptualisierung des Wirtgesteins und der geologischer Situation

Der Zielsetzung des Sachplans geologische Tiefenlagerung (Etappe 1) entsprechend werden die sicherheitstechnischen Untersuchungen für ein breites Spektrum verschiedener generischer geologischer Situationen durchgeführt. In diesem Sinne werden die folgenden Möglichkeiten zur Konzeptualisierung des Wirtgesteins (WG) bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (EG) betrachtet:

- homogen-poröses WG (EG) mit isotroper bzw. anisotroper grossräumiger hydraulischer Durchlässigkeit
- engständig geklüftetes WG (EG)
- grossräumig gestörtes WG (EG)
- WG (EG) mit schichtförmig horizontalen Architekturelementen mit oder ohne Klüftung
- WG/EG mit unregelmässig horizontalen Architekturelementen mit oder ohne Klüftung

Erfolgt der Wasserfluss bzw. der Radionuklidtransport entlang diskreter wasserführender Strukturen (engständige Klüfte, grossräumige Störungszonen), können die gelösten Stoffe ins stagnierende Porenwasser der angrenzenden Gesteinsmatrix diffundieren (Matrixdiffusion).

Der advektive bzw. diffusive Transport wird durch die Sorption der Radionuklide auf den beteiligten Festphasen verlangsamt; dabei wird ein Gleichgewicht zwischen gelösten und sorbierten Stoffen angenommen, das durch einen elementspezifischen Gleichgewichts-Verteilungskoeffizienten (K_d) beschrieben wird.

a) Homogen-poröses Wirtgestein

Der Modellansatz für ein homogen-poröses WG/EG beschreibt ein Medium ohne diskrete wasserführende Strukturen wie beispielsweise engständige Klüfte oder grössere Störungszonen (s. Fig. 2.5-3a). Die Gesteinsmatrix zwischen diskreten wasserführenden Strukturen ist im Allgemeinen ebenfalls als homogen-poröses Medium charakterisierbar. Der Wasserfluss erfolgt innerhalb eines Systems verbundener Gesteinsporen und wird durch das Produkt der hydraulischen Durchlässigkeit (m/s) und des hydraulischen Gradienten (m/m) bestimmt. Bei hohen Wasserfliessraten wird der Transport gelöster Radionuklide durch die Advektion und die dazugehörige hydromechanische Dispersion bestimmt. Bei geringen Wasserfliessraten erfolgt der

Transport vorwiegend über die Diffusion. Die Rückhaltung der gelösten Radionuklide resultiert aus der Sorption der gelösten Radionuklide auf der Oberfläche der verbundenen Porenräume und wird durch einen Gleichgewichts-Verteilungskoeffizienten (K_d-Wert) ausgedrückt. Dieser Koeffizient ist abhängig von der Mineralogie und der Porenwasserchemie. Die Parametrisierung des homogen-porösen WG/EG ist in den Tab. A3.3-1, A3.3-2 und A3.3-3 dargestellt.

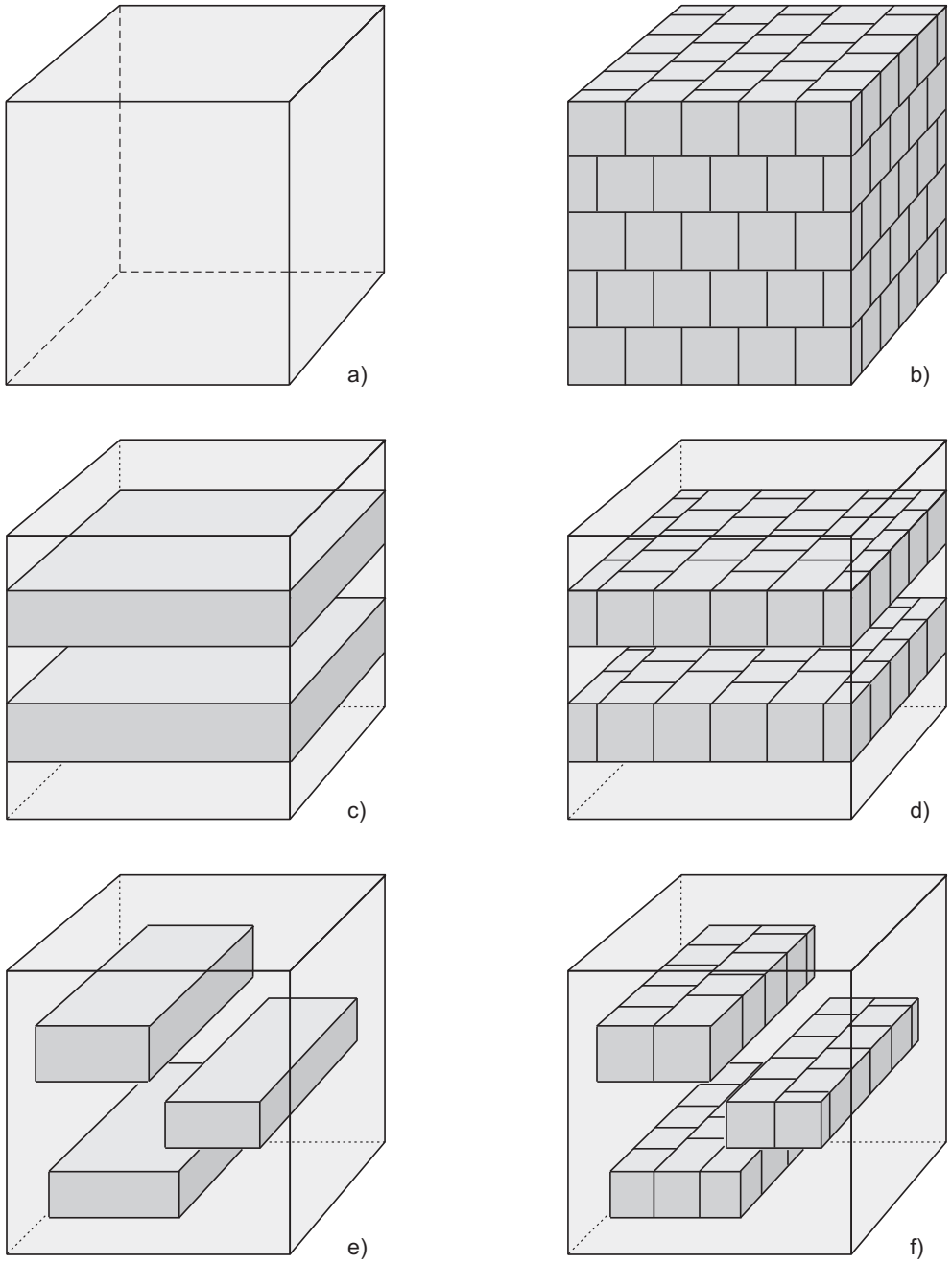


Fig. 2.5-3 Verschiedene Konzeptualisierungen des Wirtgesteins (WG) bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (EG).

a) homogen-poröses WG/EG; b) geklüftetes WG/EG; c) WG/EG mit schichtförmigen horizontalen Architekturelementen ohne Klüftung; d) mit Klüftung; e) WG/EG mit unregelmässigen linearen horizontalen Architekturelementen ohne Klüftung; f) mit Klüftung.

b) Geklüftetes Wirtgestein

Wirtgesteine bzw. Geosphären-Transportbereiche mit kleinräumigen wasserführenden Strukturen werden als geklüftete hydrogeologische Formationen beschrieben (Fig. 2.5-3 b).

Der Modellansatz für ein (engständiges, d.h. im Meterbereich) geklüftetes WG/EG beschreibt die hydrogeologische Situation mit advektivem Transport von gelösten Radionukliden vorwiegend innerhalb diskreter wasserführender Strukturen. Der Transport gelöster Radionuklide erfolgt advektiv-dispersiv mit der Möglichkeit, dass die gelösten Stoffe in den Porenraum der angrenzenden ungestörten Gesteinsmatrix hinein diffundieren (Matrixdiffusion) – mit einer Diffusionstiefe, die maximal dem halben Kluftabstand entspricht. Insgesamt führt die Matrixdiffusion zu einer verminderten effektiven Transportgeschwindigkeit innerhalb der Kluft.

Eine weitere Verzögerung des Transports erfahren die gelösten Radionuklide durch ihre Sorption in der angrenzenden Gesteinsmatrix. Die Sorption in der Gesteinsmatrix wird durch einen Gleichgewichts-Verteilungskoeffizienten (K_d-Wert m^3/kg) ausgedrückt. Dieser ist abhängig von der Mineralogie und der chemischen Zusammensetzung des Porenwassers.

Die Klüfte werden im Referenz-Modellansatz als planare und offene Strukturen (d.h. ohne Verfüllung) konzeptualisiert. Der spezifische Wasserfluss (pro Meter Kluftlänge) leitet sich ab aus dem Produkt der Klufttransmissivität (m^2/s) und dem hydraulischen Gradienten (m/m). In einem alternativen Modellansatz, in dem angenommen wird, dass es präferenzielle Fliesspfade *("Channels")* innerhalb der Klüfte gibt, wird die Auswirkung dieser Channels auf die Freisetzung von Radionukliden mit einer gegenüber dem Referenz-Modellansatz erhöhten Transmissivität abgeschätzt.

Die Parametrisierung des geklüfteten WG/EG ist in Tab. A3.3-4 dargestellt.

c) Wirtgestein mit schichtförmigen horizontalen Architekturelementen (ohne/mit Klüftung)

WG/EG mit schichtförmigen horizontalen Architekturelementen besteht entweder aus verschiedenen horizontalen Schichten von homogen-porösem Gestein (Fig. 2.5-3c) oder von alternierenden Schichten ohne/mit Klüftung (Fig. 2.5-3d). Für jede Schicht werden Angaben entsprechend Tab. A3.3-3 resp. Tab. A3.3-4 benötigt, je nach dem, ob es sich um homogen-poröses oder um geklüftetes Gestein handelt. Zusätzlich sind Angaben zu den Schichtmächtigkeiten und -abständen notwendig.

d) Wirtgestein mit unregelmässigen linearen horizontalen Architekturelementen (ohne/mit Klüftung)

WG/EG mit unregelmässigen linearen horizontalen Architekturelementen besteht aus homogenporösem Gestein mit Einschlüssen mit anderen hydraulischen und Transporteigenschaften. Diese Einschlüsse können entweder selbst aus homogen-porösem Gestein (Fig. 2.5-3e) oder aus geklüftetem Gestein (Fig. 2.5-3f) bestehen. Für die Einschlüsse werden Angaben entsprechend Tab. A3.3-3 resp. Tab. A3.3-4 benötigt, je nach dem, ob es sich dabei um homogen-poröses oder um geklüftetes Gestein handelt. Zusätzlich sind Angaben zu den Mächtigkeiten und zur Anordnung der Architekturelemente notwendig.

2.5.4.2 Störungszonen

Grundsätzlich kann jede der zuvor beschriebenen WG/EG-Situationen grossräumig wasserführende Strukturen (sogenannte Störungszonen) enthalten (Fig. 2.5-4).

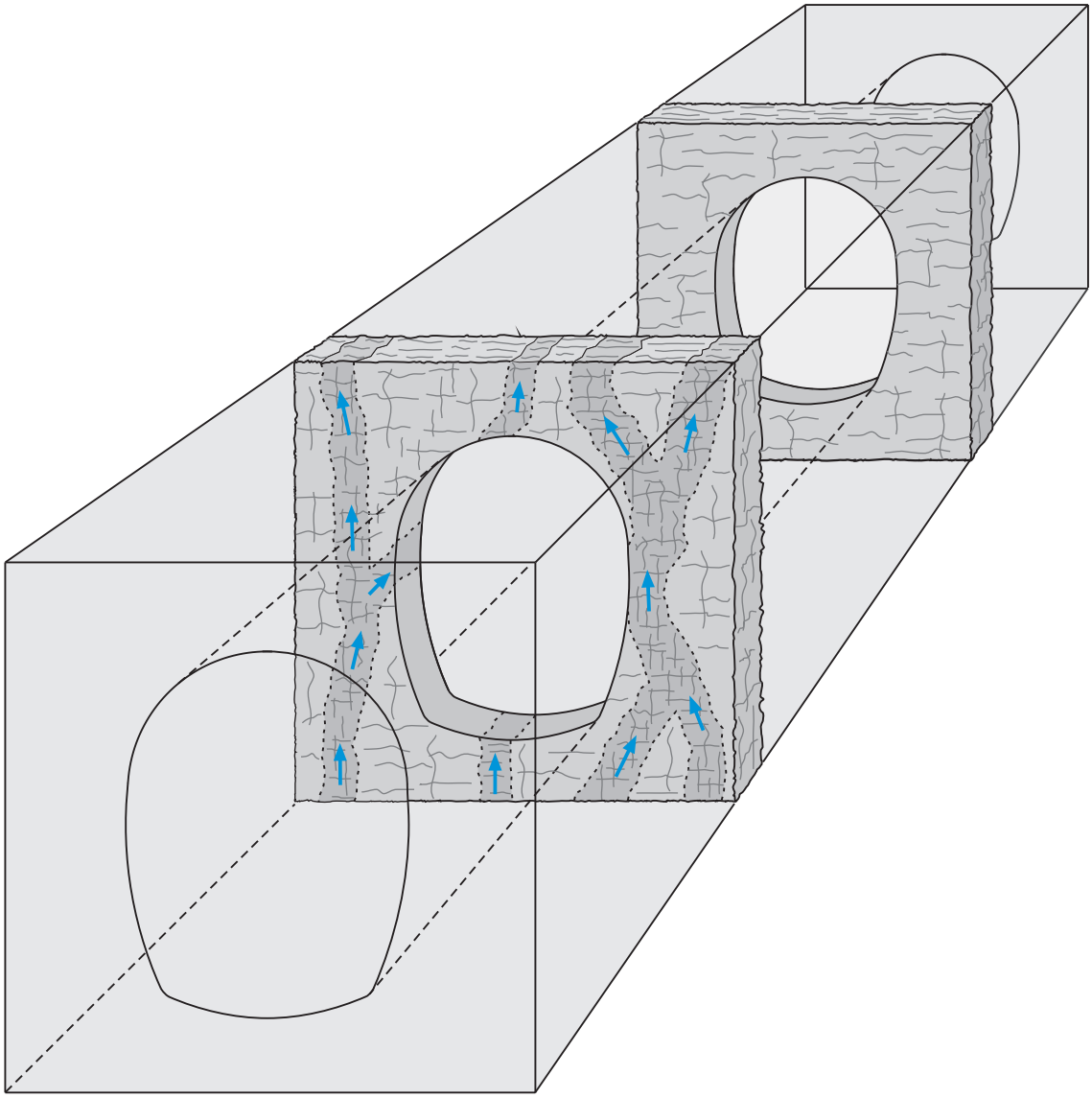


Fig. 2.5-4 Konzeptualisierung von Störungszonen, die eine SMA-Kaverne schneiden.

Allenfalls vorhandene präferenzielle Fliesspfade ("Channels") mit erhöhter Transmissivität sind in dunkelgrauer Farbe und mit blauen Pfeilen versehen eingezeichnet.

Der Modellansatz für ein WG/EG mit (steilstehenden) Störungszonen mit typischen Abständen im 100-Meterbereich beschreibt die hydrogeologische Situation mit Wasserfluss und Transport von gelösten Radionukliden innerhalb diskreter wasserführender Strukturen, ggf. kombiniert mit Wasserfluss und Transport im dazwischen liegenden Gestein.

Der spezifische Wasserfluss (pro Meter Spurlänge der Störungszone) in den diskreten wasserführenden Strukturen leitet sich ab aus dem Produkt der Transmissivität (m^2/s) und dem hydraulischen Gradienten (m/m). Allenfalls vorhandenen präferenziellen Fliesskanälen innerhalb der hydraulisch inhomogenen Störungszonen ("Channeling") wird mit einer erhöhten Transmissivität Rechnung getragen.

Der Transport gelöster Stoffe in den Störungszonen erfolgt advektiv-dispersiv mit der Möglichkeit, dass die gelösten Radionuklide in den Porenraum des angrenzenden Gesteins hinein diffundieren – entweder mit begrenzter oder unbegrenzter Diffusionstiefe. Insgesamt führt die Matrixdiffusion für die meisten Radionuklide (kombiniert mit Sorption an den Porenwänden) zu einer verminderten effektiven Transportgeschwindigkeit innerhalb der Störungszone und ist ein sehr wirksamer Retentionsprozess.

Eine weitere Verzögerung des Transports erfahren die gelösten Stoffe durch ihre Sorption innerhalb der Verfüllung der Störungszone.

Die Sorption im Porenraum der Verfüllung und im angrenzenden Gestein wird durch einen Gleichgewichts-Verteilungskoeffizienten (K_d-Wert, m^3/kg) ausgedrückt. Dieser ist abhängig von der Mineralogie und der Porenwasserchemie.

Im Sinne einer generischen Betrachtungsweise (d.h. nicht gesteinsspezifisch) ist die hydrogeologische Parametrisierung von Störzonen in Tab. A3.3-5 dargestellt.

Numerische Modelle für den Geosphärentransport

Die Modellierung des advektiv-dispersiven bzw. diffusiven Radionuklidtransports durch die Geosphäre erfolgt im Rahmen der folgenden beiden Programme:

- VPAC, oder *Versatile Performance Assessment Code*, berechnet den zwei- bzw. dreidimensionalen (zeitabhängigen) Grundwasserfluss und Radionuklidtransport in homogenen oder heterogenen gesättigten Medien unter Berücksichtigung einer linearen (zeitabhängigen) Sorption und des radioaktiven Zerfalls. Die entsprechenden Transportgleichungen werden auf Grundlage einer (gemischten Hybrid-) Finite-Elemente-Methode gelöst. Kap. 2.5.3.1 enthält eine kurze Beschreibung des Programms; für eine detaillierte Beschreibung siehe Nagra (2008f).
- Das Programm PICNIC berechnet den Transport gelöster Radionuklide in der Geosphäre, die zu diesem Zweck als Netzwerk von eindimensionalen Transportpfaden (sogenannten PICNIC-"Legs") mit konsistenten Wasserflussraten abgebildet wird. Die "Legs" repräsentieren beispielsweise poröse Transportdomänen oder diskrete wasserführende Strukturen wie Klüfte, Störungszonen oder Kanäle, mit der Möglichkeit einer Diffusion der Radionuklide in das stagnierende Porenwasser der angrenzenden (homogenen oder heterogenen) Gesteinsmatrix. Das Programm berücksichtigt eine lineare Sorption der Radionuklide auf den beteiligten Festphasen und den radioaktiven Zerfall (s. Appendix A1.6 in Nagra 2002d).

Modellkonfiguration mit VPAC

Wirtgesteine, die keine Klüftung aufweisen oder engständig geklüftet sind, werden im Programm VPAC als homogen-poröses Medium (HPM) abgebildet. Falls vorhanden, werden steil stehende Störungszonen, die vertikal und parallel im Abstand von 100 m verlaufen, im Modell explizit berücksichtigt; d.h. die modellhaft als 0.1 m breit angenommenen Strukturelemente werden durch eine separate Materialklasse ("Störungszone") im Sinne eines HPMs mit entsprechenden hydraulischen Kennwerten und eigenen Sorptionsdaten repräsentiert.

Modellkonfiguration mit PICNIC

In der Anwendung von PICNIC ist die mit VPAC oder STMAN berechnete Radionuklidfreisetzung aus dem Nahfeld der Quellterm für die Transportrechnung in der Geosphäre.

Das homogen-poröses Medium repräsentiert den einfachsten Fall eines eindimensionalen Transportpfads durch die Geosphäre. Für ein engständig geklüftetes Wirtgestein wird die Radionuklidfreisetzung aus dem Nahfeld in ein PICNIC-"Leg" für eine Kluft (Kluftöffnungsweite 1 mm, Klufthäufigkeit 1/m) eingespeist.

Im Fall von steil stehenden Störungszonen werden die mit VPAC berechneten Nahfeldfreisetzungen aus der Wirtgesteinsmatrix und der Störungszone in zwei separate PICNIC-"Legs" (Gesteinsmatrix und Störungszonen) eingespeist. Die Gesteinsmatrix wird hierbei entweder durch ein homogen-poröses Medium ohne Klüftung repräsentiert oder sie bildet die Situation der oben beschriebenen engständigen Klüftung ab. Die Störungszone wird vereinfacht als offene Kluft innerhalb eines diffusionszugänglichen Gesteinsbereichs, der mineralogisch dem Verfüllmaterial der Störungszone entspricht, modelliert (konservative Vernachlässigung einer allfälligen Kluftfüllung).

2.5.5 Biosphäre

Radionuklide, die aus einem geologischen Tiefenlager freigesetzt werden und während des Transports durch die technischen und geologischen Barrieresysteme nicht zerfallen, können in die Biosphäre gelangen und dort zu einer Strahlenexposition einer begrenzten Anzahl Personen führen. Die für ein Spektrum von unterschiedlichen Freisetzungsszenarien zu berechnende Strahlendosis ist das zentrale Mass, das mit der Dosislimite im Schutzziel 1 der behördlichen Richtlinie HSK-R-21 (HSK & KSA 1993) verglichen wird, um die radiologische Sicherheit eines geologischen Tiefenlagers zu bewerten. Die berechnete Dosis hängt einerseits ab von den berechneten Radionuklid-Freisetzungsraten in die Biosphäre und andererseits von den Annahmen bei der Biosphärenmodellierung. Diese Annahmen zur Biosphärenmodellierung, wie sie für die Bewertung der berechneten Radionuklid-Freisetzungsraten im vorliegenden Bericht verwendet werden, werden im Folgenden kurz vorgestellt. Eine detailliertere Beschreibung findet sich in Nagra (2008e).

Die Biosphärenmodellierung beruht konzeptuell auf zwei Teilen:

- Das *Modell der "physikalischen Biosphäre"* beschreibt die verschiedenen Kompartimente des Biosphärensystems sowie den Radionuklidaustausch zwischen diesen Kompartimenten. Das hier verwendete Modell der physikalischen Biosphäre besteht aus fünf Kompartimenten: (i) Quartär-Aquifer ("Biosphärenaquifer"), (ii) tiefe Bodenschicht, (iii) Oberflächenbodenschicht, (iv) Oberflächengewässer und (v) deren Sedimente. Die Radionuklidverteilung innerhalb dieser Kompartimente wird stets als homogen vorausgesetzt. Die Radionuklide werden zwischen den Kompartimenten der physikalischen Biosphäre ausgetauscht, indem sie im Wasser gelöst und auf Feststoffen sorbiert transportiert werden. Es wird angenommen, dass die Freisetzung der Radionuklide aus der Geosphäre in die Biosphäre durch Exfiltration von tiefem, mit Radionukliden befrachtetem Grundwasser in den Quartär-Aquifer geschieht.
- Das *Modell der Expositionspfade* beschreibt, wie die Menschen im betrachteten Gebiet der Radioaktivität in der Biosphäre ausgesetzt sind. Die Expositionspfade sind bestimmt durch die physikalische Biosphäre, das Verhalten der Menschen und dem Transfer der Radionuklide in der Nahrungskette. Es wird hier davon ausgegangen, dass die Bewohner der betrachteten Region ihren Nahrungsmittelbedarf aus lokalen Quellen decken. Es wird die heutige Ernährungsweise zugrunde gelegt, d.h. es werden Gemüse, Getreide, Früchte, Milch, Fleisch, Eier und Fisch aus lokaler Produktion konsumiert. Trinkwasser wird dem Quartär-Aquifer entnommen.

Zur Festlegung der Eigenschaften des zu modellierenden Biosphärensystems werden die heutigen geomorphologischen, klimatischen und hydrologischen Bedingungen sowie das heutige Verhalten der Menschen in dem zu betrachtenden Gebiet zugrunde gelegt. Die Annahmen über die Eigenschaften und die Entwicklung der Biosphäre können sich jedoch stark auf die Verdünnung der Radionuklide im Biosphärensystem und somit auf die von den Bewohnern des Gebiets akkumulierte Dosis auswirken. Zur Illustration der Auswirkungen unterschiedlicher Biosphäreneigenschaften auf die berechnete Dosis werden verschiedene (stilisierte) Typen von physikalischen Biosphären und Klimaszenarien miteinander verglichen. Spekulationen über mögliche Änderungen der menschlichen Verhaltensmuster in der Zukunft würden sich auf Änderungen in den Expositionspfaden beziehen und werden hier im Einklang mit HSK & KSA (1993) nicht betrachtet.

Im Folgenden werden die betrachteten Biosphärentypen und Klimaszenarien erläutert. Als Ausgangspunkt für diesen Vergleich dient das im Entsorgungsnachweis als Referenz-Biosphäre verwendete Biosphärensystem (Nagra 2002c). Die Biosphären-Parameter für die Referenz-Biosphäre wurden ebenfalls vom Entsorgungsnachweis übernommen, mit Ausnahme einiger generischer Parameterwerte, die dem neusten Stand des Wissens angepasst wurden (Nagra 2008e). Eine vollständige Liste der verwendeten Parameterwerte ist in Nagra (2008e) aufgeführt.

Biosphärentypen

Aufgrund unterschiedlicher Biosphäreneigenschaften verschiedener Standortgebiete wird die berechnete Dosis vom betrachteten Standortgebiet abhängig sein. Zur Illustration der Variabilität der Dosis aufgrund unterschiedlicher Standortgebiete werden folgende Biosphärentypen betrachtet, welche das Spektrum typischer Biosphäreneigenschaften von möglichen Standortgebieten in der Schweiz weitgehend abdecken:

A *Gebiet in der Nordschweiz mit grossem Fluss*: Bei diesem Biosphärentyp handelt es sich um das Biosphärenystem, wie es dem Entsorgungsnachweis (Nagra 2002c) als Referenz zugrunde gelegt wurde. Die Topographie des Gebiets ist durch relativ schwach geneigte Talsohlen mit quartären Kiesterrassen charakterisiert. Das aus der Geosphäre freigesetzte, Radionuklide aus dem geologischen Tiefenlager enthaltende Grundwasser entwässert in der Talsohle in quartäre Kiesablagerungen (Biosphärenaquifer). Zwischen Biosphärenaquifer und Fliessgewässer kann in beiden Richtungen Wasser ausgetauscht werden. Es wird davon ausgegangen, dass keine Quellen vorkommen, welche Grundwasser mit Radionukliden aus dem geologischen Tiefenlager direkt aus der Geosphäre schütten.

B *Kleines Tal mit kleinem Bach*: Hierbei handelt es sich im Vergleich zu Typ A um ein kleines Biosphärengebiet mit stärker geneigtem Terrain. Der Biosphärenaquifer befindet sich in Hanggebieten und entwässert in der Talsohle in einen kleinen Bach. Es fliesst kein Wasser aus dem Bach in den Biosphärenaquifer. Die Mächtigkeit des Biosphärenaquifers und der ungesättigten Zone ist geringer als im Fall A. Die Radionuklide werden wie im Fall A aus der Geosphäre in den Biosphärenaquifer freigesetzt.

C *"Quellenszenario"*: Hier wird angenommen, dass der Wasserbedarf der Bewohner und Tiere des betrachteten Gebiets durch Quellwasser aus dem Radionuklide enthaltenden Geosphärenaquifer gedeckt wird (Trinkwasser, Bewässerung). Die Grösse des betrachteten Gebiets entspricht der Fläche, welches eine Gruppe von 10 Personen (kritische Gruppe, ICRP 2007) zur Selbstversorgung mindestens benötigt.

Klimaszenarien

Über die betrachteten Zeiträume sind signifikante Klimaveränderungen zu erwarten. Zur Illustration der Auswirkungen verschiedener Klimaregimes auf die berechnete Dosis werden die im Folgenden beschriebenen Klimaszenarien betrachtet.

I *Heutiges Klima*: Das heutige Klima in der Schweiz dient als Ausgangspunkt zur Festlegung der Eigenschaften des Referenz-Szenarios. Das heutige gemässigte Klima ist repräsentativ für interglaziale Klimabedingungen. Es ist charakterisiert durch eine Niederschlagsrate von 1 m/a und einer Evapotranspirationsrate von 0.6 m/a. Für die Bewässerungsrate wird ein Wert von 0.5 m/a angenommen. Dieses Klimaszenario entspricht dem im Entsorgungsnachweis (Nagra 2002c) betrachteten Referenzfall.

II *Warmes, trockenes Klima*: Das Klima in diesem Szenario ist trockener und wärmer als im Referenzfall. Es ist charakterisiert durch eine Niederschlagsrate von 0.3 m/a und einer Evapotranspirationsrate von 1 m/a. Dieser Wert liegt nahe bei der potenziellen Evapotranspirationsrate des betrachteten Klimas und kann nur aufrecht erhalten werden, wenn der Boden durch eine verstärkte Bewässerung genügend Feuchtigkeit enthält (Bewässerungsrate: 0.9 m/a).

III *Warmes, feuchtes Klima:* Das Klima in diesem Szenario ist feuchter und wärmer als im Referenzfall. Es ist charakterisiert durch eine Niederschlagsrate von 2 m/a und einer Evapotranspirationsrate von 1 m/a. Trotz der hohen Niederschlagsrate können Trockenperioden auftreten, während denen die Landwirtschaftsflächen künstlich bewässert werden (Bewässerungsrate: 0.25 m/a). Der Boden ist somit ständig genügend feucht, um eine tatsächliche Evapotranspirationsrate nahe der potenziellen Evapotranspirationsrate aufrecht zu erhalten.

Es werden hier keine Klimaszenarien mit tieferen Temperaturen als im heutigen Klima betrachtet. Unter kälteren Bedingungen wäre die Evapotranspiration geringer, was insbesondere bei den Biosphärentypen A und B zu einer tendenziell erhöhten Wasserverfügbarkeit im Biosphärensystem führt. Die damit verbundene Verdünnung der Radionuklide im Biosphärensystem führt zu einer geringeren Dosis. Dennoch sind kalte und trockene Klimabedingungen nicht auszuschliessen, bei denen dieser Verdünnungseffekt nicht zum tragen kommt. Unter solchen Bedingungen, wie sie heute in arktischen Gebieten herrschen, ist aber die unter heutigen Bedingungen in der Schweiz angewendete technische Agrikultur im Gegensatz zu den anderen hier betrachteten Biosphärenszenarien aufgrund der geringen Primärproduktion nicht praktikabel und deshalb unbedeutend. Unter periglazialen Bedingungen besteht die Nahrung nur zu einem kleinen Teil aus lokalen Produkten, die auf natürliche Weise erzeugt werden (Beeren, Pilze, Fisch, Rentiere). Der grösste Teil der Nahrung muss aus entfernten Gebieten importiert werden.

Fig. 2.5-5 zeigt einen Vergleich der Biosphären-Transfer-Koeffizienten[33] (BTKs) für die verschiedenen Biosphärentypen und Klimaszenarien (die entsprechenden Zahlenwerte finden sich in Anhang 3, Tab. A3.4-1).

Dieser Vergleich zeigt, dass die Dosisbeiträge der einzelnen Nuklide je nach Biosphärentyp und Klimaszenario erheblich schwanken können. Die BTKs für den Biosphärentyp A sind tendenziell kleiner als für den Typ B, weil für die Verteilung der Radionuklide in der Umwelt ein grösseres Gebiet zu Verfügung steht und die Radionuklide somit stärker verdünnt werden. Für den Typ C sind die BTKs höher als für die Typen A und B, weil die Radionuklide nicht in den

[33] Siehe "Numerisches Modell" weiter unten für eine Definition der BTKs.

Biosphärenaquifer freigesetzt und somit nicht im Grundwasser verdünnt werden. Im warmen, trockenen Klima (Szenario II) steht im Vergleich zum heutigen Klima (Szenario I) weniger Wasser zur Verdünnung der Radionuklide in der Umwelt zur Verfügung, was zu tendenziell höheren BTKs führt. Analog sind die BTKs im Fall des warmen, feuchten Klimas (Szenario III) tendenziell kleiner als im heutigen Klima. Im Fall A-II sind die BTKs einiger schwach sorbierender Nuklide besonders stark erhöht (z.B. ^{36}Cl, ^{79}Se, ^{129}I), was durch einen starken Anstieg der Konzentrationen dieser Nuklide im Bodenwasser aufgrund der starken Evapotranspiration, der starken Bewässerung mit kontaminiertem Grundwasser und der langsamen Re-Infiltration des Bewässerungswassers bedingt ist. Dieser Anstieg geschieht jedoch sehr langsam (~ 10^5 a), so dass innerhalb typischer Zeitskalen von natürlichen Klimaschwankungen kein Gleichgewicht erreicht wird. Die BTK-Werte dieser Nuklide würden somit zu einer starken Überschätzung der tatsächlich zu erwartenden Dosis führen. Eine ausführliche Diskussion dieses Sachverhalts findet sich in Nagra (2008e).

Falls nicht explizit erwähnt, werden im Folgenden immer die BTKs für den Referenzfall (A-I) verwendet.

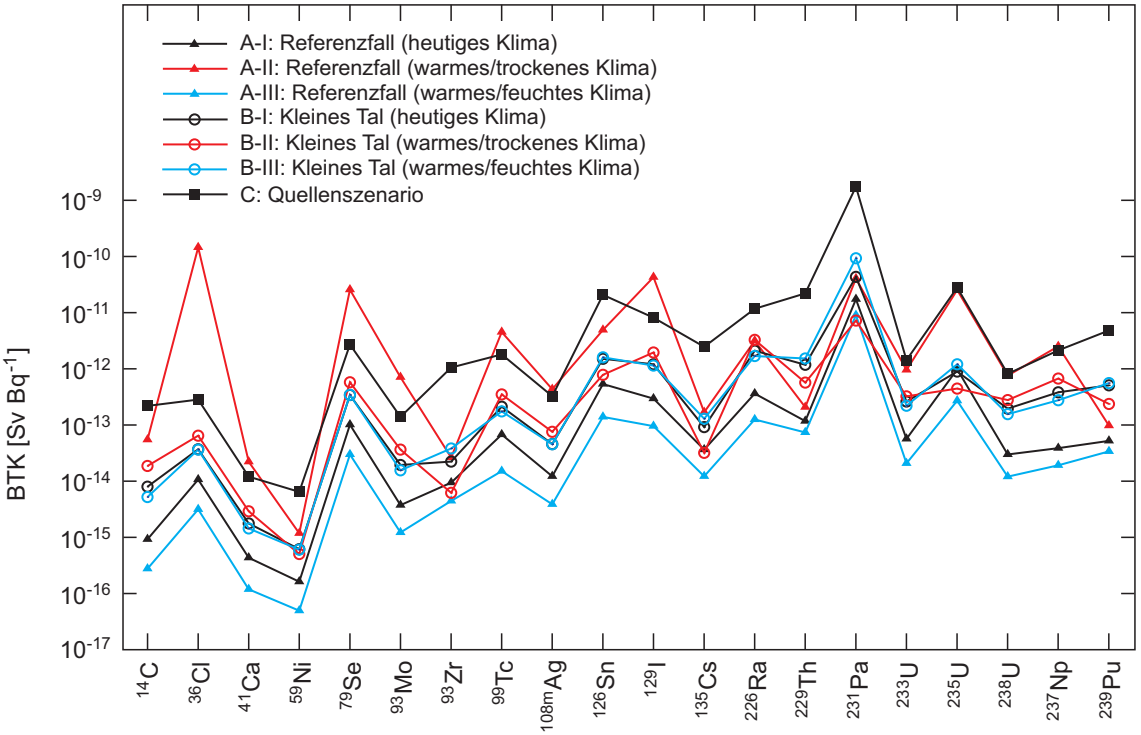


Fig. 2.5-5: Vergleich der Biosphären-Transfer-Koeffizienten für die verschiedenen Biosphärentypen (A, B, C) und Klimaszenarien (I, II, III) für eine Auswahl von sicherheitsrelevanten Nukliden.

Numerisches Modell für die Biosphäre

Das hier verwendete Biosphärenmodell entspricht dem im Entsorgungsnachweis verwendeten Modell TAME (Nagra 2002c, Nagra 2002d). Dieses Model berücksichtigt explizit die Zeitskalen der verschiedenen Phänomene, die den Radionuklidaustausch zwischen den Kompartimenten verursachen. Vereinfachend wird hier jedoch davon ausgegangen, dass diese Zeitskalen

kurz sind im Vergleich zu den Zeitskalen der Radionuklidfreisetzungen[34]. Diese Vereinfachung ermöglicht es, sogenannte Biosphären-Transfer-Koeffizienten (BTKs) zu bestimmen. Der BTK eines bestimmten Radionuklids ist das Verhältnis zwischen der *steady-state* Dosisleistung in der Biosphäre (Sv/a) und der *steady-state* Freisetzungsrate dieses Radionuklids in die Biosphäre (Bq/a). Die Dosisleistung für eine bestimmte Freisetzungsrate ergibt sich dann durch Multiplikation der Freisetzungsrate mit dem entsprechenden BTK. Es ist somit nicht nötig, für jede zeitabhängige Rechnung zur Radionuklidfreisetzung aus der Geosphäre auch eine zeitabhängige Biosphären-Modellrechnung durchzuführen.

Die BTKs werden wie folgt berechnet: Für jedes Radionuklid *j* wird eine konstante Geosphären-Freisetzungsrate von 1 Bq/a als Randbedingung für das transiente Kompartiment-Modell vorgegeben. Mit den Annahmen und Parametern der betrachteten Biosphäre wird dann die Dosisleistung als Funktion der Zeit berechnet, bis diese näherungsweise ein Gleichgewicht erreicht. Der BTK eines Radionuklids *j* ist dann das Verhältnis der entsprechenden Gleichgewichtsdosisleistung und der Freisetzungsrate von 1 Bq/a. Die Zerfallsprodukte eines Nuklids *j* können ebenfalls radioaktiv sein. Falls die Halbwertszeit eines Zerfallsprodukts kürzer ist als die Zeitskalen des Radionuklidaustauschs innerhalb der Biosphäre, kann die Dosisleistung dieses Zerfallsprodukts im BTK des Nuklids *j* berücksichtigt werden. Andernfalls muss das Zerfallsprodukt als separates Nuklid behandelt werden. Hier werden Zerfallsprodukte mit Halbwertszeiten kürzer als 60 Tage im BTK des Vorläufernuklids *j* berücksichtigt. Zerfallsprodukte mit grösseren Halbwertszeiten werden als separate Nuklide mit eigenem BTK behandelt.

2.5.6 Sicherheitstechnische Betrachtungen zum Einfluss der Erosion nach langen Zeiten

Aufgrund von Hebung und Erosion kann in einer Betrachtung über sehr lange Zeitskalen nicht ausgeschlossen werden, dass ein geologisches Tiefenlager in den Einflussbereich der Erdoberfläche gelangt. Dies kann bewirken, dass zunächst die hydraulische Durchlässigkeit des Wirtgesteins infolge Dekompaktion erhöht wird. Sobald sich die Lagerkammern nur noch einige Dekameter unter der Erdoberfläche befinden, können sich zudem oxidierende Bedingungen einstellen, was die Degradationsraten der Abfallmatrizen und die geochemische Radionuklid-Rückhaltung beeinflusst. Hält die Hebung und Erosion an, können die Lagerkammern erodiert werden und das entsprechende Material in ein stromabwärts gelegenes Gebiet verfrachtet werden. Die Strahlendosis einer Bevölkerungsgruppe in diesem Gebiet, die für ein solches Szenario in der fernen Zukunft zu erwarten wäre, hängt vom Abfallinventar, dem Zeitpunkt, zu dem das Lager in die Nähe der Erdoberfläche gelangt, der Mobilisierung und Verteilung der Radionuklide in der Umwelt sowie der Art der Strahlenexposition ab.

Zur Illustration der radiologischen Konsequenzen eines solchen Szenarios werden die folgenden Modellansätze betrachtet:

Modell 1: Freisetzung von im Grundwasser gelösten Radionukliden aus den nahe an der Erdoberfläche liegenden Lagerkammern in einen Grundwasserträger (vereinfachte Betrachtung)

Modell 2: Erosion der Lagerkammern mit anschliessender Verfrachtung und Ablagerung des entsprechenden Materials (vereinfachte Betrachtung)

Modell 3: Zeitabhängige Dekompaktion des Wirtgesteins (Modellierung der zeitlichen Entwicklung des SMA- bzw. HAA-Lagers)

---

[34] Diese Annahme ist nicht für alle Situationen und Nuklide richtig, aber immer konservativ (s. Diskussion in Nagra 2008e).

In den Modellen 1 und 2 wird konservativerweise angenommen, dass das gesamte Nuklidinventar vollständig im Lager eingeschlossen bleibt, bis das Lager in die Nähe der Erdoberfläche gelangt. Unter dieser Annahme verändert sich das Radionuklidinventar als Funktion der Zeit also nur aufgrund des radioaktiven Zerfalls. Die berechnete Dosis nimmt deshalb mit zunehmender Zeitdauer bis zum Zeitpunkt der Freilegung ab. Im Gegensatz dazu wird im Modell 3 neben dem radioaktiven Zerfall auch die zeitabhängige Freisetzung von Radionukliden aus dem geologischen Tiefenlager mit anschliessendem Transport gerechnet, unter Berücksichtigung der Zeitabhängigkeit der hydraulischen Durchlässigkeit des Wirtgesteins aufgrund von Dekompaktion, mit anschliessender Freisetzung des Rest-Inventars. Diese Modelle werden nachfolgend beschrieben. Die Resultate werden in Anhang 5 präsentiert.

Modell 1: Freisetzung von im Grundwasser gelösten Radionukliden aus den nahe an der Erdoberfläche liegenden Lagerkammern in einen Grundwasserträger

Modellbeschreibung

In dieser Betrachtung wird angenommen, dass vom Zeitpunkt t_E an eine Radionuklidfreisetzung mit konstanter Rate k aus dem Lager in einen Grundwasserträger mit konstantem Grundwasserdurchfluss Q stattfindet. Dabei wird angenommen, dass die Radionuklide aus demjenigen Teil des Lagers freigesetzt werden, der sich nahe der Erdoberfläche befindet, weil sich die Abfälle dort unter den teilweise oxidierendem Bedingungen im Grundwasser bevorzugt auflösen (n: entsprechender Volumenanteil des Lagers). Weiter wird angenommen, dass die Radionuklide in Lösung aufgrund der Dekompaktion und der damit einher gehenden hohen Durchlässigkeit instantan in den Grundwasserträger freigesetzt werden. Vereinfachend wird zudem konservativerweise vernachlässigt, dass die Radionuklide durch Sorption an der Festphase im Grundwasserträger zurückgehalten werden können. Dies ist eine bewusste Vereinfachung, um sicherzustellen, dass auch solche Fälle abgedeckt sind, bei denen aus irgendeinem Grund sonst stark sorbierende Nuklide (z.B. Aktiniden) merkbar zur Radionuklidkonzentration im Trinkwasser beitragen. Zur Bestimmung der Radionuklidkonzentrationen im Trinkwasser wird weiter angenommen, dass die aus den Abfällen freigesetzten Radionuklide homogen im Grundwasser verteilt werden. Schliesslich wird zur Berechnung der Strahlendosis unterstellt, dass die betroffenen Personen ihren gesamten Trinkwasserbedarf q aus dem betrachteten Grundwasserträger decken. Die pro Zeiteinheit akkumulierte Dosis D ergibt sich dann zu:

$$D(t) = \frac{qkn}{Q} \sum_i e^i_{\text{ing}} N^i(t)$$

wobei e^i_{ing} den Dosiskoeffizienten für Ingestion des Radionuklis i und $N^i(t)$ das Inventar des Radionuklids i zur Zeit t bezeichnet.

Wahl der Modellparameter

- Anteil n des Lagervolumens, der sich nahe der Erdoberfläche befindet und aus dem die Radionuklide freigesetzt werden (in Bezug auf das anfängliche Lagervolumen; der Volumenanteil nahe der Erdoberfläche ist für HAA kleiner als für SMA, weil die Grundfläche des HAA-Lagers grösser ist als diejenige des SMA- oder LMA-Lagers):
  - HAA: n = 5 %
  - SMA, LMA: n = 10 %

- Fraktionale Rate k, mit der die Radionuklide aus dem betroffenen Teil des Lagers freigesetzt werden (unter oxidierenden Bedingungen)[35]:
  - HAA (BE): $k = 10^{-5}$ 1/a (Brennstoffauflöserate für oxidierende Bedingungen)
  - HAA (verglaste Abfälle): $k = 10^{-4}$ 1/a (Radionuklidfreisetzung infolge Verwitterung der Sekundärminerale, entstanden durch Glasauflösung und anschliessende Ausfällung und Mineralisierung)
  - SMA, LMA: $k = 10^{-2}$ 1/a (Basisfall, entspricht ungefähr dem Maximum der bei einem breiten Spektrum von Rechenfällen beobachteten fraktionalen Rate der Freisetzung von nicht sorbierenden Radionukliden aus dem LMA/SMA-Nahfeld) bzw. $k = 10^{-3}$ 1/a (Radionuklifreisetzung infolge Verwitterung der bei der Zementdegradation entstandenen Sekundärminerale als Parametervariation)
- Grundwasserfluss: $Q = 10^6$ m^3/a (Basisfall, vgl. Nagra 2002c, Tab. A2.12) bzw. 5×10^5 m^3/a sowie 2×10^6 m^3/a (Parametervariation)
- Trinkwasserkonsum pro Person: $q = 2$ l/d

Modell 2: Erosion der Lagerkammern mit anschliessender Verfrachtung und Ablagerung des entsprechenden Materials

Modellbeschreibung

In dieser Betrachtung wird angenommen, dass die Lagerkammern erodiert werden und dass das entsprechende Material später in einem stromabwärts gelegenen Akkumulationsgebiet wieder abgelagert wird. Dabei wird sowohl die Strahlendosis aufgrund der Ingestion von Trinkwasser im Akkumulationsgebiet sowie aufgrund der Direktstrahlung aus dem Boden des Akkumulationsgebiets betrachtet (Fig. 2.5-6).

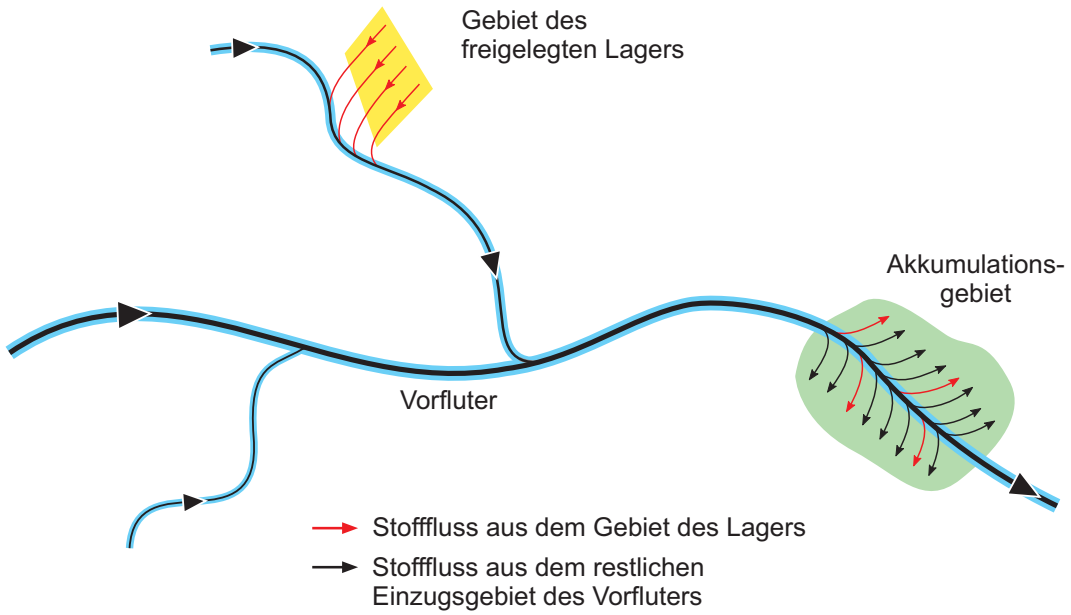


Fig. 2.5-6: Modell 2: Erosion, Verfrachtung, Verdünnung und Ablagerung von Material aus dem Gebiet des freigelegten Lagers.

[35] Im Modell 1 wird konservativ angenommen, dass das gesamte Nuklidinventar vollständig im Lager eingeschlossen bleibt, bis das Lager in die Nähe der Erdoberfläche gelangt.

Das im Gebiet des Lagers erodierte feinkörnige Material (sedimentäres feinkörniges Wirtgestein) wird mit zumindest teilweise grobkörnigem Material aus dem restlichen Einzugsgebiet des Vorfluters vermischt und verdünnt im Verhältnis der Stoffflüsse; wobei f_L den Stofffluss aus dem Gebiet des Lagers (rote Pfeile in Fig. 2.5-6) und f_W den Stofffluss aus dem restlichen Einzugsgebiet des Vorfluters (schwarze Pfeile in Fig. 2.5-6) bezeichnet.

Falls das Lager parallel zum Terrain an die Erdoberfläche tritt (Fig. 2.5-7, Situation A), entspricht die Fläche des radionuklidhaltigen Gebiets der Grundfläche des Lagers ($A_L = l$ x b). In diesem unwahrscheinlichen Fall ist die pro Zeiteinheit erodierte Masse von kontaminiertem Material (r_L: Erosionsrate im Gebiet des Lagers, ρ_L: Dichte des erodierten Materials, ε_L: Porosität des Bodens im Gebiet des Lagers):

$$f_L^0 = r_L A_L \rho_L (1 - \varepsilon_L)$$

Im Allgemeinen ist jedoch zu erwarten, dass das Lager nicht parallel zum Terrain an die Erdoberfläche gelangt (Fig. 2.5-7). In diesem Fall ist die Mächtigkeit der vom Lagervolumen betroffenen Boden- bzw. Gesteinsschicht (a) grösser als die Mächtigkeit des Lagervolumens (d), s. Fig. 2.5-7, Situation B. Somit dauert es im Vergleich zu Situation A (bei konstanter Erosionsrate) um den Faktor a/d' länger, bis das gesamte Lagervolumen erodiert ist, wobei für kleine Winkel α gilt: $d' \approx d$. Entsprechend lässt sich der Fluss von radionuklidhaltigem Material folgendermassen abschätzen:

$$f_L \approx \frac{d}{a} f_L^0 = \frac{d}{a} r_L A_L \rho_L (1 - \varepsilon_L)$$

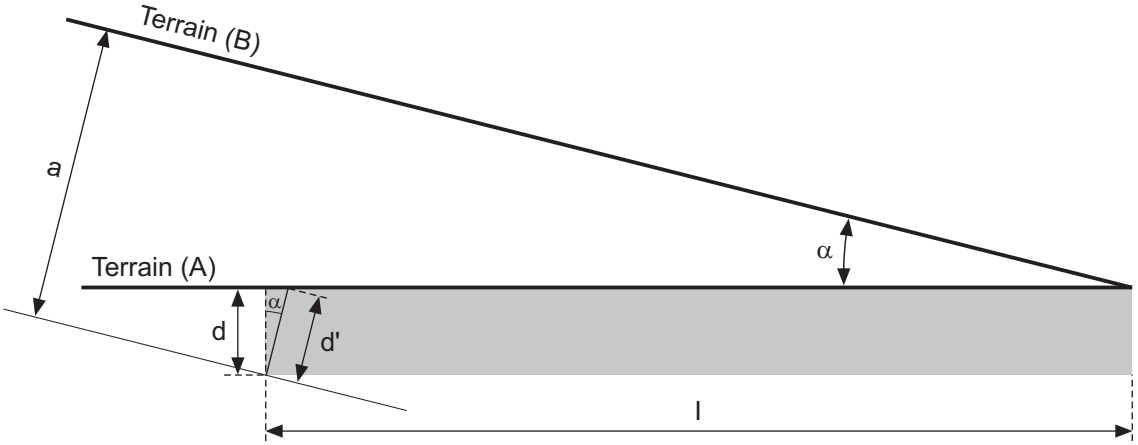


Fig. 2.5-7: Modell 2: Auswirkung der Neigung des Lagers während der erosiven Freilegung.

Situation A: Lager liegt parallel zum Terrain (Neigungswinkel $\alpha = 0$). Situation B: Lager ist gegenüber der Erdoberfläche geneigt ($\alpha > 0$). Der Neigungswinkel bestimmt die Mächtigkeit a der vom Lager betroffenen Bodenschicht (s. Text).

Die Konzentration C^i_A eines Radionuklids i in den im Akkumulationsgebiet abgelagerten Feststoffen lässt sich anhand obiger Betrachtungen folgendermassen bestimmen (C^i_L ist die mittlere Radionuklidkonzentration im Tiefenlager, die unter der Annahme einer homogenen Radionuklidverteilung im Tiefenlagervolumen l x b x d berechnet wird):

$$C_A^i = \frac{f_L}{f_W + f_L} C_L^i$$

Die so berechneten Radionuklidkonzentrationen im Akkumulationsgebiet bilden die Grundlage zur Abschätzung der Strahlendosis aufgrund der Ingestion von kontaminiertem Trinkwasser sowie der Direktstrahlung aus dem kontaminierten Boden.

Trinkwasser

Im Gegensatz zur Betrachtung in Modell 1 wird hier angenommen, dass die Radionuklide instantan mobilisiert werden und dass deren Konzentration im Grundwasser ausschliesslich durch die nuklidspezifischen fest/flüssig-Verteilungskoeffizienten bestimmt wird. Weil es sich bei den abgelagerten Stofffrachten um feinkörniges Material handelt, wurden die Verteilungskoeffizienten für eine feinkörnige Aquifermatrix eingesetzt (s. Nagra 2008e).

Das Grundwasser in einer feinkörnigen Schicht ist jedoch nur bedingt zur Gewinnung von Trinkwasser geeignet, weil die geringe hydraulische Durchlässigkeit einer solchen Schicht keine effiziente Trinkwasserförderung erlaubt. Deshalb wird in dieser Betrachtung unterstellt, dass das Trinkwasser überwiegend aus einer tiefer liegenden grobkörnigen Aquiferschicht gewonnen wird und nur ein kleiner Teil des geförderten Trinkwassers aus der radionuklidhaltigen, feinkörnigen Schicht stammt (Fig. 2.5-8). Es wird exemplarisch angenommen, die Mächtigkeiten der beiden Schichten und die hydraulischen Gradienten um den Brunnen in den beiden Schichten seien ungefähr gleich. Der Anteil v des kontaminierten Grundwassers an der gesamten Menge des geförderten Trinkwassers lässt sich dann aus den hydraulischen Durchlässigkeiten der beiden Schichten wie folgt abschätzen:

$$v = \frac{q_1}{q_1 + q_2} \approx \frac{\kappa_1}{\kappa_1 + \kappa_2}$$

Die Radionuklidkonzentrationen im Trinkwasser sind bei dieser Betrachtung im Vergleich zum Grundwasser der radionuklidhaltigen Schicht um den Verdünnungsfaktor $1/v$ geringer. Entsprechend verringert sich auch die Strahlendosis aufgrund des Trinkwasserkonsums um den Faktor $1/v$.

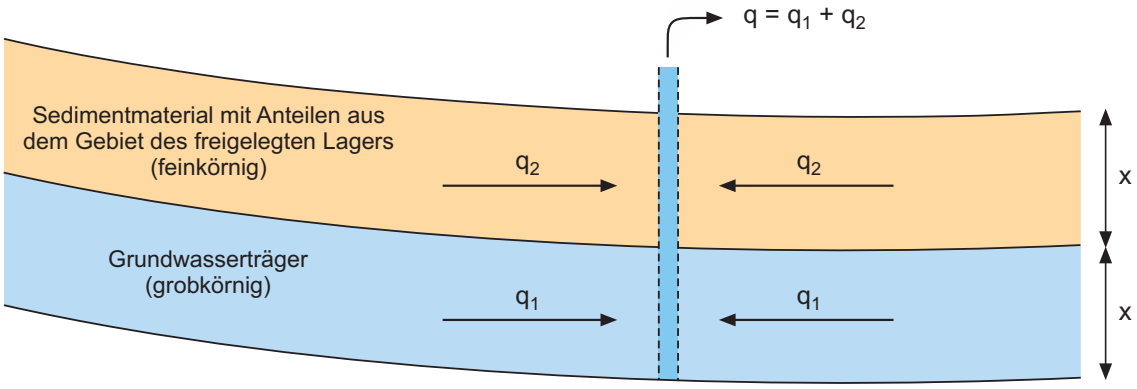


Fig. 2.5-8: Modell 2: Gewinnung und Verdünnung von Trinkwasser aus einem Grundwasserträger im Gebiet, das vom Vorfluter deponiertes radionuklidhaltiges Sedimentmaterial enthält.

Der Grossteil des Trinkwassers wird aus grobkörnigeren Aquiferschichten ohne radionuklidhaltige Schwebstoffe aus dem Gebiet des freigelegten Lagers und mit hoher hydraulischer Durchlässigkeit gewonnen (q_1). Nur ein kleiner Anteil (q_2) stammt aus den feinkörnigeren Schichten mit radionuklidhaltigem Sedimentmaterial aus dem Gebiet des freigelegten Lagers. Der Einfachheit halber wird angenommen, dass der Trinkwasserbrunnen über die gesamte Tiefe verfiltert ist und beide Schichttypen gesamthaft ungefähr die gleiche Mächtigkeit (x) aufweisen (vereinfachte Darstellung).

Direktstrahlung aus dem Boden

Die jährliche Strahlendosis durch Direktstrahlung wird als die Dosisleistung 1 m oberhalb eines unendlichen Halbraums mit homogener Radionuklidkonzentration berechnet (EPA 2002). Dabei wird konservativerweise angenommen, dass sich die betroffenen Personen nie ausserhalb des entsprechenden Akkumulationsgebiets aufhalten und dort zu jeder Zeit der Strahlung aus dem Boden ausgesetzt sind.

Wahl der Modellparameter

Inventar: Für LMA wird hier der Einfachheit halber nur die alternative Abfallzuteilungsvariante AZ betrachtet, für SMA nur die Referenzzuteilung RZ. Die Radiotoxizität des LMA-Abfallinventars ist für die AZ grösser als für die RZ. Bei den SMA ist es genau umgekehrt (s. Kap. 3.3). Somit decken die betrachteten Fälle beide Abfallzuteilungsvarianten ab.

- Dimensionen der geologischen Tiefenlager:

	HAA[36]	LMA	SMA
Länge l	700 m	150 m	700 m
Breite b	700 m	160 m	230 m
Mächtigkeit d	5 m	20 m	20 m

- Porosität des Bodens im Gebiet des freigelegten Lagers: $\varepsilon_L = 0.36$
- Dichte des erodierenden Materials (im Gebiet des freigelegten Lagers): $\rho_L = 2650$ kg/m³
- Erosionsrate im Gebiet des freigelegten Lagers:
  - HAA: $r_L = 0.1 – 0.5$ mm/a (für Gebiete in der Schweiz nördlich der Alpen, s. Müller et al. 2002 und Nagra 2002c). Dieser Bereich schliesst auch die Mindestanforderung für das HAA-Lager an die Erosionsrate ein (0.4 mm/a, s. Tab. 5.4-1 und Anhang 1).
  - SMA: $r_L = 0.1 – 2$ mm/a. Dieser Bereich schliesst auch die Mindestanforderung für das SMA-Lager an die Erosionsrate ein (2 mm/a, s. Tab. 5.4-1 und Anhang 1).
- Stofffluss aus dem restlichen Einzugsgebiet des Vorfluters: $f_W = 10^8$ kg/a. Der Stofffluss lässt sich ableiten aus der grossräumigen Erosionsrate, der Fläche des Einzugsgebiets des Vorfluters und der Dichte und Porosität des erodierenden Materials. Für kleine Erosionsraten im Bereich von 0.1 mm/a entspricht der gewählte Wert des Stofffflusses einer Fläche des Einzugsgebiets des Vorfluters von einigen hundert Quadratkilometern; für hohe Erosionsraten im Bereich von 1 mm/a einer solchen von einigen zehn Quadratkilometern. Der verwendete Wert des Stofffflusses f_W ist auch vergleichbar mit gemessenen Stofffflüssen in grossen Vorflutern (BAFU 2007). Als pessimistischer unterer Wert der Bandbreite wird $f_W = 2 \times 10^7$ kg/a angenommen; dies entspricht einem um den Faktor 5 reduzierten Wert.
- Hangneigungswinkel: $\alpha = 5° – 15°$
- Trinkwasserkonsum pro Person: $q = 2$ l/d
- Hydraulische Durchlässigkeiten (nach de Marsily 1986):
  - Grobkörnige Aquifermatrix, z.B. (feiner) Kies: = 10^{-3} m/s
  - Feinkörnige Aquifermatrix, z.B. feiner Sand: = 10^{-5} m/s

[36] BE und verglaste HAA.

Diese (konservative) Wahl der hydraulischen Durchlässigkeit ergibt einen Verdünnungsfaktor $1/\nu = 100$. Als pessimistischer unterer Wert der Bandbreite wird $1/\nu = 50$ angenommen.

Modell 3: Zeitabhängige Dekompaktion des Wirtgesteins

Modellbeschreibung

In dieser Betrachtung wird die Freisetzung von Radionukliden aus dem HAA- bzw. SMA-Lager am Beispiel des Wirtgesteins Opalinuston unter expliziter Berücksichtigung der zeitabhängigen Dekompaktion illustriert. Im Nahfeld wird hierfür die zeitliche Entwicklung des Lagersystems nach Verschluss des Lagers berücksichtigt. Für die anschliessende Betrachtung des Nuklidtransports durch die Geosphäre wird von einer zeitlich zunehmenden Durchlässigkeit des Wirtgesteins infolge Dekompaktion aufgrund abnehmender Überdeckung durch Erosion ausgegangen (Fig. 2.5-9 und 2.5-10). Bis zu einer Rest-Überdeckung des Lagers von 40 m (Annahme) wird das Biosphärenmodell mit dem Referenz-Datensatz (BTKs) verwendet (s. Kap. 2.5.5). Für den darauffolgenden Zeitraum wird Modell 1 verwendet (Basisfall).

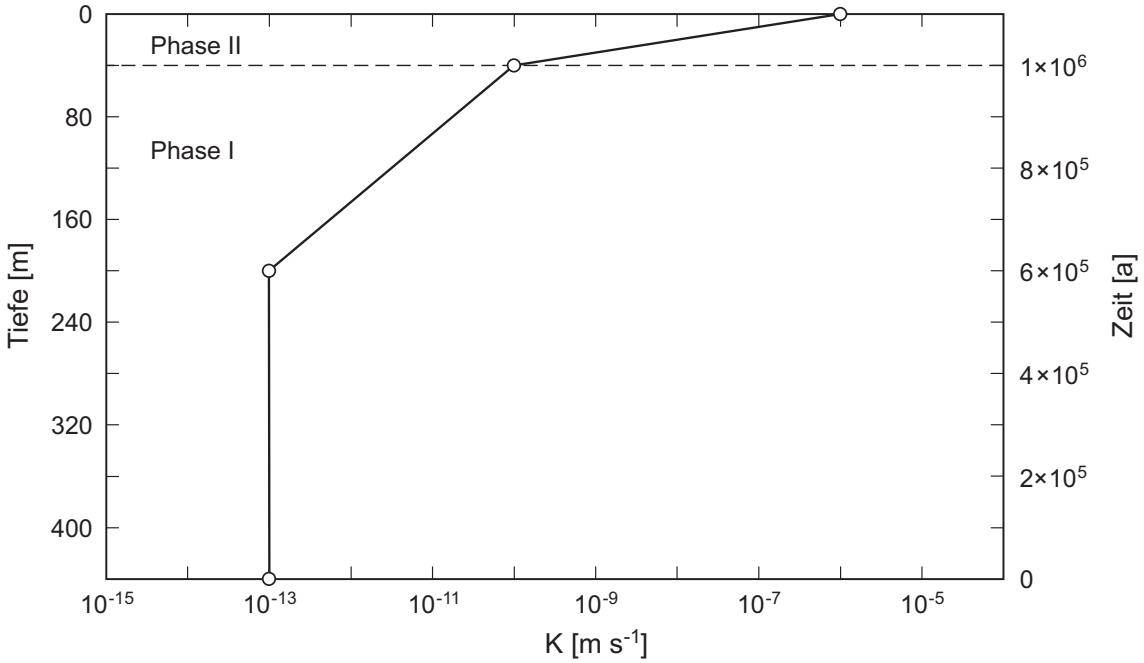


Fig. 2.5-9: Schematische Darstellung der hydraulischen Durchlässigkeit von Opalinustons als Funktion der Tiefe bzw. der Zeit für ein HAA-Lager.

Die Anfangstiefe (Lagerniveau) von 440 m entspricht der Mindestanforderung an das Top des notwendigen einschlusswirksamen Gebirgsbereichs von 400 m (Indikator 'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf flächenhafte Erosion' für HAA-Lager, vgl. Tab. 5.4-1). Die Zeitachse basiert auf einer angenommenen Erosionsrate von 0.4 mm/a (entspricht der Mindestanforderung für den Indikator 'Grossräumige Erosion im Betrachtungszeitraum' für HAA-Lager, vgl. Tab. 5.4-1). Für den letzten Zeitabschnitt (Phase II) wird Modell 1 verwendet. Der Verlauf der hydraulischen Durchlässigkeit als Funktion der Tiefe basiert auf Angaben in Nagra (2008c), Nagra (2002a) und Gautschi (2001).

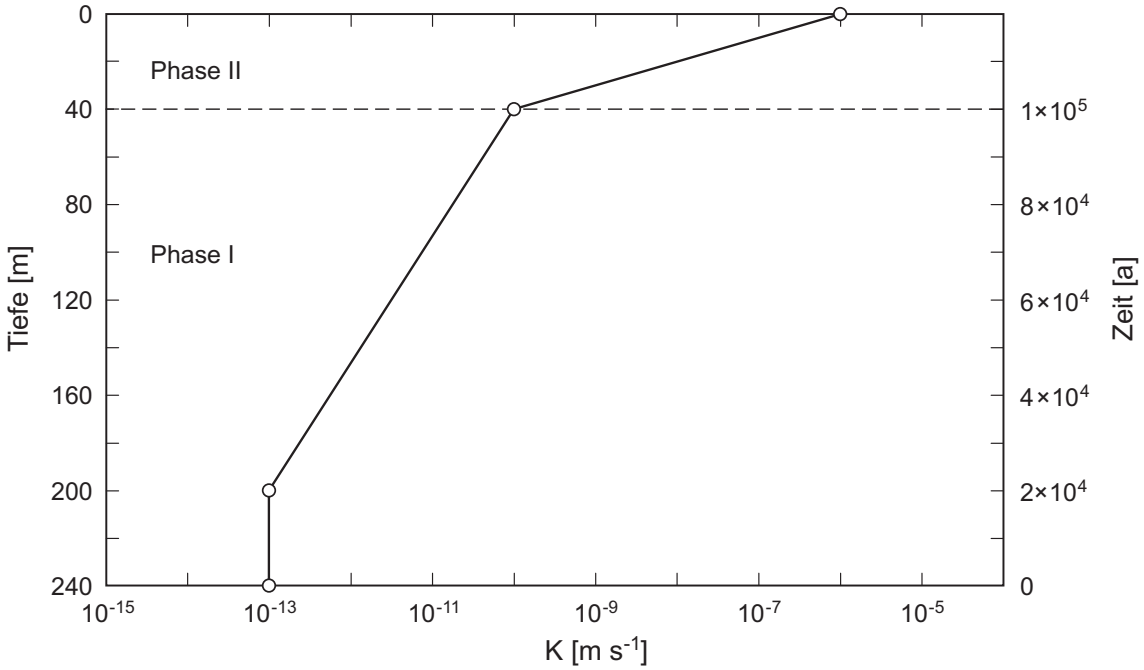


Fig. 2.5-10: Schematische Darstellung der hydraulischen Durchlässigkeit des Opalinustons als Funktion der Tiefe bzw. der Zeit für ein SMA-Lager.

Die Anfangstiefe (Lagerniveau) von 240 m entspricht der Mindestanforderung an das Top des notwendigen einschlusswirksamen Gebirgsbereichs von 200 m (Indikator 'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf flächenhafte Erosion' für SMA-Lager, vgl. Tab. 5.4-1. Die Zeitachse basiert auf einer angenommenen Erosionsrate von 2 mm/a (entspricht der Mindestanforderung für den Indikator 'Grossräumige Erosion im Betrachtungszeitraum' für SMA-Lager, vgl. Tab. 5.4-1). Für den letzten Zeitabschnitt (Phase II) wird Modell 1 verwendet.

Wahl der Modellparameter

- Betrachtungszeitraum:
  - HAA-Lager: 10^6 a (berücksichtigt bei der Wahl der Erosionsraten und der Überdeckung des geologischen Tiefenlagers zum Zeitpunkt der Einlagerung der Abfälle)
  - SMA-Lager: 10^5 a (berücksichtigt bei der Wahl der Erosionsraten und der Überdeckung des geologischen Tiefenlagers zum Zeitpunkt der Einlagerung der Abfälle)
- Inventar:
  - HAA-Lager (LMA-Teil): Alternative Zuteilung AZ (abdeckende Annahme)
  - SMA-Lager: Referenzzuteilung RZ

Phase I (bis zu einer Rest-Überdeckung von 40 m)

- Die hydraulische Durchlässigkeit *K* des Wirtgesteins ist eine Funktion der Dekompaktion infolge abnehmender Abdeckung durch Erosion. Unter Annahme einer konstanten Hebungs- bzw. Erosionsrate lässt sich somit auch eine funktionale Beziehung zwischen Durchlässigkeit und Zeit ableiten (s. Fig. 2.5-9 und 2.5-10).
- Erosionsrate (Mindestanforderung):
  - HAA-Lager: 0.4 mm/a
  - SMA-Lager: 2 mm/a
- Überdeckung des geologischen Tiefenlagers zum Zeitpunkt der Einlagerung der Abfälle (entspricht der Mindestanforderung für den Indikator 'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf flächenhafte Erosion'):
  - HAA-Lager: 440 m
  - SMA-Lager: 240 m
- Weitere Nahfeld- Geosphären- und Biosphären-Parameter: S. Anhang 3.

Phase II (Freisetzung des Rest-Inventars)

Zur Abschätzung der Dosen in Phase II wird Modell 1 (Basisfall) verwendet, wobei hier im Unterschied zu Modell 1 das Rest-Inventar (d.h. das durch radioaktiven Zerfall und Freisetzung reduzierte Inventar) am Ende des Betrachtungszeitraums mit den im Modell 1 verwendeten fraktionalen Raten freigesetzt wird.

2.6 Schlussfolgerungen

Im vorliegenden Kapitel wurden die in den nachfolgenden Kapiteln benötigten Vorgaben, Grundlagen und Prinzipien zusammengestellt. Dies umfasst Vorgaben aus dem Sachplan geologische Tiefenlager, aus dem Kernenergie-Gesetz, aus der Kernenergieverordnung, aus der behördlichen Richtlinie HSK-R-21 (bzw. aus deren Nachfolge-Richtlinie G03) sowie Grundlagen und Prinzipien aus den Erkenntnissen der Nagra aus früheren Projekten. Da die bisherige Erfahrung mit Sicherheitsanalysen von geologischen Tiefenlagern sowohl bei der Abfallzuteilung als auch bei der Festlegung der Anforderungen an die Geologie eine zentrale Rolle spielt, wurde anschliessend die entsprechende Information zusammengestellt. Schliesslich wurden die zum Zweck der generischen sicherheitstechnischen Betrachtungen getroffenen Annahmen bzgl. Inventar, Nahfeld, Geosphäre und Biosphäre dokumentiert und auf die dazu verwendeten Rechenmodelle hingewiesen.

3 Abfallzuteilung

3.1 Ziel und Aufbau des Kapitels

In diesem Kapitel wird zunächst das Vorgehen bei der Abfallzuteilung zum SMA- bzw. HAA-Lager vorgestellt (Kap. 3.2). Kap. 3.2 stützt sich auf Kap. 2 (Vorgaben, Grundlagen und Prinzipien) ab, insbesondere auf Kap. 2.3 (Vorgaben und Prinzipien bzgl. Sicherheits- und Barrierenkonzepte sowie bzgl. Standortwahl und Auslegung) und 2.4 (bisherige Erfahrungen bei der Planung von Lagerprojekten). In Kap. 3.3 folgt der gemäss Sachplan geologische Tiefenlager (Etappe 1, Schritt 1) von den Entsorgungspflichtigen zu unterbreitende Vorschlag zur Abfallzuteilung, und Kap. 3.4 enthält die Schlussfolgerungen.

3.2 Vorgehen bei der Abfallzuteilung zum SMA- bzw. HAA-Lager

3.2.1 Einleitung und Zielsetzung

Die Abfallzuteilung hat zum Ziel, für die Ableitung der Anforderungen an das Barrierensystem (geologische Barriere, technische Barrieren) eine möglichst gute Ausgangslage zu schaffen. Dazu sollen einerseits Abfälle mit ähnlichen sicherheitsbezogenen Eigenschaften im gleichen Lager bzw. im gleichen Lagerkompartiment[37] entsorgt werden. Andererseits sollen unter Berücksichtigung aller im Entsorgungskonzept vorgesehenen Lager (SMA, BE/HAA/LMA) möglichst ausgewogene Anforderungen an das Barrierensystem und an das gesamte Lager (z.B. bezüglich des zugeteilten Abfallvolumens[38]) resultieren.

Die für die Abfallzuteilung, Lagerauslegung und Festlegung von geologischen Standortgebieten zu berücksichtigenden Abfalleigenschaften sind gemäss SGT Anhang I:

- Inventar, Halbwertszeiten, Aktivität und Radiotoxizität der sicherheitsrelevanten Radionuklide sowie ihre zeitliche Entwicklung
- Abfallvolumen
- Materialeigenschaften und ihre möglichen Auswirkungen auf das Wirtgestein
- Wärmeentwicklung
- Gehalt an potenziell Gas produzierenden Bestandteilen (Metalle, Organika)
- Gehalt an Komplexbildnern

Die Eigenschaften der Abfälle werden im nachfolgenden Kap. 3.2.2 beschrieben.

3.2.2 Beschreibung der Abfälle und ihrer Eigenschaften

In Kap. 3.2.2 soll nach einer kurzen Beschreibung der Abfälle vertieft auf ihre Eigenschaften bzgl. der im Sachplan geologische Tiefenlager bezeichneten Merkmale eingegangen werden, gegliedert nach Abfallkategorien gemäss Definition KEV (s. Kap. 2.5.2). Die Erkenntnisse aus

---

[37] Lagerkompartiment: Lagerkammern, die für spezifische Abfälle vorgesehen sind und die von den anderen Lagerkompartimenten im erforderlichen Mass abgetrennt sind.

[38] Es würde z.B. keinen Sinn machen, für ein kleines Volumen von SMA-Abfällen ein separates SMA-Lager zu erstellen.

einem Vergleich der Abfälle bzgl. dieser Eigenschaften werden bei der Abfallzuteilung berücksichtigt (Kap. 3.2.3). Die Zuordnung der Abfälle zu den Abfallkategorien gemäss Definition KEV sowie sämtliche weiteren Informationen zu den Abfällen sind im MIRAM-Bericht[39] beschrieben (Nagra 2008d). Die Beschreibung der Abfälle und ihrer Eigenschaften basiert auf dem Abfallinventar aus den bestehenden KKW bei einer angenommenen Betriebsdauer von 50 Jahren und einer Sammelperiode für die Abfälle aus Medizin, Industrie und Forschung bis 2050. Die Abfälle von allfälligen zukünftigen KKW (Leichtwasser-Reaktoren) sind denjenigen der bestehenden KKW sehr ähnlich bzgl. ihres Nuklid- und Materialinventars. Deshalb ist die vorliegende Beschreibung der Abfälle auch für das umhüllende Abfallinventar repräsentativ.

Hochaktive Abfälle

(i) Abgebrannte Brennelemente (BE)

Hier handelt es sich um abgebrannte Brennelemente aus Kernkraftwerken. Die Brennelemente bestehen aus UO_2- oder Mischoxid-Brennstofftabletten, die in Hüllrohren aus Zircaloy enthalten sind. Die Hüllrohre werden mittels metallischen Strukturelementen zu den eigentlichen Brennelementen zusammengefasst. Die abgebrannten Brennelemente werden ganz (d.h. unzerlegt) in dickwandige Endlagerbehälter für die geologische Tiefenlagerung verpackt.

(ii) Verglaste Spaltproduktlösungen aus der Wiederaufarbeitung von abgebrannten Brennelementen (HAA)

Bei diesen Abfällen handelt es sich um verglaste hochaktive Abfälle, welche den grössten Teil der Radionuklide aus den wiederaufgearbeiteten Brennelementen enthalten. Das flüssige Glas wird in dünnwandige zylindrische Stahlkokillen eingegossen, welche dann versiegelt werden. Nach der Abkühlung bildet das Glas eine homogene Abfallmatrix. Die dünnwandigen Stahlkokillen werden dann in dickwandige Endlagerbehälter für die geologische Tiefenlagerung eingebracht.

Alphatoxische Abfälle (ATA) und schwach- und mittelaktive Abfälle (SMA)

Bei den ATA und den SMA handelt es sich um ein breites Spektrum von Abfallsorten:

- Abfälle aus der Wiederaufarbeitung von abgebrannten Brennelementen
- Betriebsabfälle der KKW (Harze, Konzentrate, Schlämme, Mischabfälle), inkl. der SMA der Nachbetriebsphase zwischen der Abschaltung der KKW und dem Start der Stilllegungsarbeiten
- Reaktorabfälle der KKW (aktivierte bzw. kontaminierte austauschbare Reaktoreinbauten)
- Stilllegungsabfälle der KKW
- Betriebs- und Stilllegungsabfälle des ZWILAG (insb. Abfallbehandlungsanlagen)
- Betriebs- und Stilllegungsabfälle des PSI und des CERN
- Betriebs- und Stilllegungsabfälle der Brennelement-Verpackungsanlage (BEVA)

Diese Abfallsorten bestehen aus Metallen, organischen und anorganischen Materialien. Sie werden entweder mit Zement verfestigt, mit Bitumen gemischt oder mit Polystyrol vergossen und in Stahl- resp. Betongebinden verpackt. Für die geologische Tiefenlagerung werden die so

[39] MIRAM: Modellhaftes Inventar Radioaktiver Materialien (s. Kap. 2.5.2).

verpackten Abfälle dann in Endlagerbehälter aus Beton eingebracht, wobei die Hohlräume zwischen den einzelnen Abfallgebinden mit einem Zementmörtel verfüllt werden.

3.2.2.1 Aktivität

Fig. 3.2-1a zeigt die Entwicklung der Aktivität der Abfallkategorien gemäss KEV[40]. Bei der Aktivität dominieren die HAA, gefolgt von den SMA und den ATA. Dabei muss berücksichtigt werden, dass das Volumen der hier betrachteten SMA (75'190 m^3)[41] um einen Faktor 33 grösser ist als das Volumen der ATA (2'280 m^3). Bezogen auf eine Volumeneinheit ("spezifische Aktivität") liegt die Aktivität der ATA über derjenigen der SMA (Fig. 3.2-1b). Die gestrichelten Kurven zeigen die alpha-Anteile der Aktivität, die gepunkteten Kurven die beta/gamma-Anteile. Hier fällt auf, dass wie erwartet die alpha-Aktivität der ATA deutlich über derjenigen der SMA liegt, trotz des erwähnten Unterschieds im Volumen.

3.2.2.2 Radiotoxizität

Fig. 3.2-2a zeigt die Entwicklung der Radiotoxizität der Abfallkategorien gemäss KEV[40]. Hier dominieren ebenfalls die HAA. Bei den ATA und den SMA ist die Reihenfolge über einen weiten Zeitraum nun wie erwartet (die ATA liefern einen höheren Beitrag als die SMA), trotz der bedeutend kleineren Mengen. Bei der spezifischen Radiotoxizität wird dieser Unterschied noch vergrössert (Fig. 3.2-2b). Die Reduktion der Radiotoxizität als Funktion der Zeit fällt bei den SMA deutlich stärker aus als bei den ATA; dies aufgrund des geringeren Gehalts an Alphastrahlern bei den SMA. Vergleicht man die Radiotoxizitätskurven für ATA (Fig. 3.2-2a) und für die im Projekt Opalinuston als LMA resp. auf Englisch als ILW (long-lived intermediate level waste) bezeichneten Abfälle (Fig. 2.5-1 in Nagra 2002c), so fällt auf, dass sie nahezu identisch sind.

Fig. 3.2-2c zeigt die Entwicklung der Radiotoxizität der ATA und SMA, wobei hier jede Abfallsorte einzeln dargestellt ist. Diejenigen Abfallsorten, die zu irgendeinem Zeitpunkt mehr als 1 % zur Gesamttoxizität beitragen, sind speziell hervorgehoben und namentlich bezeichnet. Es fällt auf, dass es bzgl. Radiotoxizität sehr grosse Unterschiede gibt zwischen den einzelnen Abfallsorten. Dies illustriert, dass die Abfallzuteilung ein wirksames Instrument bei der Planung von geologischen Tiefenlagern bzw. bei der Festlegung der sicherheitstechnischen Anforderungen an die Geologie ist.

3.2.2.3 Wärmeleistung

Fig. 3.2-3a zeigt die Entwicklung der Wärmeleistung der Abfallkategorien gemäss KEV[40]. Auch hier liefern die HAA den bedeutendsten Beitrag. Bei den ATA und den SMA dominieren zu Beginn die SMA; die SMA fallen aber aufgrund des geringeren alpha-Anteils deutlich schneller ab als die ATA, so dass nach ca. 500 Jahren die ATA dominieren. Bezogen auf ein Einheitsvolumen (spezifische Wärmeleistung) dominieren die ATA die SMA (Fig. 3.2-3b).

---

[40] Diese Berechnungen basieren auf dem Abfallinventar aus den bestehenden KKW bei einer angenommenen Betriebsdauer von 50 Jahren und einer Sammelperiode für die Abfälle aus Medizin, Industrie und Forschung bis 2050. Das Jahr 2050 entspricht auch dem Beginn der Zeitskala für die Berechnungen. Die Resultate sind auch für das umhüllende Abfallinventar repräsentativ.

[41] Dazu kommen 2'220 m^3 für die BEVA-Abfälle und für die Planung eine Reserve von 12'000 m^3 für heute noch nicht im Detail spezifizierte SMA-Abfälle, z.B. aus dem CERN und dem PSI. Für diese Abfälle liegt wegen ihrer vorläufigen Natur noch kein Nuklid-Inventar vor. Es ist zu erwarten, dass es sich dabei ausschliesslich um SMA-Abfälle handelt (vgl. Tab. 2.5-1a).

3.2.2.4 Materialinventar

Tab. 3.2-1 zeigt das Materialinventar der SMA, ATA und HAA, jeweils total (in kg) und bezogen auf eine Volumeneinheit Abfälle (verpackt in Endlagerbehälter, in kg/m^3)[40]. Vergleicht man zunächst die HAA einerseits mit den SMA und den ATA andererseits, so fällt auf, dass bei den HAA keine Organika vorkommen. Ein Vergleich der SMA- und ATA-Materialinventare pro Volumeneinheit zeigt, dass im allgemeinen die Unterschiede weniger als eine Zehnerpotenz betragen, mit 6 Ausnahmen, die im folgenden kurz diskutiert werden. (i) Zircaloy: Der deutlich höhere Gehalt an Zircaloy bei den ATA ist zurückzuführen auf die Hülsen und Endstücke aus der Wiederaufarbeitung von abgebrannten Brennelementen. (ii) Blei: Der deutlich höhere Gehalt an Blei der SMA stammt von den sogenannten MOSAIK-II-Behältern, in die gewisse SMA, aber keine ATA verpackt sind und die signifikante Mengen an Blei enthalten. (iii) Kupfer: Der höhere Gehalt an Kupfer der SMA ist zurückzuführen auf gewisse Forschungsabfälle (aktivierte Beschleunigerkomponenten), die in die Kategorie SMA fallen. (iv) Silber: Die ATA enthalten kein Silber. Der Grund liegt darin, dass Teile der silberhaltigen Steuerstäbe der Druckwasserreaktoren in die Kategorie SMA fallen. (v) Salze: Der höhere Gehalt an Salzen bei den ATA kann auf eine einzige Abfallsorte, nämlich die Bitumen-haltigen Abfälle aus der Wiederaufarbeitung von abgebrannten Brennelementen bei AREVA (früher: Cogema)[42], zurückgeführt werden. (vi) Detergentien: Der höhere Gehalt an Detergentien bei den ATA ist auf gewisse Forschungsabfälle zurückzuführen.

3.2.2.5 Gasbildung

Fig. 3.2-4a zeigt die Gasbildungsraten für die SMA und die ATA[40]. Aufgrund der grösseren Mengen dominieren die SMA; werden hingegen die Gasbildungsraten pro Volumeneinheit betrachtet, so sind die Unterschiede äusserst gering (Fig. 3.2-4b). Die Berechnungen basieren auf der anaeroben Korrosion von Metallen[43] und auf der Zersetzung von Organika (s. auch Nagra 2008h). Für die BE und HAA (nicht eingezeichnet in Fig. 3.2-4a und 3.2-4b) wurde aufgrund der anaeroben Korrosion der Stahlbehälter im Projekt Entsorgungsnachweis eine konstante Rate[44] von 240 m^3/a berechnet für eine Zeitdauer von knapp 200'000 Jahren (Nagra 2004a). Aufgrund eines gegenüber dem Projekt Entsorgungsnachweis reduzierten Inventars und unter Berücksichtigung des geänderten Behälterkonzepts für die verglasten HAA (neu: 2 Kokillen pro Endlagerbehälter) reduziert sich dieser Wert auf (gerundet) 180 m^3/a für das vorliegende Projekt, wobei jeweils von einer (pessimistischen) Gasbildungsrate von 4 Mol pro Jahr und BE-Behälter ausgegangen wurde (Nagra 2004a). Dies entspricht einer spezifischen Gasbildungsrate von 0.025 m^3 Gas pro Jahr und pro m^3 in Endlagerbehälter verpackte BE/HAA.

---

[42] Von der Nagra und den Betreibern der KKW wurde bei AREVA (früher: Cogema) darauf hingewirkt, dass geplante organische Beimischungen in ansonsten metallischen Abfällen mit hoher Wahrscheinlichkeit vermieden werden und AREVA plant, die Konditionierung von Rohabfällen mit Bitumen durch eine Methode ohne Organika zu ersetzen.

[43] Dabei werden die Abfälle selbst, die Abfallgebinde und die Armierungen der Endlagerbehälter berücksichtigt.

[44] Summe über alle BE und HAA-Behälter.

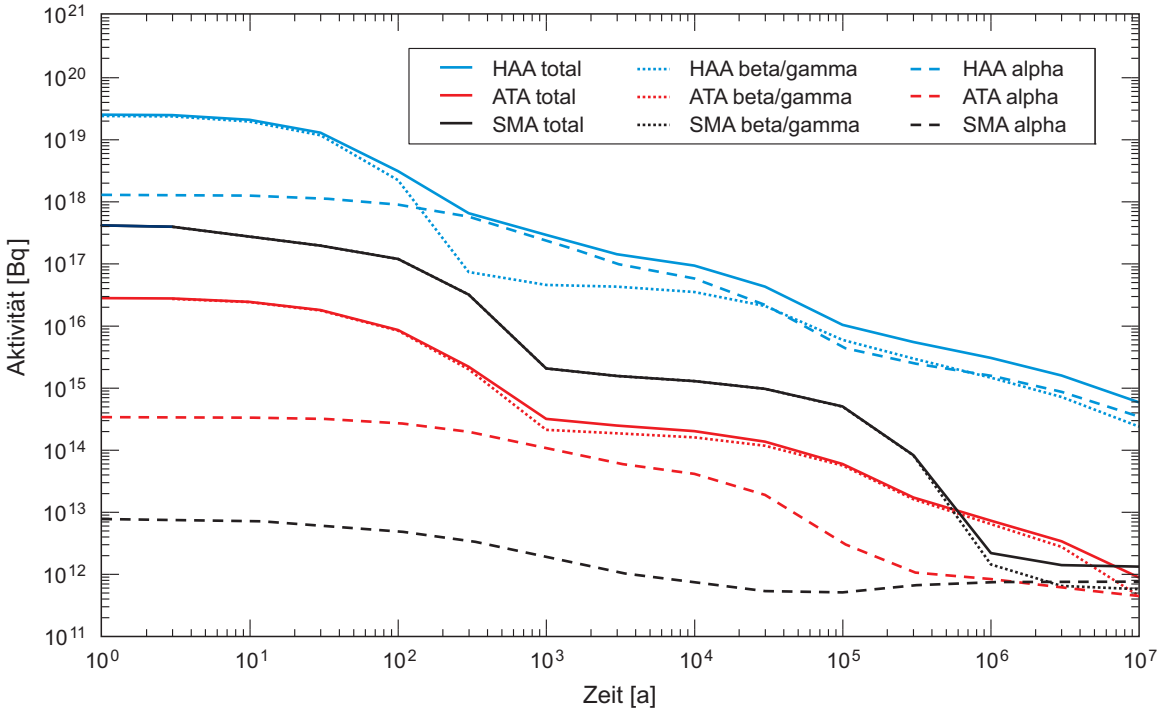


Fig. 3.2-1a: Zeitliche Entwicklung der Aktivität der Abfallkategorien gemäss Definition KEV.

Inventar: Siehe Fussnote 40.

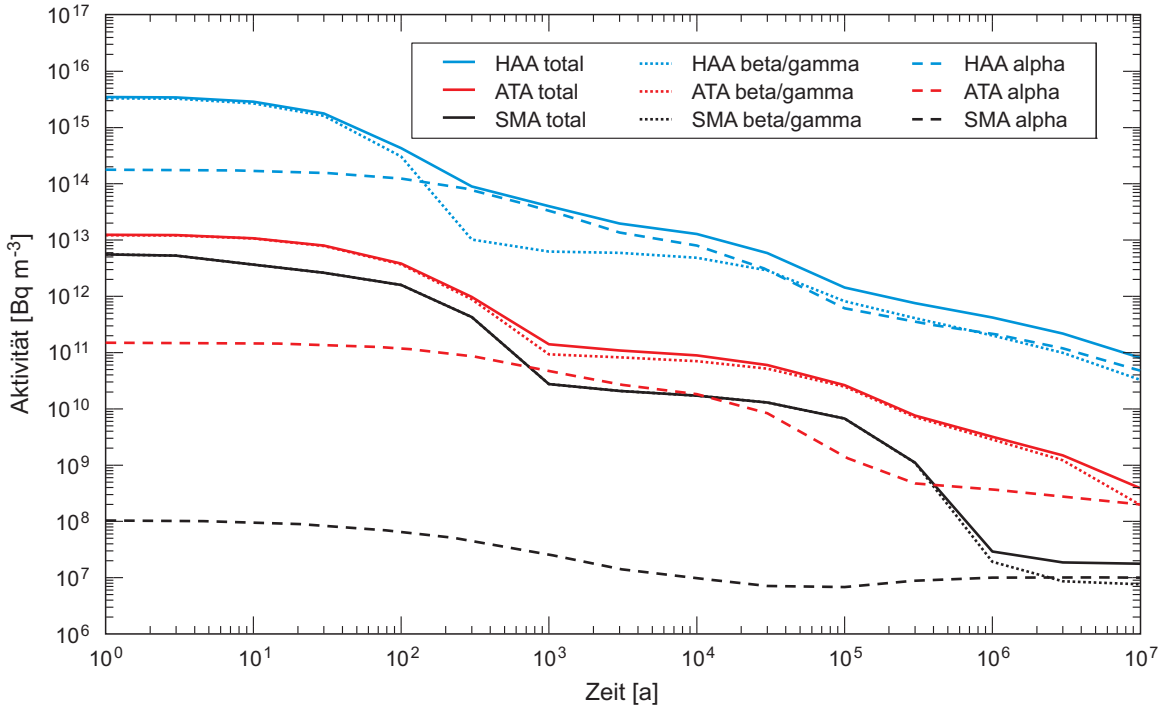


Fig. 3.2-1b: Zeitliche Entwicklung der spezifischen Aktivität der Abfallkategorien gemäss Definition KEV.

Inventar: Siehe Fussnote 40.

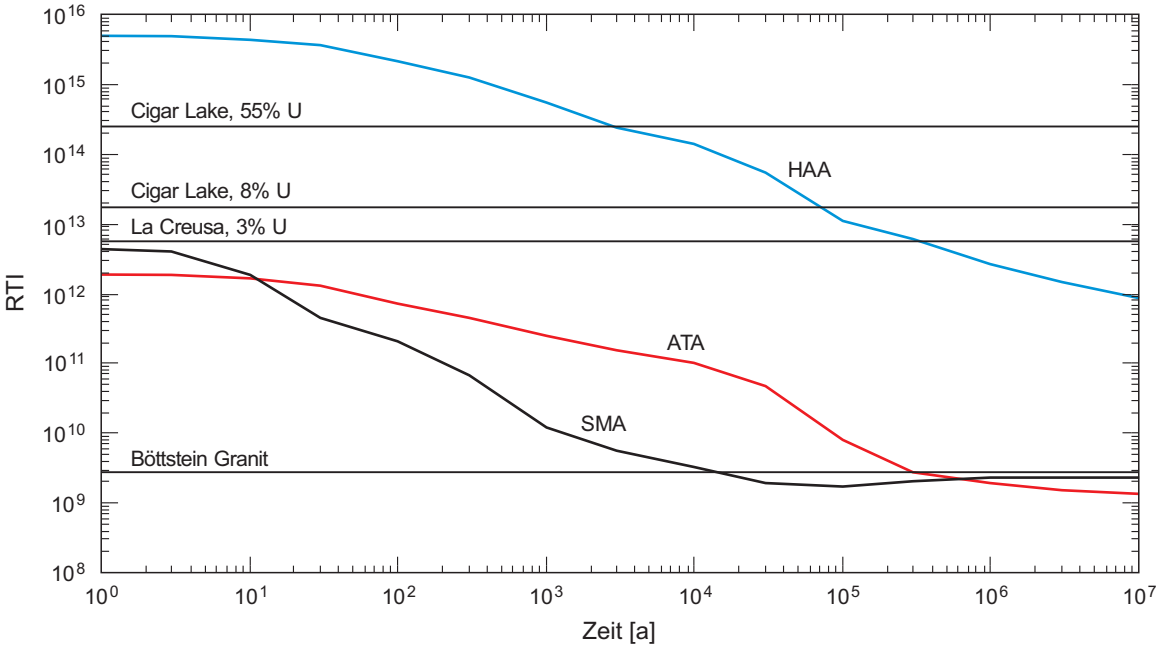


Fig. 3.2-2a: Zeitliche Entwicklung der Radiotoxizität der Abfallkategorien gemäss Definition KEV.

Der Radiotoxizitätsindex (RTI) ist hier in Analogie zur bisherigen Praxis (s. z.B. Nagra 2002c, Appendix 3) wie folgt definiert: $RTI(t) = \Sigma_j A_j(t)\, F_j/(10^{-4}\ Sv)$; wobei $A_j(t)$ die Aktivität [Bq] des Nuklids j zur Zeit t und F_j der Dosiskoeffizient [Sv/Bq] für Ingestion für Nuklid j ist. Die horizontalen Referenzlinien entsprechen dem RTI derjenigen Mengen der bezeichneten natürlichen Stoffe (natürliches Uran-Erz mit den angegebenen Urankonzentrationen bzw. Granit aus der Bohrung Böttstein), die dem Volumen der für alle Abfälle benötigten Lagerstollen- resp. Tunnels entsprechen. Inventar: Siehe Fussnote 40.

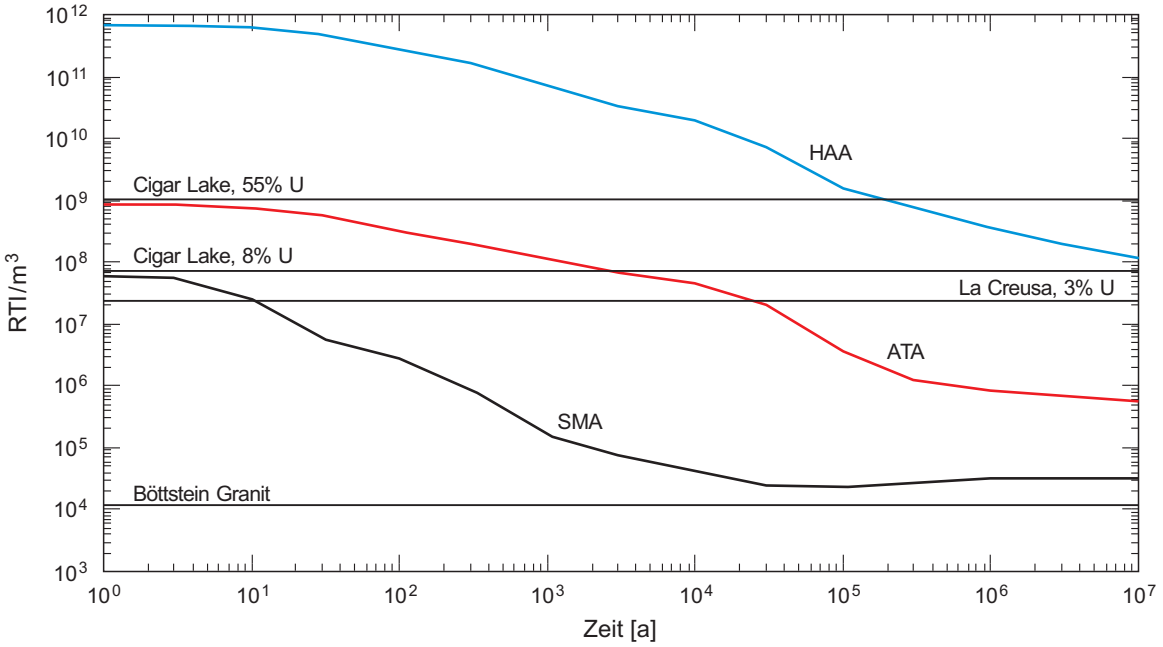


Fig. 3.2-2b: Zeitliche Entwicklung der spezifischen Radiotoxizität der Abfallkategorien gemäss Definition KEV.

Inventar: Siehe Fussnote 40.

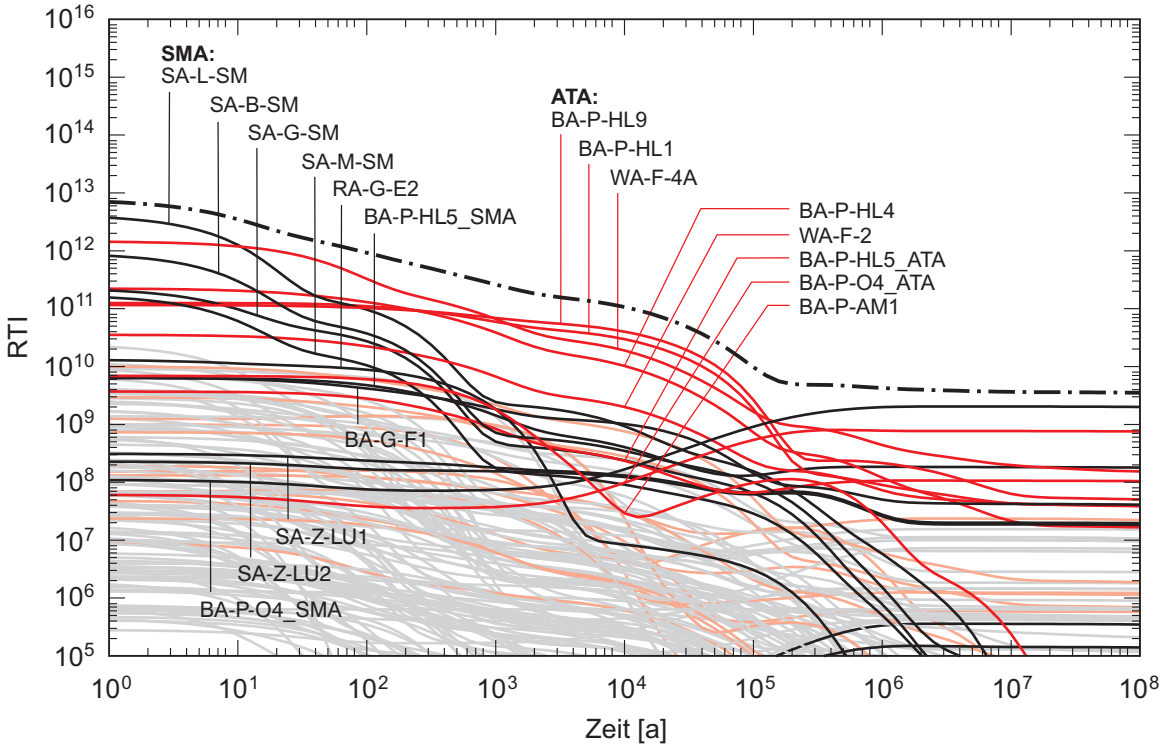


Fig. 3.2-2c: Zeitliche Entwicklung der Radiotoxizität der einzelnen Abfallsorten der Abfallkategorien ATA (rot) und SMA (schwarz).

Diejenigen Abfallsorten, die zu irgend einem Zeitpunkt mehr als 1 % zur Gesamttoxizität beitragen, sind speziell hervorgehoben und namentlich bezeichnet. Total gibt es 21 ATA- und 126 SMA-Abfallsorten. Von insgesamt 10 Abfallsorten gibt es je einen ATA- und einen SMA-Anteil. Diese Anteile werden hier als eigenständige Abfallsorten betrachtet (z.B. BA-P-O4_ATA und BA-P-O4_SMA). Inventar: Siehe Fussnote 40.

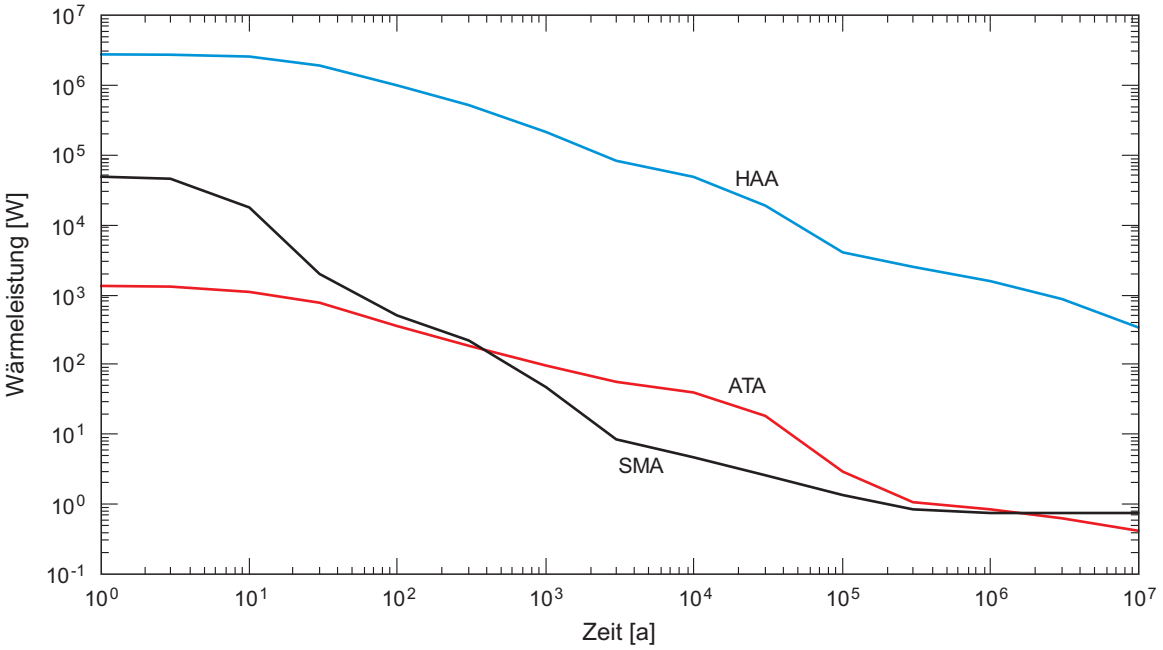


Fig. 3.2-3a: Zeitliche Entwicklung der Wärmeleistung der Abfallkategorien gemäss Definition KEV.

Inventar: Siehe Fussnote 40.

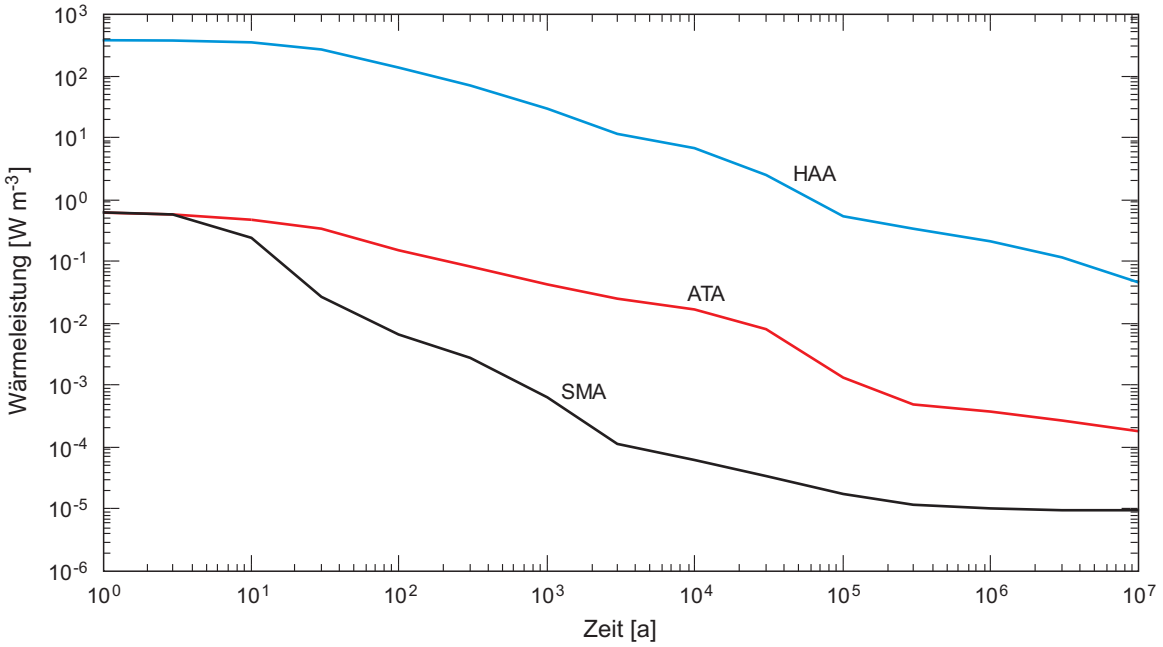


Fig. 3.2-3b: Zeitliche Entwicklung der spezifischen Wärmeleistung der Abfallkategorien gemäss Definition KEV.

Inventar: Siehe Fussnote 40.

Tab. 3.2-1: Inventar der metallischen, anorganischen und organischen Materialien.

Alle Angaben ohne Endlagerbehälter, ohne BEVA-Abfälle und ohne 12'000 m^3 Reserve, vgl. Tab. 2.5-1a. Die Angaben pro Kubikmeter entsprechen den Massen [kg] dividiert durch das Gesamtvolumen der in Endlagerbehälter verpackten Abfälle. Diese Daten basieren auf dem Abfallinventar aus den bestehenden KKW bei einer angenommenen Betriebsdauer von 50 Jahren und einer Sammelperiode für die Abfälle aus Medizin, Industrie und Forschung bis 2050 (vgl. Nagra 2008d). Sie sind auch für das umhüllende Abfallinventar repräsentativ.

	SMA		**ATA**		**HAA**	
	[kg]	[kg/m^3]	[kg]	[kg/ m^3]	[kg]	[kg/ m^3]
Metalle	3.85E+07	5.12E+02	5.82E+05	2.56E+02	1.13E+06	1.54E+02
Stahl/Eisen	3.68E+07	4.90E+02	2.91E+05	1.28E+02	2.17E+05	2.96E+01
Aluminium/Zink	3.70E+05	4.92E+00	1.78E+03	7.82E-01	0.00E+00	0.00E+00
Zircaloy	9.57E+04	1.27E+00	2.88E+05	1.27E+02	9.10E+05	1.24E+02
Blei	7.56E+05	1.01E+01	4.98E+00	2.19E-03	0.00E+00	0.00E+00
Buntmetalle/Kupfer	4.49E+05	5.97E+00	8.19E+02	3.60E-01	0.00E+00	0.00E+00
Silber	7.44E+03	9.89E-02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
andere	4.04E+04	5.37E-01	1.23E+03	5.42E-01	1.96E+03	2.68E-01
Anorganika	9.81E+07	1.30E+03	6.26E+05	2.75E+02	2.99E+06	4.09E+02
Salze	1.85E+03	2.47E-02	8.35E+03	3.67E+00	0.00E+00	0.00E+00
Glas	5.31E+05	7.06E+00	4.97E+03	2.18E+00	1.96E+05	2.68E+01
Zementartige Materialien	9.59E+07	1.27E+03	5.86E+05	2.58E+02	0.00E+00	0.00E+00
U-/Pu-Oxide	3.34E+02	4.44E-03	7.68E+01	3.37E-02	2.65E+06	3.62E+02
andere	1.66E+06	2.21E+01	2.60E+04	1.14E+01	1.51E+05	2.06E+01
Hochmolekulare Organika	2.02E+06	2.69E+01	7.93E+04	3.48E+01	0.00E+00	0.00E+00
Bitumen	2.94E+05	3.91E+00	4.76E+04	2.09E+01	0.00E+00	0.00E+00
Zellulose	8.71E+04	1.16E+00	1.46E+04	6.40E+00	0.00E+00	0.00E+00
Kunststoffe	1.63E+06	2.17E+01	1.71E+04	7.53E+00	0.00E+00	0.00E+00
andere	6.71E+03	8.92E-02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Niedermolekulare Organika	1.89E+05	2.52E+00	4.72E+03	2.07E+00	0.00E+00	0.00E+00
Detergentien	8.25E+02	1.10E-02	7.61E+02	3.34E-01	0.00E+00	0.00E+00
Komplexbildner	6.77E+04	9.01E-01	6.24E+02	2.74E-01	0.00E+00	0.00E+00
andere	1.21E+05	1.61E+00	3.33E+03	1.46E+00	0.00E+00	0.00E+00
Total	**1.39E+08**	**1.85E+03**	**1.29E+06**	**5.68E+02**	**4.12E+06**	**5.63E+02**

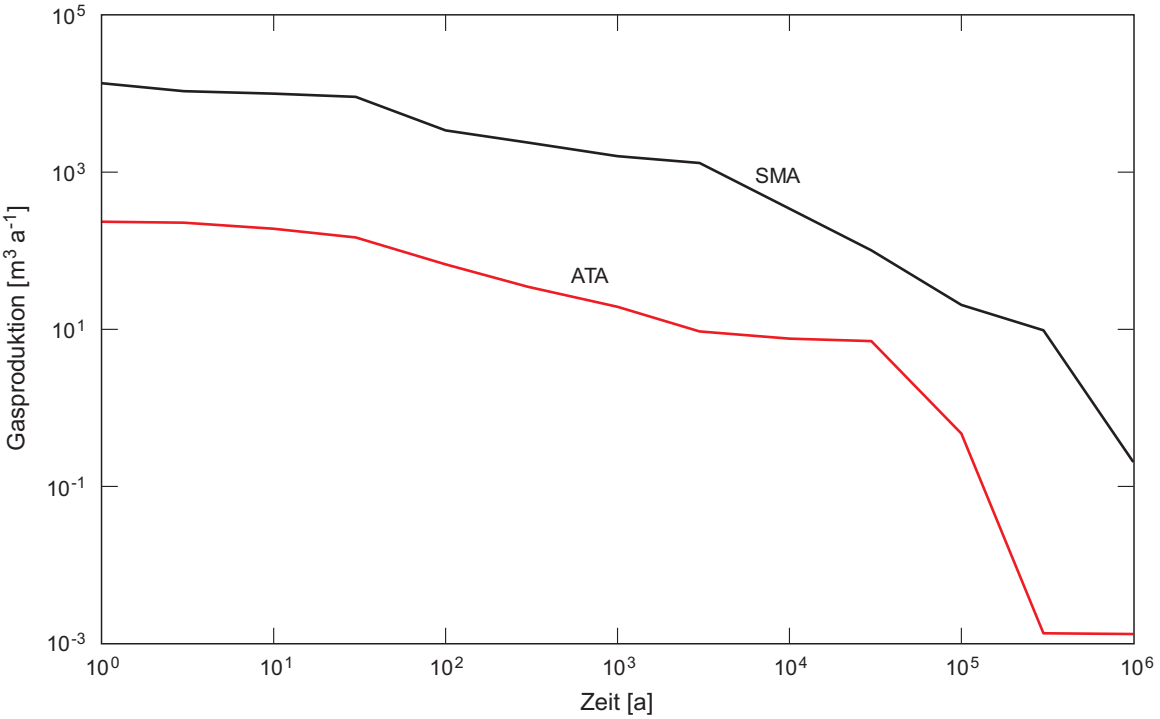


Fig. 3.2-4a: Zeitliche Entwicklung der Gasbildungsraten für ATA und SMA gemäss KEV.

Inventar: Siehe Fussnote 40.

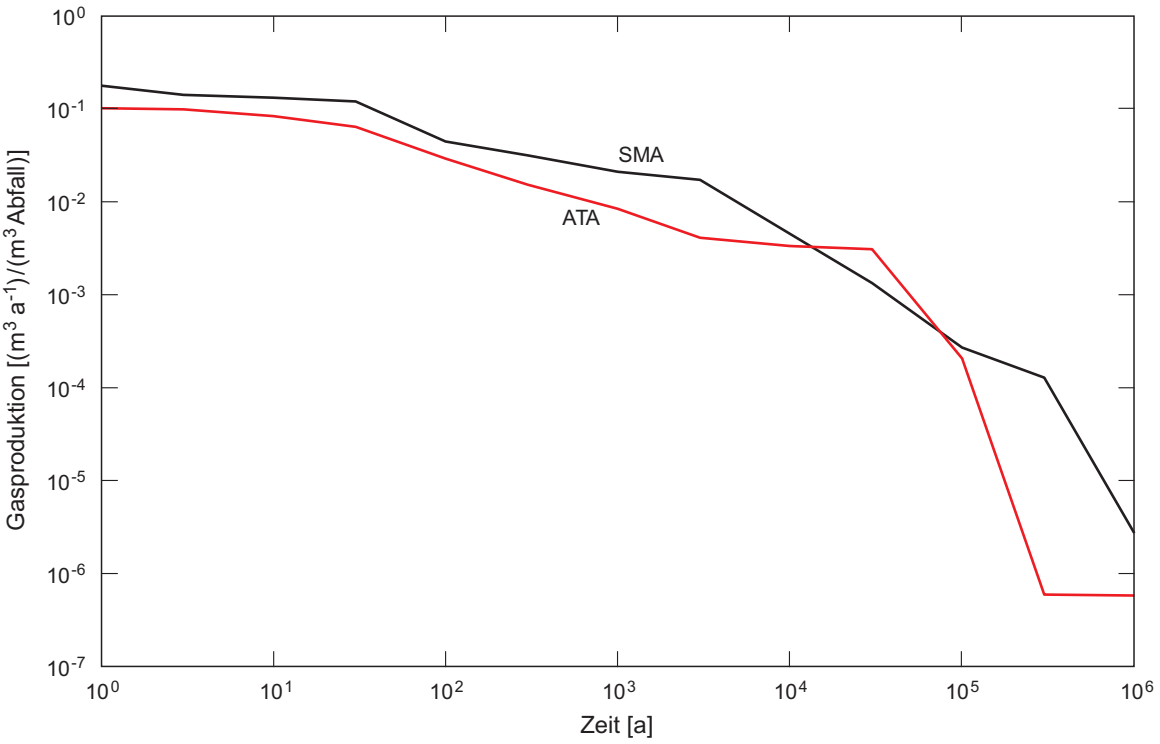


Fig. 3.2-4b: Zeitliche Entwicklung der spezifischen Gasbildungsraten für ATA und SMA gemäss KEV pro Kubikmeter verpacktes Volumen.

Inventar: Siehe Fussnote 40.

Tab. 3.2-2 gibt eine zusammenfassende Übersicht über die für die Abfallzuteilung und die Lagerauslegung relevanten Abfalleigenschaften. Die diesbezüglichen Erkenntnisse und Folgerungen für die Abfallzuteilung werden in Kap. 3.2.3 diskutiert.

Tab. 3.2-2: Für die Abfallzuteilung und die Lagerauslegung relevante Abfalleigenschaften.

Inventar	**Abfalleigenschaft**	**Relevanz**
Nuklidinventar	Aktivität und Radiotoxizität der Radionuklide	Definition ATA gemäss KEV; Beurteilung der radiologischen Sicherheit des geologischen Tiefenlagers; Dosisberechnung (Einhaltung Schutzziel)
	Wärmeentwicklung	Lagerauslegung (Behälterabstand, Stollenabstand); Auswirkungen auf technische Barrieren und Wirtgestein (nur relevant für HAA)
	Zeitliche Entwicklung der Aktivität, Radiotoxizität und Wärmeentwicklung (Halbwertszeiten)	Minimal notwendige Einschlussdauer (Radiotoxizität); Lagerauslegung (Wärmeentwicklung)
Materialinventar (Abfallmatrix, Abfallbehälter)	Abfallvolumen	Platzbedarf; Lagerauslegung
	Materialeigenschaften	Lagerauslegung (Berücksichtigung möglicher Auswirkungen auf die technischen Barrieren und auf das Wirtgestein)
	Gehalt an potenziell Gas produzierenden Bestandteilen (Metalle, Organika)	Lagerauslegung (Berücksichtigung möglicher Auswirkungen des Gases auf die Integrität der technischen Barrieren und des Wirtgesteins); Radionuklid-freisetzung und –transport
	Gehalt an Komplexbildnern	Lagerauslegung: Räumliche Trennung von Abfällen mit hohem Gehalt an Komplexbildnern (möglicher Einfluss auf die Radionuklidrückhaltung im Nahfeld) und solchen mit geringem Gehalt an Komplexbildnern (nur relevant für ATA und SMA)

3.2.3 Erkenntnisse aus dem Vergleich der Abfälle und Folgerungen für die Abfallzuteilung

HAA im Vergleich mit ATA/SMA

- **Unterschiede zwischen HAA einerseits und ATA/SMA andererseits –** Alle Abfalleigenschaften der HAA unterscheiden sich deutlich von denjenigen sowohl der ATA als auch der SMA. Dies gilt insbesondere für die Radiotoxizität, wo die Werte für die HAA sowohl absolut als auch bezogen auf ein Einheitsvolumen um mehrere Grössenordnungen über denjenigen für die ATA und die SMA liegen.
- **Folgerung für die Abfallzuteilung –** Die HAA werden gemäss bisherigem Konzept in einem separaten Lager, mit einem spezifisch auf die HAA abgestimmten Barrierensystem, entsorgt (s. Kap. 4).

ATA im Vergleich mit SMA

- **Unterschiede zwischen ATA und SMA –** Die ATA und die SMA unterscheiden sich bzgl. spezifischer Radiotoxizität, bzgl. spezifischer Aktivität und bzgl. spezifischer Wärmeleistung, sowohl was die absoluten Werte betrifft als auch insbesondere in Bezug auf den zeitlichen Verlauf. Hingegen gibt es auf Stufe der Abfallsorten eine starke Überlappung (vgl. Fig. 3.2-2c).
- **Gemeinsamkeiten zwischen ATA und SMA –** Hinsichtlich vieler anderer Eigenschaften sind die ATA und die SMA sehr ähnlich. Dies trifft insbesondere zu auf das Materialinventar (Tab. 3.2-1) und die spezifische Gasbildungsrate (Fig. 3.2-4b).
- **Folgerung für die Abfallzuteilung –** Grundsätzlich ist ein gemeinsames Lager für alle ATA und SMA denkbar. Die Erfahrung zeigt einerseits, dass ein solches Lager in einem günstigen Wirtgestein in einer günstigen geologischen Situation das Potenzial hat, die behördlichen Sicherheitsanforderungen zu erfüllen. Andererseits dominieren erfahrungsgemäss einige wenige Abfallsorten die berechneten Dosen. Dies ist beispielhaft illustriert in den Fig. 3.2-5a/b und 3.2-6a/b. Diese Figuren zeigen, dass in den betrachteten Rechenfällen durch eine gezielte Reduktion des Abfallvolumens um etwas weniger als 1 % (d.h. durch Wegnahme der dosisdominierenden Abfallsorten) die berechneten Dosismaxima um mehr als eine Grössenordnung abnehmen. Eine weitere wichtige Erfahrungstatsache ist, dass für praktisch alle Rechenfälle immer etwa die gleichen Abfallsorten die Summendosis bestimmen (s. Anhang A4.6). Falls also diese dosisdominierenden Abfallsorten anderweitig entsorgt werden könnten, würden sich deshalb bei gleichbleibender Sicherheit die sicherheitstechnischen Anforderungen an die Geologie entsprechend reduzieren, mit entsprechend erweiterten Möglichkeiten, geeignete Standortgebiete zu finden. Aus diesen Gründen wird am bisherigen Konzept mit einem HAA-Lager mit LMA-Teil und einem SMA-Lager festgehalten mit dem Ziel, die dosisdominierenden ATA- bzw. SMA-Abfallsorten dem LMA-Lager zuzuteilen, so dass die sicherheitstechnischen Anforderungen an die Geologie für das SMA-Lager entsprechend reduziert werden können. Die ATA/SMA werden hauptsächlich aufgrund von generischen Dosisberechnungen auf die beiden Lager aufgeteilt, da sich die ATA und die SMA bzgl. Materialinventar und Gasbildungsraten nur geringfügig unterscheiden und da sowohl das HAA-Lager (inkl. LMA-Teil) und das SMA-Lager so ausgelegt werden, dass lagerbedingte Einflüsse, die von den Abfällen ausgehen, die Langzeitsicherheit nicht signifikant beeinträchtigen. Nach erfolgter Abfallzuteilung werden das Barrieren- und Sicherheitskonzept (Kap. 4) und die sicherheits- und bautechnischen Anforderungen an

die Geologie (Kap. 5) für beide Lager festgelegt. Im Kap. 3.2.4 wird das Vorgehen vorgestellt, wie die dosisdominierenden Abfallsorten aus den KEV-Abfallkategorien ATA und SMA identifiziert werden können.

Zusammenfassung: Prinzipien für die Abfallzuteilung

- Am bisherigen schweizerischen Entsorgungskonzept mit einem HAA-Lager mit einem räumlich abgetrennten LMA-Teil und einem SMA-Lager wird festgehalten.
- Die ATA und SMA werden hauptsächlich basierend auf den Resultaten von generischen (d.h. standortunabhängigen) Dosisberechnungen sowie aufgrund ihrer Radiotoxizität auf das LMA- bzw. SMA-Lager aufgeteilt, da sich die ATA und die SMA bzgl. Materialinventar und Gasbildungsraten nur geringfügig unterscheiden. Dabei werden die Beiträge der Abfallsorten zur Gesamtdosis, die Volumina und Art der im SMA-Lager verbleibenden Abfälle und die sicherheitstechnischen Anforderungen an die Geologie berücksichtigt.
- Sowohl das HAA-Lager inkl. LMA-Teil als auch das SMA-Lager werden so ausgelegt, dass die von den Abfällen ausgehenden Einflüsse die Langzeitsicherheit nicht signifikant beeinträchtigen.

3.2.4 Identifikation der dosisdominierenden Abfallsorten

Die dosisdominierenden Abfallsorten werden nach folgendem Schema identifiziert:

1. **Definition von Rechenfällen und Durchführung der Rechnungen –** Ausgehend vom Inventar, bestehend aus allen Abfallsorten der KEV-Abfallkategorien ATA und SMA, werden sicherheitstechnische Rechnungen[45] für ein generisches geologisches Tiefenlager SMA und für ein breites Spektrum von generischen Wirtgesteinstypen und -Situationen durchgeführt. Diese Rechnungen betreffen die Zeitperiode, während der die Abfälle ein im Vergleich zu natürlichen radiologischen Umweltrisiken erhöhtes radiologisches Gefährdungspotenzial darstellen und in der das Barrierensystem seine Sicherheitsfunktionen erfüllt. Für noch grössere Zeiträume kann nicht ausgeschlossen werden, dass der Bereich mit den Lagerkammern aufgrund geologischer Vorgänge zunehmend Einflüssen der Erdoberfläche ausgesetzt wird. Für diese Zeiträume und für dieses Szenario werden vereinfachte Rechnungen durchgeführt. Sämtliche Rechnungen werden so strukturiert, dass der Einfluss der einzelnen Abfallsorten auf die berechnete Dosis sehr einfach analysiert werden kann (Methodik der dosisdominierenden Abfallsorten DDAS, s. Anhang 4).
2. **Auswertung der Resultate –** Die Resultate dieser Rechnungen werden ausgewertet mit Vorgaben bzgl. der maximal zulässigen Dosis. Eine solche Analyse erlaubt zwei Arten von Schlussfolgerungen: (i) Sie zeigt auf, welche Wirtgesteinstypen und -situationen voraussichtlich für ein geologisches Tiefenlager für sämtliche ATA & SMA gemäss Definition KEV geeignet wären; (ii) sie zeigt auf, für welche Wirtgesteinstypen und -situationen bei Wegnahme von bestimmten dosisdominierenden Abfallsorten die vorgegebene Dosislimite voraussichtlich eingehalten werden kann. Für jeden Rechenfall unter (iii) ergibt sich also eine Liste mit den dem HAA-Lager (Teil LMA) zuzuteilenden ATA/SMA-Abfallsorten. Dabei ist es wichtig, nur diejenigen Rechenfälle zu betrachten, bei denen bei ausgewogenen sicherheitstechnischen Anforderungen an die Geologie noch ein vertretbares Abfallvolumen im SMA-Lager verbleibt; d.h. ein Volumen, das den Bau eines SMA-Lagers rechtfertigt.

[45] Freisetzung und Transport von im Grundwasser gelösten Radionukliden, analog dem Referenz-Szenarium im Projekt Entsorgungsnachweis (Nagra 2002c) und im Projekt Wellenberg (Nagra 1994).

3. **Festlegung der Abfallzuteilung –** Die in Schritt 2, Schlussfolgerung (ii) erhaltenen Listen mit den dem HAA-Lager (Teil LMA) zuzuteilenden Abfallsorten werden zu einer einzigen Liste zusammengefasst, die alle dosisdominierenden ATA/SMA-Abfallsorten umfasst. Dies erlaubt die Definition eines reduzierten Inventars für das SMA-Lager, welches alle ATA/ SMA-Abfallsorten umfasst, abzüglich der dem HAA-Lager (Teil LMA) zugeteilten Abfallsorten.

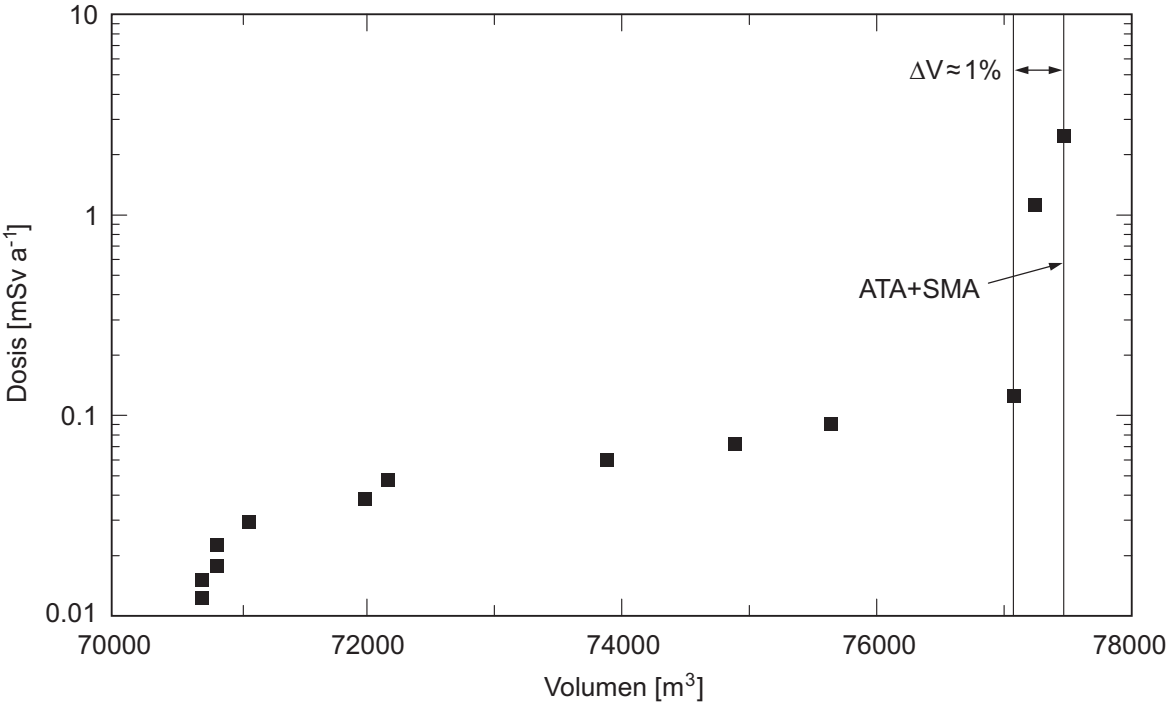


Fig. 3.2-5a: Berechnete Dosis als Funktion des Abfallvolumens im SMA-Lager für ein homogen-poröses Wirtgestein ohne Störungszonen.

Die Figur zeigt beispielhaft, dass, ausgehend vom Abfallvolumen ATA + SMA gemäss Definition KEV, bei einer schrittweisen Wegnahme von Abfallsorten nach abnehmendem Dosisbeitrag die berechnete Dosis deutlich reduziert wird. Eine gezielte Reduktion des Abfallvolumens um etwas weniger als 1 % bewirkt für diesen Rechenfall eine Reduktion der berechneten Dosis um mehr als eine Grössenordnung. Rechenfall: Homogen-poröses Wirtgestein; hydraulische Durchlässigkeit 10^{-9} m/s, vertikaler Gradient 0.1 m/m, Transportpfadlänge 50 m. Inventar: Siehe Fussnote 40.

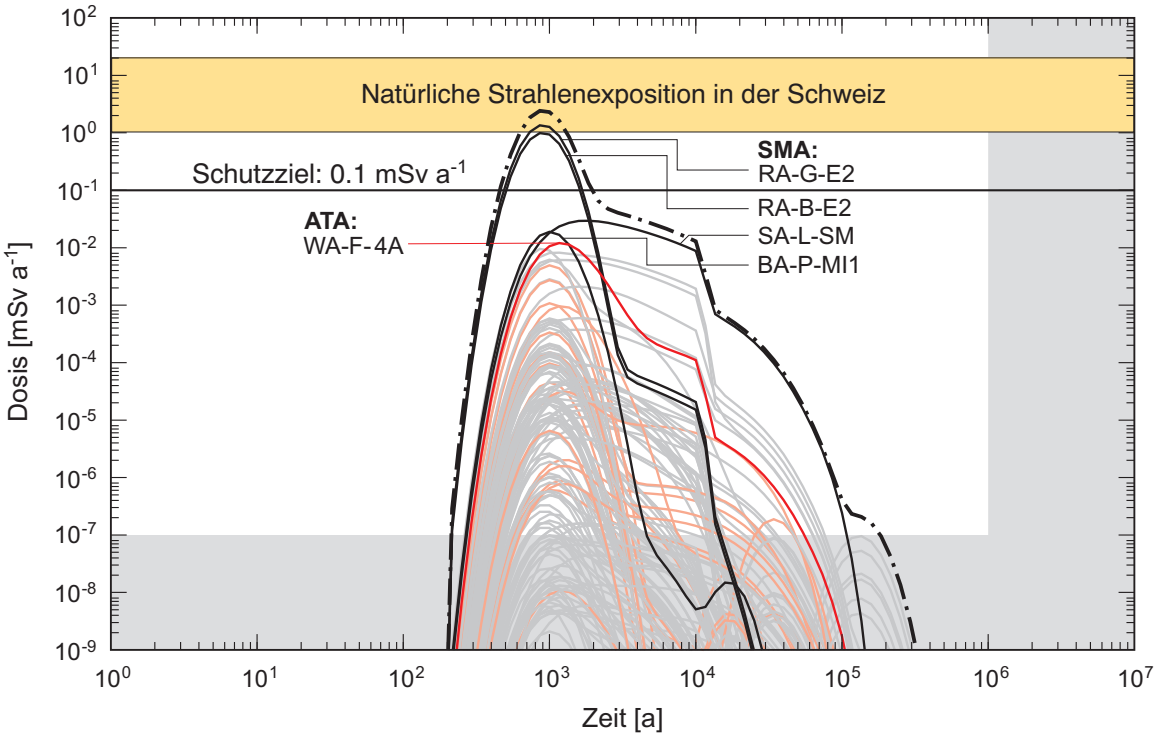


Fig. 3.2-5b: Berechnete Dosen für alle ATA- und SMA-Abfallsorten im SMA-Lager für ein homogen-poröses Wirtgestein ohne Störungszonen.

Die Figur zeigt die individuellen Dosiskurven für alle ATA- und SMA-Abfallsorten für den gleichen Rechenfall wie in Fig. 3.2-5a (homogen-poröses Wirtgestein; hydraulische Durchlässigkeit 10^{-9} m/s, vertikaler Gradient 0.1 m/m, Transportpfadlänge 50 m). Hervorgehoben sind Dosiskurven von Abfallsorten mit einem Maximum ≥ 0.01 mSv/a, wobei die ATA mit roten, die SMA mit schwarzen Linien dargestellt sind. Auch hier ist klar ersichtlich, dass einige wenige Abfallsorten die Dosis dominieren. Inventar: Siehe Fussnote 40.

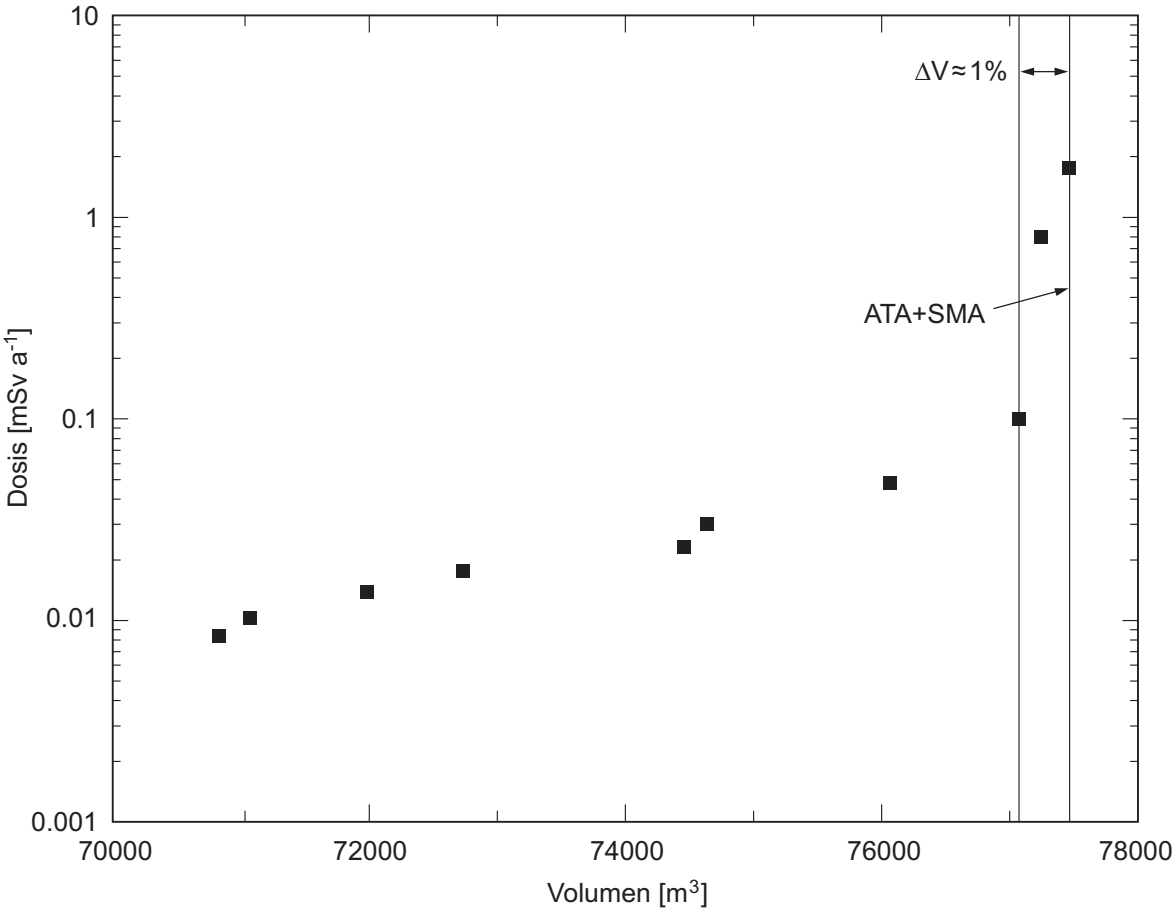


Fig. 3.2-6a: Berechnete Dosis als Funktion des Abfallvolumens im SMA-Lager für ein homogen-poröses Wirtgestein mit Störungszonen.

Die Figur zeigt beispielhaft, dass, ausgehend vom Abfallvolumen ATA + SMA gemäss Definition KEV, bei einer schrittweisen Wegnahme von Abfallsorten nach abnehmendem Dosisbeitrag die berechnete Dosis deutlich reduziert wird. Eine gezielte Reduktion des Abfallvolumens um etwas weniger als 1 % bewirkt für diesen Rechenfall eine Reduktion der berechneten Dosis um mehr als eine Grössenordnung. Rechenfall: Homogen-poröses Wirtgestein mit zwei Störungszonen senkrecht zur Kavernenachse im Abstand von 100 m; hydraulische Durchlässigkeit des Wirtgesteins 10^{-10} m/s, Transmissivität der Störungszonen 10^{-8} m^2/s, vertikaler Gradient 0.1 m/m, Transportpfadlänge 50 m. Inventar: Siehe Fussnote 40.

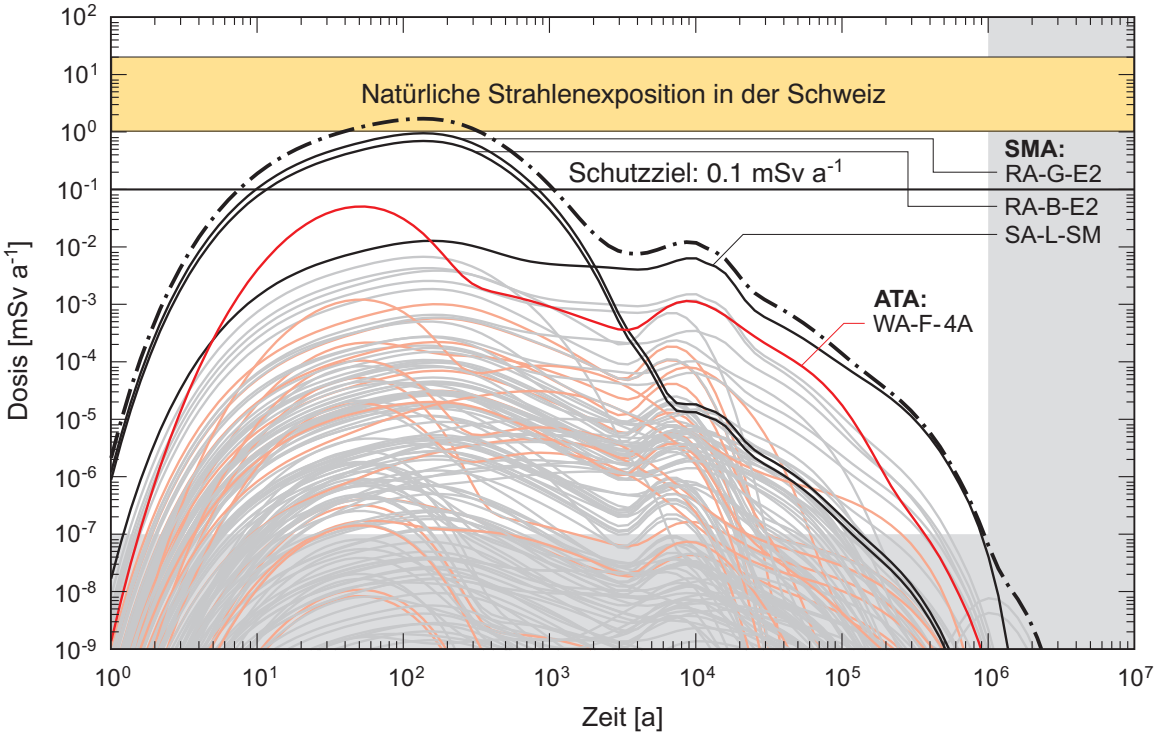


Fig. 3.2-6b: Berechnete Dosen für alle ATA- und SMA-Abfallsorten im SMA-Lager für ein homogen-poröses Wirtgestein mit Störungszonen.

Die Figur zeigt die individuellen Dosiskurven für alle ATA- und SMA-Abfallsorten für den gleichen Rechenfall wie in Fig. 3.2-6a (homogen-poröses Wirtgestein mit zwei Störungszonen senkrecht zur Kavernenachse im Abstand von 100 m; hydraulische Durchlässigkeit des Wirtgesteins 10^{-10} m/s, Transmissivität der Störungszonen 10^{-8} m^2/s, vertikaler Gradient 0.1 m/m, Transportpfadlänge 50 m). Hervorgehoben sind Dosiskurven von Abfallsorten mit einem Maximum ≥ 0.01 mSv/a, wobei die ATA mit roten, die SMA mit schwarzen Linien dargestellt sind. Auch hier ist klar ersichtlich, dass einige wenige Abfallsorten die Dosis dominieren. Inventar: Siehe Fussnote 40.

3.2.5 Berücksichtigung der Vorgaben aus Schritt 1 im SGT

Gemäss der Vorgaben aus dem Sachplan geologische Tiefenlager zum Schritt 1 ist eine Anzahl von Abfalleigenschaften für die Abfallzuteilung massgebend (s. Kap. 2.2.3). Die Berücksichtigung dieser Abfalleigenschaften wird im Folgenden diskutiert.

Inventar und Halbwertszeiten der Radionuklide

Das Nuklidinventar und die Halbwertszeiten der Radionuklide fliessen ein in die Berechnung des Aktivitäts- und Radiotoxizitätsverlaufs sowie der Wärmeentwicklung. Das Nuklidinventar (inkl. Radiotoxizität) und die Halbwertszeiten sind zudem wichtige Grunddaten für die zum Zweck der Abfallzuteilung durchgeführten sicherheitstechnischen Rechnungen, wobei auch die Eigenschaften der technischen und geologischen Barrieren eine zentrale Rolle spielen.

Auswahl der sicherheitstechnisch relevanten Nuklide (Wertung der radiologischen Toxizität)

Für sicherheitstechnische Berechnungen wird im vorliegenden Bericht nur derjenige Teil der Nuklide berücksichtigt, der jeweils für den betrachteten Zweck relevant ist[46].

Abfallvolumen

Das Abfallvolumen, das dem SMA- bzw. HAA-Lager zugeteilt wird, hat einen direkten Einfluss auf die Lagerauslegung (Platzbedarf). Das Volumen der ATA/SMA, welches dem HAA-Lager (LMA-Teil) zugeteilt wird, soll nicht übermässig gross sein und dasjenige, welches dem SMA-Lager zugeteilt werden, soll genügend gross sein, damit der Bau eines SMA-Lagers gerechtfertigt ist (s. Kap. 3.2.4).

Materialeigenschaften (Abfallmatrix, -behälter) und ihre möglichen Auswirkungen auf das Wirtgestein

Die Materialeigenschaften der Abfälle und ihre möglichen Auswirkungen auf das Wirtgestein werden berücksichtigt, indem Abfälle ohne Zementanteil (abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive Abfälle) räumlich getrennt eingelagert werden von zementhaltigen Abfällen (ATA, SMA). Die Materialeigenschaften (Abfallmatrix, -behälter) müssen kompatibel sein mit den übrigen technischen Barrieren und mit dem Wirtgestein. Die Materialeigenschaften sind kein Diskriminator bzgl. der Aufteilung der ATA/SMA auf das LMA- resp. das SMA-Lager. In beiden Tiefenlagern dominiert die grosse Masse an Zement (Abfallmatrix, Verfüllung im Endlagerbehälter, Endlagerbehälter, Verfüllung der Zwischenräume zwischen den Endlagerbehältern, Verfüllung der Zwischenräume zwischen den Endlagerbehältern und der Kavernenverkleidung).

Wärmeentwicklung

Die Abfälle mit einer hohen Wärmeleistung (HAA; d.h. abgebrannte Brennelemente und verglaste hochaktive Abfälle) werden räumlich getrennt eingelagert von den Abfällen mit einer niedrigen Wärmeleistung (ATA, SMA). Für die HAA-Lagerauslegung ist die Wärmeentwicklung eine wichtige Einflussgrösse. Die Wärmeentwicklung in einem geologischen Tiefenlager darf nicht zu Temperaturen führen, welche die sicherheitsrelevanten Eigenschaften der technischen bzw. geologischen Barrieren signifikant beeinträchtigen. Im Projekt Entsorgungsnachweis wurde die Wärmeentwicklung für HAA und LMA berechnet (Johnson et al. 2002) und deren Einfluss auf die sicherheitsrelevanten Eigenschaften der technischen und geologischen Barrieren bewertet und analysiert[47] (Nagra 2002c). Dabei wurde für die BE eine Wärmeleistung zum Zeitpunkt der Einlagerung von 1500 W/Behälter, für die verglasten HAA eine solche von rund 700 W/Behälter[48] und für die LMA eine solche von rund 30 W/m Tunnel angenommen (Johnson et al. 2002). Die Abfälle im SMA-Lager weisen gegenüber denjenigen im LMA-Lager eine geringere spezifische Wärmeleistung auf (Fig. 3.2-3b); entsprechend geringer fallen die thermischen Auswirkungen auf die technischen und geologischen Barrieren aus.

---

[46] Die Auswahl der für die Abfallzuteilung relevanten Nuklide erfolgt in zwei Schritten: (i) Definition der sicherheitsrelevanten Nuklide für die sicherheitstechnischen Rechnungen im vorliegenden Bericht (s. Anhang 3); (ii) Auswahl der dosisbestimmenden Einzelnuklide für die DDAS-Methodik (s. Anhang 4).

[47] Auch wenn nicht ausgeschlossen werden konnte, dass bei den BE und HAA der innerste Teil der Bentonit-Barriere beeinträchtigt werden könnte, wurde gezeigt, dass dies keine signifikanten Auswirkungen auf das Verhalten des Gesamtsystems hat.

[48] Im Projekt Entsorgungsnachweis wurde von einer Kokille pro Endlagerbehälter ausgegangen; im vorliegenden Projekt von zwei Kokillen pro Endlagerbehälter.

Gehalt an potenziell Gas bildenden Bestandteilen (Metalle, Organika)

Um die Auswirkungen der Gasbildung in geologischen Tiefenlagern zu minimieren, gibt es ein breites Spektrum von (möglichen) Massnahmen:

HAA – Es existieren verschiedene Optionen bzgl. der Wahl des Behältermaterials (z.Z. in Evaluation).

LMA/SMA – Mögliche Massnahmen umfassen (i) Vorgaben an die Abfallproduzenten (Bsp.: PSI-Abfälle mit einem hohen Anteil an Aluminium: Minimierung des Oberflächen-zu-Volumen-Verhältnisses durch Einschmelzen und Umgiessen); (ii) Platzierung der Abfälle (Bsp.: Abfälle mit einem hohen Anteil an Aluminium: Platzierung möglichst nahe am Boden der Lagertunnels, damit bei der Wiederaufsättigung die Gasentwicklung möglichst früh stattfindet, wenn die Tunnels noch weitgehend ungesättigt sind und dementsprechend viel Porenraum für die Aufnahme des Gases zur Verfügung steht); (iii) ingenieurtechnische Massnahmen: Verwendung von Lagertunnel-Versiegelungen, welche eine Freisetzung von Gas bei Übersteigen eines kritischen Druckes ermöglichen.

Für jedes geologische Tiefenlager muss aufgezeigt werden, dass der Gasdruckaufbau die Langzeitsicherheit nicht beeinträchtigt. Im Projekt Entsorgungsnachweis wurde der Gasdruckaufbau und -transport im Umfeld eines geologischen Tiefenlagers HAA und LMA analysiert und bewertet (Nagra 2002c, Nagra 2004a). Für die SMA in einem dichten Wirtgestein wurde am Beispiel Opalinuston eine analoge Analyse durchgeführt mit entsprechenden Schlussfolgerungen (Nagra 2008h). Wenn der Gasdruckaufbau und -transport in einem geologischen Tiefenlager SMA in einem dichten Wirtgestein wie Opalinuston keine inakzeptablen Auswirkungen auf die Langzeitsicherheit hat, gilt dies umso mehr in einem weniger dichten, gasdurchlässigeren Wirtgestein (z.B. Mergel, s. Nagra 1997).

Gehalt an Komplexbildnern

Diejenigen Abfallsorten, welche Komplexbildner enthalten oder deren Stoffe bei Degradation zu Komplexbildnern führen könnten (d.h. Abfallsorten, die entweder zu den ATA oder den SMA gehören), werden diesbezüglich analysiert und entsprechend dem potenziellen Gehalt an Komplexbildnern in zwei Gruppen eingeteilt. Sowohl im geologischen Tiefenlager SMA als auch HAA (LMA-Teil) ist vorgesehen, die zwei Gruppen in räumlich getrennten Tunnels resp. Kavernen einzulagern. Dieses Konzept entspricht einer Weiterführung der bisherigen Praxis (Nagra 1994b, 2002c). Für die sicherheitstechnischen Rechnungen werden den zwei Abfallgruppen unterschiedliche Sorptionsdatenbanken zugeordnet, die den (potenziellen) Gehalt an Komplexbildnern berücksichtigen.

3.3 Vorschlag zur Abfallzuteilung zu den geologischen Tiefenlagern SMA und HAA

In Kap. 3.2.3 wurde aufgezeigt, dass ein Entsorgungskonzept mit einem HAA-Lager mit räumlich abgetrenntem LMA-Teil und einem SMA-Lager sinnvoll ist. Es wurde argumentiert, dass die ATA/SMA aufgrund von generischen Dosisberechnungen auf das LMA- bzw. SMA-Lager aufgeteilt werden sollen, mit dem Ziel, durch Zuteilung eines volumenmässig geringen, aber dosisdominierenden Anteils der ATA/SMA zum HAA-Lager (LMA-Teil) die sicherheitstechnischen Anforderungen an die Geologie für das SMA-Lager im Vergleich mit einer hypothetischen Zuteilung des Gesamtinventars ATA/SMA zum SMA-Lager bei gleichbleibender Sicherheit zu reduzieren und damit das Spektrum der möglichen geologischen Standortgebieten zu erweitern.

In Kap. 3.2.4 wurde schematisch beschrieben, wie die dosisdominierenden Abfallsorten identifiziert werden können und wie die Aufteilung der ATA/SMA auf die beiden Lager vorgenommen werden kann; im vorliegenden Kapitel wird aufgezeigt, wie die einzelnen Schritte umgesetzt wurden und wie die entsprechenden Resultate lauten.

3.3.1 Definition von Rechenfällen und Durchführung der Rechnungen

Ausgehend von der Beschreibung von möglichen generischen Wirtgesteinstypen bzw. geologischen Situationen und deren Modellierung (s. Kap. 2.5) und unter Berücksichtigung des Lagerkonzepts und der technischen Barrieren für ein SMA-Lager werden die folgenden Rechenfall-Familien R1 bis R5 bzw. Parametervariationen definiert:

R1: Homogen-poröses Wirtgestein ohne Störungszonen[49]

- Verwendete Rechencodes: Nahfeld: VPAC (homogen-poröses Medium ohne Störungszonen); Geosphäre: PICNIC (homogen-poröses Medium);
  Biosphäre: TAME[50]/Referenzfall-BTKs
- Konzeptualisierung: Radionuklid-Freisetzung aus einer Fläche im Abstand von 1 m von den Kavernenwänden (VPAC) bildet Quellterm für PICNIC
- Inventar: Summe aller ATA und SMA (50 Jahre Betrieb der bestehenden KKW)
- Hydraulischer Gradient i: 0.1 m/m (vertikal)
- Hydraulische Durchlässigkeit K: 10^{-13} bis 10^{-7} m/s
- Geosphären-Transportpfadlänge L: 50 m
- Geosphären-Sorptionsdatensatz: (i) "Tonstein": Tonstein-Datensatz (eher günstig);
  (ii) "Calcit": Calcit-Datensatz (pessimistisch); s. Tab. A3.3-2

Die Resultate der Rechenfall-Familie R1 sind in der Fig. 3.3-1a/b dargestellt. Der oberste Datenpunkt entspricht jeweils dem berechneten Dosismaximum für den Fall, dass alle Abfallsorten der Kategorien ATA und SMA im SMA-Lager entsorgt werden; für die Berechnung des zweitobersten Datenpunkts wurde diejenige Abfallsorte aus dem SMA-Lager entfernt, die den höchsten Dosisbeitrag liefert etc. Fig. 3.3-1a zeigt die Resultate ausgewertet mit dem Geosphären-Sorptionsdatensatz "Tonstein" und dargestellt als Funktion des Prozentsatzes des eingelagerten Volumens der ATA und SMA. Fig. 3.3-1b zeigt die Resultate ausgewertet mit den Geosphären-Sorptionsdatensätzen "Tonstein" und "Calcit".

Fig. 3.3-1a/b zeigt, dass für ein homogen-poröses Wirtgestein bei einer Durchlässigkeit von 10^{-10} m/s das Schutzziel von 0.1 mSv/a deutlich unterschritten wird, auch wenn keine Abfallsorte aus dem SMA-Lager entfernt wird, und dass dies bei einer Durchlässigkeit von 10^{-9} m/s nicht mehr der Fall ist. In diesem Durchlässigkeitsbereich findet demnach ein Übergang bei der Barrierenwirkung des Wirtgesteins statt, welcher eine Zuteilung von gewissen SMA-Abfallsorten zum HAA-Lager (LMA-Teil) notwendig macht. Dies sieht man auch klar in Fig. 3.3-2. Hier ist das Abfallvolumen, welches zur Unterschreitung einer bestimmten Dosislimite entfernt werden muss, als Funktion der hydraulischen Durchlässigkeit dargestellt. Dieser Befund entspricht auch der Erfahrung aus dem Projekt SMA / Wellenberg (s. Kap. 2.4). Aus diesem

---

[49] Vgl. Fig. 2.5-3a.

[50] Mit TAME wurden die Referenzfall-BTKs berechnet (Tab. A3.4-1), welche in den Rechenfällen R1 bis R4 verwendet wurden.

Grund werden die Fälle mit einer grossräumigen hydraulischen Durchlässigkeit des Wirtgesteins von 10^{-10} m/s und 10^{-9} m/s im folgenden eingehender analysiert. Fig. 3.3-1b zeigt ausserdem, dass sich das Gesamtbild qualitativ nicht wesentlich ändert, wenn statt dem eher günstigen Geosphären-Sorptionsdatensatz "Tonstein" der eher pessimistische Datensatz "Calcit" verwendet wird[51]. Deshalb werden die nachfolgend beschriebenen Rechnungen zwar jeweils mit beiden Datensätzen ausgewertet, aber nur die Resultate für den Datensatz "Tonstein" gezeigt.

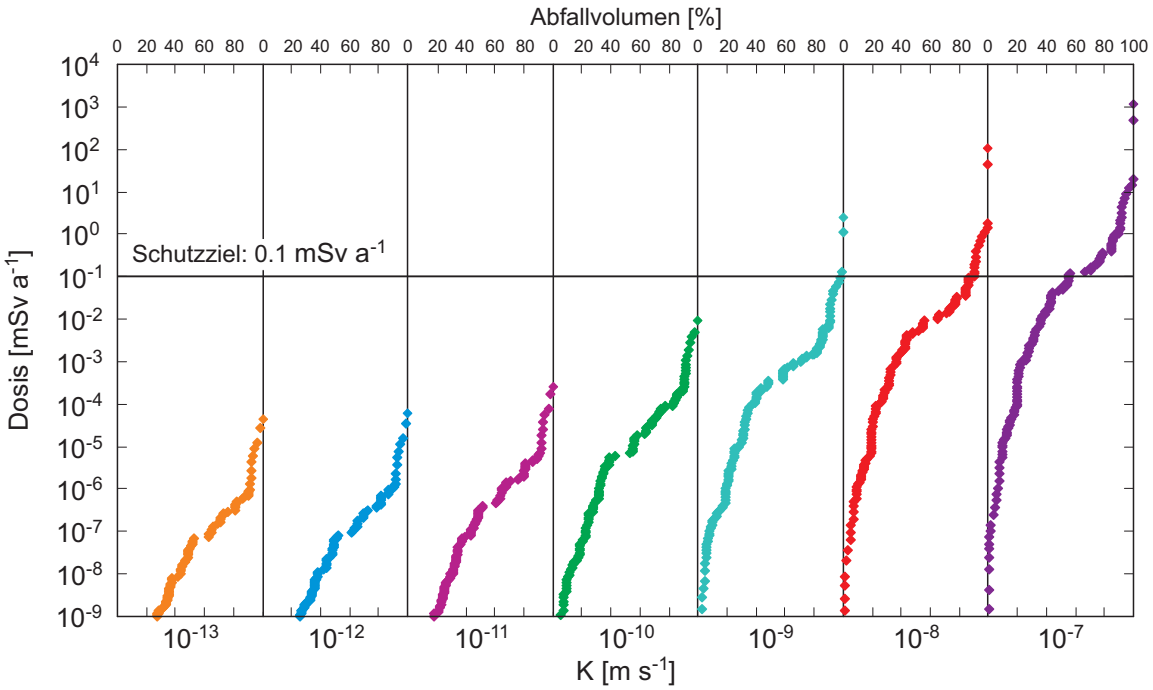


Fig. 3.3-1a: Resultate der Rechenfall-Familie R1: Homogen-poröses Wirtgestein ohne Störungszonen, ausgewertet mit dem Geosphären-Sorptionsdatensatz "Tonstein".

Für jede betrachtete hydraulische Durchlässigkeit K des Wirtgesteins (untere Skala) entspricht der oberste Datenpunkt dem berechneten Dosismaximum für den Fall, dass alle Abfallsorten der Kategorien ATA + SMA (gemäss KEV) im SMA-Lager entsorgt werden; dies entspricht einem Volumenanteil von 100 % (obere Skala). Für die Berechnung des zweitobersten Datenpunkts wurde diejenige Abfallsorte aus dem SMA-Lager entfernt, die den höchsten Dosisbeitrag liefert. Entsprechend ist auf der oberen Skala ersichtlich, welcher Volumenanteil für diesen Fall im Lager verbleibt, und auf der Dosisskala (links), wie sich die Dosis dadurch erniedrigt. Für die Durchlässigkeit von 10^{-9} m/s zeigt die Darstellung z.B., dass durch Entfernen der beiden Abfallsorten mit den höchsten Dosisbeiträgen das Dosismaximum um mehr als eine Grössenordnung reduziert wird, ohne dass der Volumenanteil der verbleibenden Abfälle merkbar reduziert wird. Inventar: Siehe Fussnote 40.

[51] Der Grund für dieses Verhalten liegt in der Dominanz der nicht- bzw. schlechtsorbierenden Radionuklide.

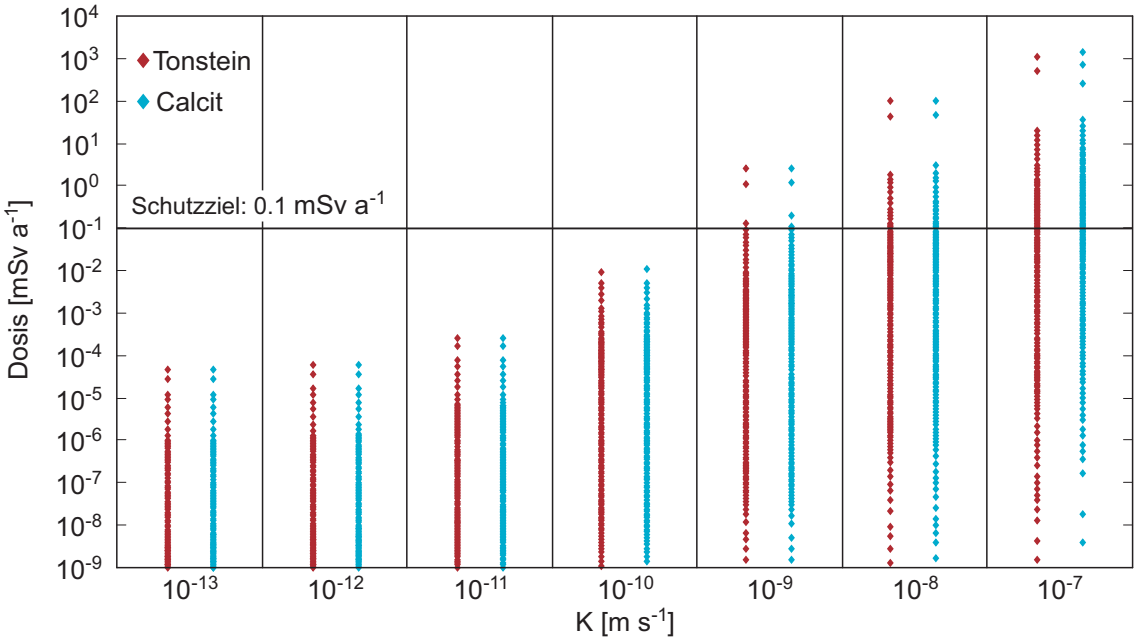


Fig. 3.3-1b: Resultate der Rechenfall-Familie R1: Homogen-poröses Wirtgestein ohne Störungszonen, ausgewertet mit den Geosphären-Sorptionsdatensätzen "Tonstein" und "Calcit".

Inventar: Siehe Fussnote 40.

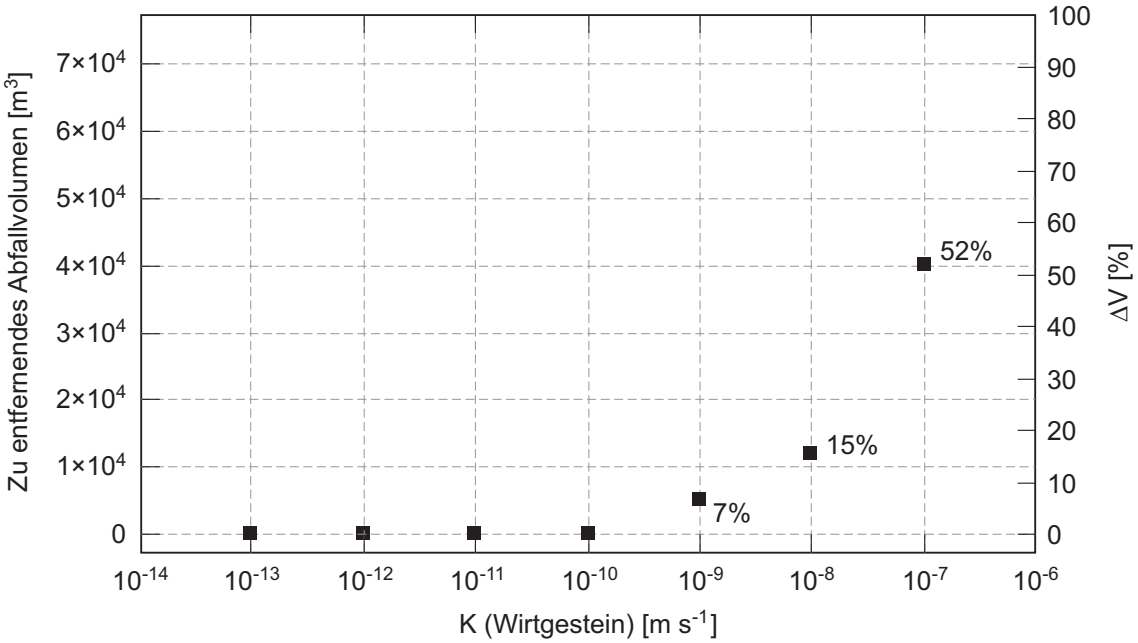


Fig. 3.3-2: Aus dem SMA-Lager zu entfernendes Abfallvolumen als Funktion der hydraulischen Durchlässigkeit eines homogen-porösen Wirtgesteins, damit die gewählte Dosislimite gerade noch unterschritten wird.

Rechenfall-Familie R1 (homogen-poröses Wirtgestein ohne Störungszonen), Geosphären-Sorptionsdatensatz: Tonstein. Inventar: Siehe Fussnote 40.

Die hier gewählte Dosislimite liegt bei 0.05 mSv/a und somit einen Faktor zwei unter dem Schutzziel von 0.1 mSv/a.

R2: Geklüftetes Wirtgestein ohne Störungszonen[52]

- Verwendete Codes: Nahfeld: VPAC (homogen-poröses Medium ohne Störungszonen); Geosphäre: PICNIC (geklüftetes Medium mit Matrixdiffusion); Biosphäre: TAME/Referenzfall-BTKs
- Konzeptualisierung:
  - Klüfte als planare Elemente senkrecht zu den Kavernenachsen mit Transmissivitäten und Kluftabständen konsistent mit den angenommenen Werten für die grossräumige hydraulische Durchlässigkeit
  - Radionuklid-Freisetzung aus einer Fläche im Abstand von 1 m von den Kavernenwänden (VPAC) bildet Quellterm für PICNIC
- Inventar: Summe aller ATA und SMA (50 Jahre Betrieb der bestehenden KKW)
- Hydraulischer Gradient i: 0.1 m/m (vertikal)
- Grossräumige hydraulische Durchlässigkeit K: 10^{-10} und 10^{-9} m/s
- Transmissivität der Klüfte T_K: 10^{-9} und 10^{-8} m^2/s (für K = 10^{-10} m/s) resp. 10^{-8} und 10^{-7} m^2/s (für K = 10^{-9} m/s)
- Geosphären-Transportpfadlänge L: 50 m
- Geosphären-Sorptionsdatensatz: (i) "Tonstein": Tonstein-Datensatz (eher günstig); (ii) "Calcit": Calcit-Datensatz (pessimistisch); s. Tab. A3.3-2

R3: Homogen-poröses Wirtgestein mit zwei vertikalen Störungszonen (ohne Channeling)[53]

- Verwendete Codes: Nahfeld: VPAC (homogen-poröses Medium mit zwei diskreten vertikalen Störungszonen); Geosphäre: PICNIC (je ein Transportpfad für homogen-poröses Medium und für geklüftetes Medium mit Matrixdiffusion); Biosphäre: TAME/Referenzfall-BTKs
- Konzeptualisierung:
  - Störungszonen als zwei diskrete planare Elemente senkrecht zu den Kavernenachsen mit einem Abstand von 100 m
  - Radionuklid-Freisetzung aus einer Fläche im Abstand von 1 m von den Kavernenwänden (VPAC/Anteile ohne bzw. mit Störungszonen) bilden Quellterme für PICNIC-Transportpfade für homogen-poröses bzw. geklüftetes Medium
- Inventar: Summe aller ATA und SMA (50 Jahre Betrieb der bestehenden KKW)
- Hydraulischer Gradient i: 0.1 m/m (vertikal)
- Grossräumige hydraulische Durchlässigkeit K: 10^{-10} und 10^{-9} m/s
- Transmissivität der Störungszonen $T_{St.Z.}$: 10^{-8} und 10^{-7} m^2/s
- Geosphären-Transportpfadlänge L: 50 m

---

52 Vgl. Fig. 2.5-3b.

53 Vgl. Fig. 2.5-4 (hintere Störungszone).

- Geosphären-Sorptionsdatensatz: (i) "Tonstein": Tonstein-Datensatz für Matrix, Calcit-Datensatz im Bereich der Störungszone (eher günstig); (ii) "Calcit": Calcit-Datensatz sowohl für Matrix als auch im Bereich der Störungszone (pessimistisch); s. Tab. A3.3-2

R4: Homogen-poröses Wirtgestein mit zwei vertikalen Störungszonen (mit Channeling)[54]

- Verwendete Codes: Nahfeld: VPAC (homogen-poröses Medium mit zwei diskreten vertikalen Störungszonen); Geosphäre: PICNIC (je ein Transportpfad für homogen-poröses Medium und für geklüftetes Medium mit Matrixdiffusion); Biosphäre: TAME/Referenzfall-BTKs
- Konzeptualisierung:
  - Störungszonen als zwei diskrete planare Elemente senkrecht zu den Kavernenachsen mit einem Abstand von 100 m
  - Radionuklid-Freisetzung aus einer Fläche im Abstand von 1 m von den Kavernenwänden (VPAC/Anteile ohne bzw. mit Störungszonen) bilden Quellterme für PICNIC-Transportpfade für homogen-poröses bzw. geklüftetes Medium
  - Channeling konzeptualisiert dadurch, dass im PICNIC-Transportpfad für geklüftetes Medium die Transmissivität um einen Faktor 10 erhöht wurde im Vergleich mit der Kluft-Transmissivität im Nahfeld
- Inventar: Summe aller ATA und SMA (50 Jahre Betrieb der bestehenden KKW)
- Hydraulischer Gradient i: 0.1 m/m (vertikal)
- Grossräumige hydraulische Durchlässigkeit K: 10^{-10} und 10^{-9} m/s
- Transmissivität der Störungszonen $T_{St.Z.}$: 10^{-8} und 10^{-7} m^2/s
- Transmissivität der Fliesspfade innerhalb der Störungszonen ("Channeling")
  $T_{Ch.}$: $10 \times T_{St.Z.}$
- Geosphären-Transportpfadlänge L: 50 m
- Geosphären-Sorptionsdatensatz: (i) "Tonstein": Tonstein-Datensatz für Matrix, Calcit-Datensatz im Bereich der Störungszone (eher günstig); (ii) "Calcit": Calcit-Datensatz sowohl für Matrix als auch im Bereich der Störungszone (pessimistisch); s. Tab. A3.3-2

R5: Erosive Freilegung des Lagers nach langen Zeiten

- Verwendete Codes: Numerische Umsetzung des Modells 1 (Kap. 2.5.6)
- Konzeptualisierung:
  - Dauer, bis das Lager in den Einflussbereich der Erdoberfläche gelangt: 10^5 Jahre
  - Ab diesem Zeitpunkt wird das gesamte Inventar über einen Zeitraum von 1000 Jahren gleichmässig in einen Aquifer mit einem Wasserfluss von 10^6 m^3/a freigesetzt[55].

---

[54] Vgl. Fig. 2.5-4 (vordere Störungszone). Im Projekt Kristallin-I (Nagra 1994a) wurden 6 verschiedene Geometrien für Freisetzungspfade untersucht, mit dem Resultat, dass weit auseinander liegende, dünne "Röhren" am ungünstigsten waren bzgl. Radionuklidfreisetzung ("Geometrie Nr. 6"). Deshalb werden hier näherungsweise vergleichbare Fälle ebenfalls berücksichtigt.

[55] Dies entspricht dem Wasserfluss in einem typischen Aquifer der Nordschweiz (vgl. Nagra 2002c).

- Die Bewohner der Region decken ihren gesamten Trinkwasserbedarf (2 Liter/Tag und Person) aus diesem Aquifer

- Inventar: Summe aller ATA und SMA (50 Jahre Betrieb der bestehenden KKW)

Die Resultate der Rechenfall-Familien R1 – R5 sind für $K = 10^{-10}$ m/s in Fig. 3.3-3 und für $K = 10^{-9}$ m/s in Fig. 3.3-4 dargestellt. Die Resultate des Rechenfalls R5 (erosive Freilegung des Lagers nach langen Zeiten) sind in beiden Figuren identisch, da diese vereinfachte Betrachtung unabhängig ist von den Eigenschaften des Wirtgesteins. Alle Resultate sind in Anhang 4 auch in tabellarischer Form zusammengestellt.

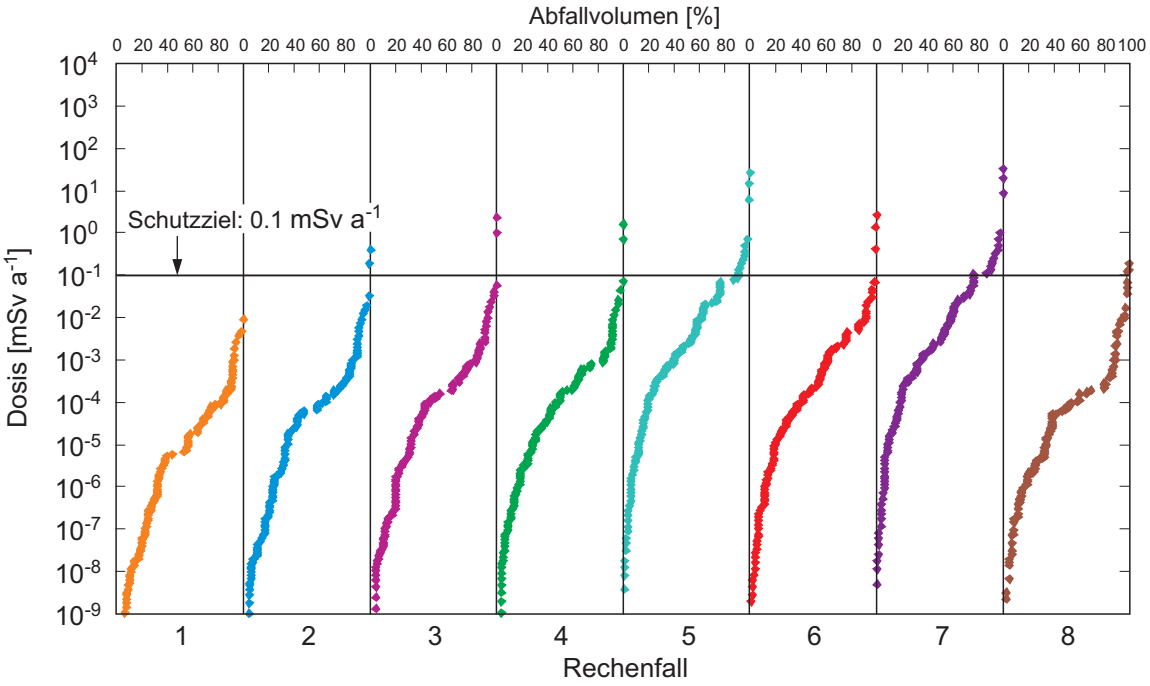


Fig. 3.3-3: Resultate der Rechenfall-Familien R1 – R5 für eine grossräumige hydraulische Durchlässigkeit von 10^{-10} m/s (Durchlässigkeit ohne Störungszonen, aber mit Klüften).

1: R1 (homogen-poröses Wirtgestein ohne Störungszonen)

2: R2 (geklüftetes Wirtgestein ohne Störungszonen, $T_K = 10^{-9}$ m^2/s)

3: R2 (geklüftetes Wirtgestein ohne Störungszonen, $T_K = 10^{-8}$ m^2/s)

4: R3 (homogen-poröses Wirtgestein mit zwei vertikalen Störungszonen ohne Channeling, $T_{St.Z.} = 10^{-8}$ m^2/s)

5: R3 (homogen-poröses Wirtgestein mit zwei vertikalen Störungszonen ohne Channeling, $T_{St.Z.} = 10^{-7}$ m^2/s)

6: R4 (homogen-poröses Wirtgestein mit zwei vertikalen Störungszonen mit Channeling, $T_{St.Z.} = 10^{-8}$ m^2/s, $T_{Ch.} = 10^{-7}$ m^2/s)

7: R4 (homogen-poröses Wirtgestein mit zwei vertikalen Störungszonen mit Channeling, $T_{St.Z.} = 10^{-7}$ m^2/s, $T_{Ch.} = 10^{-6}$ m^2/s)

8: R5 (erosive Freilegung des Lagers nach langen Zeiten; Einschlusszeit = 10^5 a)

Inventar: Siehe Fussnote 40.

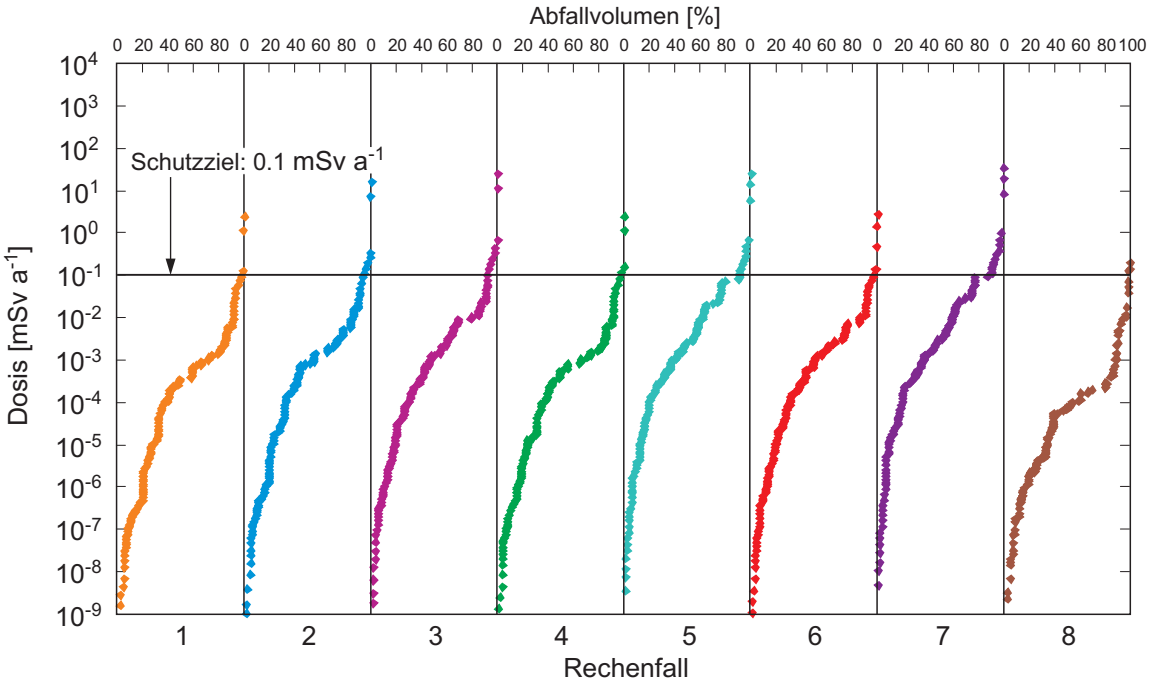


Fig. 3.3-4: Resultate der Rechenfall-Familien R1 – R5 für eine grossräumige hydraulische Durchlässigkeit von 10^{-9} m/s (Durchlässigkeit ohne Störungszonen, aber mit Klüften).

1: R1 (homogen-poröses Wirtgestein ohne Störungszonen)

2: R2 (geklüftetes Wirtgestein ohne Störungszonen, $T_K = 10^{-8}$ m^2/s)

3: R2 (geklüftetes Wirtgestein ohne Störungszonen, $T_K = 10^{-7}$ m^2/s)

4: R3 (homogen-poröses Wirtgestein mit zwei vertikalen Störungszonen ohne Channeling, $T_{St.Z.} = 10^{-8}$ m^2/s)

5: R3 (homogen-poröses Wirtgestein mit zwei vertikalen Störungszonen ohne Channeling, $T_{St.Z.} = 10^{-7}$ m^2/s)

6: R4 (homogen-poröses Wirtgestein mit zwei vertikalen Störungszonen mit Channeling, $T_{St.Z.} = 10^{-8}$ m^2/s, $T_{Ch.} = 10^{-7}$ m^2/s)

7: R4 (homogen-poröses Wirtgestein mit zwei vertikalen Störungszonen mit Channeling, $T_{St.Z.} = 10^{-7}$ m^2/s, $T_{Ch.} = 10^{-6}$ m^2/s)

8: R5 (erosive Freilegung des Lagers nach langen Zeiten; Einschlusszeit = 10^5 a)

Inventar: Siehe Fussnote 40.

3.3.2 Auswertung der Resultate und Festlegung der Abfallzuteilung

Wie in Kap. 3.2 beschrieben, werden die Resultate ausgewertet mit Vorgaben bzgl. der maximal zulässigen Dosis. Als "Abschneidekriterium" für die Rechenfall-Familien R1 – R4 im Betrachtungszeitraum (Phase mit klar definierter Barrierenwirkung der technischen und geologischen Barrieren) wird eine Dosislimite von 0.05 mSv/a gewählt; d.h. eine Dosislimite, die einen Faktor 2 unter dem Schutzziel von 0.1 mSv/a liegt. Für den Rechenfall R5 (erosive Freilegung des Lagers nach langen Zeiten) wird direkt das Schutzziel als Abschneidekriterium verwendet, da für diese Zeiträume die inhärent vorhandenen Ungewissheiten im Vergleich zu denjenigen für die früheren Zeiten (Rechenfälle R1 – R4) gross sind und die verwendete Rechenvorschrift stark

vereinfacht ist (z.B. Dosisberechnung mit Trinkwasserbezug aus regionalem Aquifer). Dies ist auch kompatibel mit der neuen Richtlinie G03 (HSK 2008a), in der zur Behandlung solcher Szenarien in der Sicherheitsanalyse festgehalten wird, dass die *"von einem geologischen Tiefenlager ausgehenden möglichen regionalen radiologischen Auswirkungen unter Berücksichtigung der inhärent vorhandenen Ungewissheiten zu ermitteln und mit natürlichen radiologischen Umweltrisiken zu vergleichen"* seien.

Fig. 3.3-3 und 3.3-4 zeigen, dass bei Anwendung der Abschneidekriterien für die beiden betrachteten grossräumigen hydraulischen Durchlässigkeiten von 10^{-10} m/s und 10^{-9} m/s unterschiedliche Varianten der Abfallzuteilungen resultieren werden[56]. Die Ableitung dieser Varianten wird im Folgenden diskutiert.

3.3.2.1 Grossräumige hydraulische Durchlässigkeit K = 10^{-10} m/s

Zunächst werden die Resultate, wie sie in Fig. 3.3-3 dargestellt sind, ausgewertet. Unter Berücksichtigung der Vorgabe aus Kap. 3.2.3, dass bei der Abfallzuteilung auch die Abfallmengen und die sicherheitstechnischen Anforderungen an die Geologie berücksichtigt werden sollen, werden die folgenden Rechenfälle analysiert:

- **R1** (homogen-poröses Wirtgestein ohne Störungszonen, K = 10^{-10} m/s)
- **R2** (geklüftetes Wirtgestein ohne Störungszonen, $T_K = 10^{-8}$ m^2/s, K = 10^{-10} m/s)
- **R3** (homogen-poröses Wirtgestein mit zwei vertikalen Störungszonen ohne Channeling, $T_{St.Z.} = 10^{-8}$ m^2/s)
- **R4** (homogen-poröses Wirtgestein mit zwei vertikalen Störungszonen mit Channeling, $T_{St.Z.} = 10^{-8}$ m^2/s, $T_{Ch.} = 10^{-7}$ m^2/s)
- **R5** (erosive Freilegung des Lagers nach langen Zeiten; Einschlusszeit = 10^5 a)

Werden die oben definierten Abschneidekriterien auf die Resultate dieser Rechenfälle angewendet, so ergibt sich eine Liste von aus dem SMA-Lager zu entfernenden Abfallsorten gemäss Tab. 3.3-1.

[56] Wie erwähnt, sind die Resultate des Rechenfalls R5 (erosive Freilegung des Lagers nach langen Zeiten) in beiden Figuren identisch, da diese vereinfachte Betrachtung unabhängig ist von den Eigenschaften des Wirtgesteins.

Tab. 3.3-1: Aus dem SMA-Lager zu entfernende Abfallsorten ($K = 10^{-10}$ m/s).

Die Kolonne ΔV [%] bezieht sich auf das Gesamtvolumen der ATA und SMA von 77'466 m^3 (ohne BEVA-Abfälle und ohne Reserven für CERN-Abfälle, vgl. Tab. 2.5-1a), wobei das Volumen der ATA 2'276 m^3 und dasjenige der SMA 75'190 m^3 beträgt.

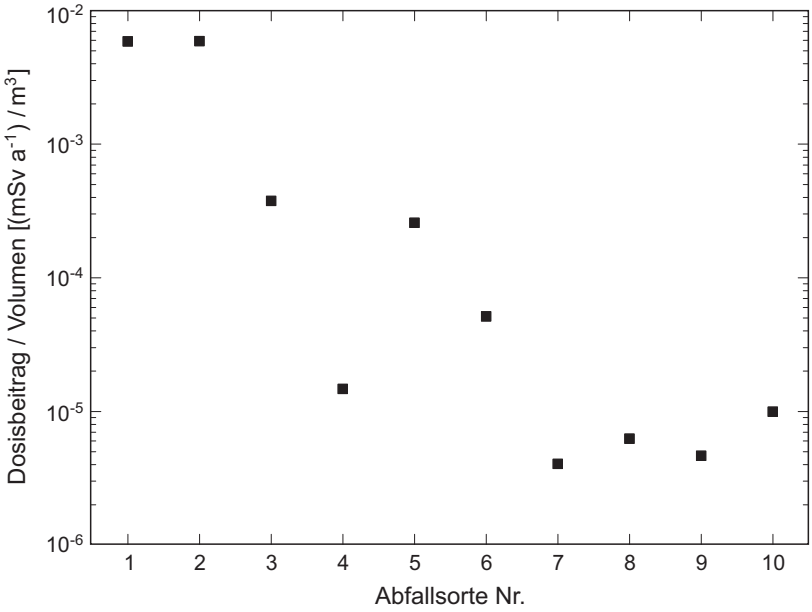
Nr.	**Abfallsorten**	**Beschrieb**	**Kategorie**	**V** [m^3]	**ΔV** [%]
1	WA-F-2	Abfälle AREVA bituminiert	ATA	310	0.40
2	WA-F-4A	Hülsen und Endstücke AREVA	ATA	1008	1.30
3	RA-G-E2	Reaktoreinbauten	SMA	225	0.29
4	RA-B-E2	Reaktoreinbauten	SMA	165	0.21
5	SA-L-SM	Aktivierter Stahl [1)]	SMA	1430	1.85
6	BA-P-HL1	Pu-haltige Forschungsabfälle	ATA	263	0.34
7	BA-P-HL4	Pu-haltige Forschungsabfälle	ATA	36	0.05
8	BA-P-HL9	Pu-haltige Forschungsabfälle	ATA	310	0.40
9	BA-P-O4_ATA	Uran-Metall/Erz	ATA	4	0.01
10	BA-P-O4_SMA	Uran-Metall/Erz	SMA	41	0.05
Total				**3792**	**4.90**

[1)] Diese Abfallsorte ist durch ein ungünstiges Dosisbeitrag-Volumenverhältnis charakterisiert (s. Fig. 3.3-5) und wird deshalb im SMA-Lager belassen (siehe nachfolgende Diskussion).

Diskussion

Werden die Abfallsorten in Tab. 3.3-1 betrachtet, so kann festgestellt werden, dass die Liste plausibel ist. Bei den Abfallsorten WA-F-2 und WA-F-4A handelt es sich um ATA aus der Wiederaufarbeitung von abgebrannten Brennelementen, die schon im Projekt Entsorgungsnachweis dem LMA-Lager zugeteilt wurden. Bei den Sorten RA-G-E2 und RA-B-E2 handelt es sich um stark aktivierte Teile von Reaktor-Steuerstäben und Messlanzen sowie sonstige stark aktivierte Kleinteile. Die Sorte SA-L-SM enthält stark aktivierte Strukturteile aus dem unmittelbaren Kernbereich innerhalb des Reaktordruckbehälters. Die Sorten BA-P-HL1, BA-P-HL4 und BA-P-HL9 sind Forschungsabfälle der Kategorie ATA. Bei der Sorte BA-P-O4 handelt es sich um uranhaltigen Forschungsabfall, der entsprechend den Vorgaben der KEV in einen ATA- und einen SMA-Teil aufgeteilt wurde (Nagra 2007).

Werden die Volumina und die Dosisbeiträge zur Gesamtdosis der einzelnen Abfallsorten betrachtet, so fällt auf, dass die Sorte SA-L-SM ein deutlich schlechteres Dosisbeitrag-Volumen-Verhältnis haben als viele anderen Sorten. Dies ist in Fig. 3.3-5 beispielhaft für einen ausgewählten Rechenfall dargestellt. Die Figur zeigt, dass das Dosisbeitrag-Volumen-Verhältnis für die Sorte SA-L-SM um mehr als eine Grössenordnung schlechter ist als dasjenige der beiden Abfallsorten mit dem nächsthöheren (WA-F-4A) und nächsttieferen (BA-P-HL4) Dosisbeitrag. Der Dosisbeitrag selbst beträgt für die Sorte SA-L-SM lediglich 0.03 mSv/a. Aus diesem Grund und in Übereinstimmung mit dem in Kap. 3.2.3 aufgeführten Prinzip, wonach bei der Abfallzuteilung sowohl die Beiträge der Abfallsorten zur Gesamtdosis als auch die Volumina berücksichtigt werden, wird die Abfallsorte SA-L-SM aus der Tab. 3.3-1 ($K = 10^{-10}$ m/s) gestrichen; die resultierende Liste ist in Tab. 3.3-2 enthalten.



Nr.	Abfallsorte	Dosisbeitrag [mSv a^{-1}]	Volumen [m^3]	Dosisbeitrag / Volumen [(mSv a^{-1}) / m^3]
1	RA-G-E2	1.30E+00	225	5.78E-03
2	RA-B-E2	9.70E-01	165	5.88E-03
3	WA-F-4A	4.10E-01	1008	4.07E-04
4	SA-L-SM	2.60E-02	1430	1.82E-05
5	BA-P-HL4	1.00E-02	36	2.78E-04
6	SA-Z-LU1	9.30E-03	182	5.11E-05
7	SA-B-SM	7.20E-03	1716	4.20E-06
8	BA-P-MI1	4.70E-03	751	6.26E-06
9	SA-G-SM	4.30E-03	910	4.73E-06
10	SA-P-DI2	2.50E-03	248	1.01E-05

Fig. 3.3-5: Dosisbeitrag dividiert durch Volumen für die 10 dosisdominierenden Abfallsorten für den Rechenfall R4.

$K = 10^{-10}$ m/s, i = 0.1 m/m, $T_{St.Z.} = 10^{-8}$ m^2/s, $T_{Ch.} = 10^{-7}$ m^2/s, Sorptionsdatensatz: Calcit.

Tab. 3.3-2: Aus dem SMA-Lager zu entfernende und dem HAA-Lager (LMA-Teil) zuzuteilende Abfallsorten ($K = 10^{-10}$ m/s).

Die Abfallsorte SA-L-SM, welche allein aufgrund der Anwendung der Abschneidekriterien ebenfalls aus dem SMA-Lager zu entfernen wäre, wurde aufgrund des schlechten Dosisbeitrag-Volumenverhältnisses aus der Liste gestrichen (s. Fig. 3.3-5).

Die Kolonne ΔV [%] bezieht sich auf das Gesamtvolumen der ATA und SMA von 77'466 m^3 (ohne BEVA-Abfälle und ohne Reserven für CERN-Abfälle, vgl. Tab. 2.5-1a).

Nr.	**Abfallsorten**	**Beschrieb**	**Kategorie**	**V** [m^3]	**ΔV** [%]
1	WA-F-2	Abfälle AREVA bituminiert	ATA	310	0.40
2	WA-F-4A	Hülsen und Endstücke AREVA	ATA	1008	1.30
3	RA-G-E2	Reaktoreinbauten	SMA	225	0.29
4	RA-B-E2	Reaktoreinbauten	SMA	165	0.21
5	BA-P-HL1	Pu-haltige Forschungsabfälle	ATA	263	0.34
6	BA-P-HL4	Pu-haltige Forschungsabfälle	ATA	36	0.05
7	BA-P-HL9	Pu-haltige Forschungsabfälle	ATA	310	0.40
8	BA-P-O4_ATA	Uran-Metall/Erz	ATA	4	0.01
9	BA-P-O4_SMA	Uran-Metall/Erz	SMA	41	0.05
Total				**2362**	**3.05**

Betrachtet man das Volumen der ATA-Abfallsorten, die im SMA-Lager verbleiben könnten (d.h. alle ATA abzüglich der in Tab. 3.3-2 aufgeführten), so stellt man fest, dass dies im Vergleich zum Volumen im LMA-Lager nur ein kleiner Teil ist (Tab. 3.3-3). In Übereinstimmung mit der bisherigen Praxis werden deshalb für SGT-Etappe 1 auch diese restlichen ATA dem LMA-Lager zugeteilt. Dies ergibt die definitive Abfallzuteilung für $K = 10^{-10}$ m/s: Alle ATA-Abfallsorten sowie die drei in Tab. 3.3-2 bezeichneten SMA-Abfallsorten werden dem LMA-Lager zugeteilt.

Tab. 3.3-3: ATA-Abfallsorten, die gemäss Auswertung der Resultate der Rechenfall-Familien R1 – R5 im SMA-Lager verbleiben könnten ($K = 10^{-10}$ m/s).

Nr.	**Abfallsorten**	**Beschrieb**	**V** [m^3]
1	BA-G-F1	Filtermaterial in Zement	35
2	BA-M-F1_ATA	Filterkerzen in Zement	2
3	BA-P-AM1	BAG-Abfälle mit Am-241	40
4	BA-P-AM2	BAG-Abfälle mit Am-241	30
5	BA-P-AO1_ATA	BAG-Abfälle ohne Am-241	1
6	BA-P-AO3_ATA	BAG-Abfälle ohne Am-241	5
7	BA-P-BI1	Bitumenfass	1
8	BA-P-HL2	Pu-haltige feste Abfälle	30
9	BA-P-HL5_ATA	Pu-haltige feste Abfälle	94
10	BA-P-HL6_ATA	Pu-kontaminiertes Sperrgut	1
11	BA-P-M2_ATA	Mischabfälle BAG in Zement	1
12	BA-P-MI2_ATA	Mischabfälle BAG in Zement	4
13	BA-P-O3_ATA	Filterabfälle in Zement	1
14	SA-P-HL1	Hotlabor-Stilllegungsabfälle in Zement	81
15	SA-P-HL2_ATA	Hotlabor-Stilllegungsabfälle (Baustoffe und Metalle) in Zement	20
Total			**345**

3.3.2.2 Grossräumige hydraulische Durchlässigkeit $K = 10^{-9}$ m/s

Als nächstes werden die Resultate, wie sie in Fig. 3.3-4 dargestellt sind, ausgewertet. Unter Berücksichtigung der Vorgabe aus Kap. 3.2.3, dass bei der Abfallzuteilung auch die Abfallmengen und die sicherheitstechnischen Anforderungen an die Geologie berücksichtigt werden sollen, werden die folgenden Rechenfälle analysiert:

- **R1** (homogen-poröses Wirtgestein ohne Störungszonen, $K = 10^{-9}$ m/s)
- **R2** (geklüftetes Wirtgestein ohne Störungszonen, $T_K = 10^{-8}$ m^2/s, $K = 10^{-9}$ m/s)
- **R3** (homogen-poröses Wirtgestein mit zwei vertikalen Störungszonen ohne Channeling, $T_{St.Z.} = 10^{-8}$ m^2/s)
- **R4** (homogen-poröses Wirtgestein mit zwei vertikalen Störungszonen mit Channeling, $T_{St.Z.} = 10^{-8}$ m^2/s, $T_{Ch.} = 10^{-7}$ m^2/s)
- **R5** (erosive Freilegung des Lagers nach langen Zeiten; Einschlusszeit = 10^5 a)

Werden die oben definierten Abschneidekriterien auf die Resultate dieser Rechenfälle angewendet, so ergibt sich eine Liste von aus dem SMA-Lager zu entfernenden Abfallsorten gemäss Tab. 3.3-4.

Diskussion

Im Vergleich mit Tab. 3.3-1 wurden zur Erstellung der Tab. 3.3-4 die Anforderungen an die grossräumige hydraulische Durchlässigkeit des Wirtgesteins reduziert; dementsprechend umfasst die Liste der aus dem SMA-Lager zu entfernenden Abfallsorten jetzt 8 zusätzliche Abfallsorten. Bei diesen handelt es sich einerseits um weitere stark aktivierte Strukturteile aus dem unmittelbaren Kernbereich innerhalb des Reaktordruckbehälters (SA-B-SM, SA-G-SM, SA-M-SM), andererseits um Stilllegungsabfälle von Forschungsanlagen (stark aktivierte Kerneinbauten aus Forschungsreaktoren, stark aktivierter Edelstahl aus stillgelegten Beschleunigeranlagen: SA-P-DI2, SA-Z-LU1, SA-P-W2) sowie um ^{14}C-haltige und ^{226}Ra-haltige Mischabfälle (BA-P-MI1, BA-P-MI2_ATA).

Bei den stark aktivierten Strukturteilen aus dem unmittelbaren Kernbereich innerhalb des Reaktordruckbehälters stellt sich die Situation hier etwas anders dar als für $K = 10^{-10}$ m/s; hier kommen die entsprechenden Abfallsorten aus allen KKW vor, liefern zusammen einen spürbaren Beitrag zur Gesamtdosis und werden deshalb in der Tabelle belassen.

Die ATA-Abfallsorten, die im SMA-Lager verbleiben könnten, sind in Tab. 3.3-5 zusammengestellt; für diese ist das Volumen erwartungsgemäss nochmals etwas kleiner als für den Fall $K = 10^{-10}$ m/s. In Analogie zum Vorgehen im Fall $K = 10^{-10}$ m/s sollen für SGT-Etappe 1 deshalb auch für $K = 10^{-9}$ m/s sämtliche ATA dem LMA-Lager zugeteilt werden. Dies ergibt die definitive Abfallzuteilung für $K = 10^{-9}$ m/s: Alle ATA-Abfallsorten und die elf in Tab. 3.3-4 bezeichneten SMA-Abfallsorten werden dem LMA-Lager zugeteilt.

Tab. 3.3-4: Aus dem SMA-Lager zu entfernende Abfallsorten ($K = 10^{-9}$ m/s).

Die Kolonne ΔV [%] bezieht sich auf das Gesamtvolumen der ATA und SMA von 77'466 m^3 (ohne BEVA-Abfälle und ohne Reserven für CERN-Abfälle, vgl. Tab. 2.5-1a), wobei das Volumen der ATA 2276 m^3 und dasjenige der SMA 75'190 m^3 beträgt.

Nr.	**Abfallsorten**	**Beschrieb**	**Kategorie**	**V** [m^3]	**ΔV** [%]
1	WA-F-2	Abfälle AREVA bituminiert	ATA	310	0.40
2	WA-F-4A	Hülsen und Endstücke AREVA	ATA	1008	1.30
3	RA-G-E2	Reaktoreinbauten	SMA	225	0.29
4	RA-B-E2	Reaktoreinbauten	SMA	165	0.21
5	SA-L-SM	Aktivierter Stahl	SMA	1430	1.85
6	SA-B-SM	Aktivierter Stahl	SMA	1716	2.22
7	SA-G-SM	Aktivierter Stahl	SMA	910	1.17
8	SA-M-SM	Aktivierter Stahl	SMA	494	0.64
9	SA-P-DI2	Diorit Stablager-Abfälle in Zement	SMA	248	0.32
10	SA-P-W2	Aktivierter Edelstahl in Zement (PSI-West)	SMA	68	0.09
11	SA-Z-LU1	Lucens-Abfälle in Zement	SMA	182	0.23
12	BA-P-MI1	Mischabfälle BAG in Zement	SMA	751	0.97
13	BA-P-MI2_ATA	Mischabfälle BAG in Zement	ATA	4	0.01
14	BA-P-HL1	Pu-haltige Forschungsabfälle	ATA	263	0.34
15	BA-P-HL4	Pu-haltige Forschungsabfälle	ATA	36	0.05
16	BA-P-HL9	Pu-haltige Forschungsabfälle	ATA	310	0.40
17	BA-P-O4_ATA	Uran-Metall/Erz	ATA	4	0.01
18	BA-P-O4_SMA	Uran-Metall/Erz	SMA	41	0.05
Total				**8164**	**10.54**

Tab. 3.3-5: ATA-Abfallsorten, die im SMA-Lager verbleiben könnten ($K = 10^{-9}$ m/s).

Nr.	Abfallsorten	Beschrieb	V [m^3]
1	BA-G-F1	Filtermaterial in Zement	35
2	BA-M-F1_ATA	Filterkerzen in Zement	2
3	BA-P-AM1	BAG-Abfälle mit Am-241	40
4	BA-P-AM2	BAG-Abfälle mit Am-241	30
5	BA-P-AO1_ATA	BAG-Abfälle ohne Am-241	1
6	BA-P-AO3_ATA	BAG-Abfälle ohne Am-241	5
7	BA-P-BI1	Bitumenfass	1
8	BA-P-HL2	Pu-haltige feste Abfälle	30
9	BA-P-HL5_ATA	Pu-haltige feste Abfälle	94
10	BA-P-HL6_ATA	Pu-kontaminiertes Sperrgut	1
11	BA-P-M2_ATA	Mischabfälle BAG in Zement	1
12	BA-P-O3_ATA	Filterabfälle in Zement	1
13	SA-P-HL1	Hotlabor-Stilllegungsabfälle in Zement	81
14	SA-P-HL2_ATA	Hotlabor-Stilllegungsabfälle (Baustoffe und Metalle) in Zement	20
Total			**341**

3.3.2.3 Zusammenfassung

Tab. 3.3-6 und 3.3-7 zeigen zusammenfassend die zwei vorgeschlagenen Varianten der Abfallzuteilung, ausgedrückt als Liste derjenigen SMA, die zusätzlich zu den ATA dem LMA-Lager zugeteilt werden. Die beiden Varianten sind charakterisiert durch eine grossräumige hydraulische Durchlässigkeit von 10^{-10} m/s und 10^{-9} m/s. Aufgrund der Einschätzung der geologischen Möglichkeiten in der Schweiz, die zeigt, dass es genügend geeignete Wirtgesteine resp. einschlusswirksame Gebirgsbereiche mit einer grossräumigen hydraulischen Durchlässigkeit von 10^{-10} m/s oder besser gibt, wird die entsprechende Zuteilungsvariante als Referenzzuteilung (RZ) bezeichnet, die andere als alternative Zuteilung (AZ).

Tab. 3.3-8 und 3.3-9 zeigen die Volumen für die Abfallzuteilung auf das SMA- bzw. HAA-Lager für die beiden Varianten.

Fig. 3.3-6 und 3.3-7 zeigen beispielhaft, dass die mit der vollständigen Modellkette berechnete Dosis für den Fall, wo die Mindestanforderungen an die grossräumige hydraulische Durchlässigkeit des Wirtgesteins gerade noch eingehalten werden, für die beiden Varianten vergleichbar ist.

Tab. 3.3-6: Abfallzuteilung für $K = 10^{-10}$ m/s (Referenzzuteilung RZ).

Art und Volumina derjenigen SMA-Abfallsorten, die zusätzlich zu den ATA-Abfallsorten dem LMA-Lager zugeteilt werden. Im Gegensatz zu Tab. 3.3-1 und Tab. 3.3-2 sind hier ausschliesslich die zu entfernenden SMA-Abfallsorten aufgeführt; ferner bezieht sich hier ΔV auf das Volumen der SMA und nicht auf die Summe aus SMA und ATA.

Diese Angaben basieren auf dem Abfallinventar aus den bestehenden KKW bei einer angenommenen Betriebsdauer von 50 Jahren und einer Sammelperiode für die Abfälle aus Medizin, Industrie und Forschung bis 2050.

Abfall	**Beschreibung**	**V** [m^3]	**ΔV** [%]
RA-KKW [1)]	Reaktor-Steuerstäbe, Messlanzen, sonstige aktivierte Kleinteile	390	0.52
BA-MIF [2)]	Uran-haltiger Forschungsabfall	41	0.05
Total		**431**	**0.6**

1) Entspricht RA-G-E2 und RA-B-E2 aus Tab. 3.3-2.

2) Entspricht BA-P-O4_SMA aus Tab. 3.3-2.

Tab. 3.3-7: Abfallzuteilung für $K = 10^{-9}$ m/s (alternative Zuteilung AZ).

Art und Volumina derjenigen SMA-Abfallsorten, die zusätzlich zu den ATA-Abfallsorten dem LMA-Lager zugeteilt werden. Im Gegensatz zu Tab. 3.3-4 sind hier ausschliesslich die zu entfernenden SMA-Abfallsorten aufgeführt; ferner bezieht sich hier ΔV auf das Volumen der SMA und nicht auf die Summe aus SMA und ATA.

Diese Angaben basieren auf dem Abfallinventar aus den bestehenden KKW bei einer angenommenen Betriebsdauer von 50 Jahren und einer Sammelperiode für die Abfälle aus Medizin, Industrie und Forschung bis 2050.

Abfall	**Beschreibung**	**V** [m^3]	**ΔV** [%]
RA-KKW [1)]	Reaktor-Steuerstäbe, Messlanzen, sonstige aktivierte Kleinteile	390	0.52
SA-KKW [2)]	aktivierte Strukturteile aus dem unmittelbaren Kernbereich innerhalb des Reaktordruckbehälters	4550	6.05
BA-MIF [3)]	BAG Mischabfälle (C-14, Ra-226); Uran-haltiger Forschungsabfall	792	1.05
SA-MIF [4)]	Stilllegungsabfälle von Forschungsanlagen (stark aktivierte Kerneinbauten aus Forschungsreaktoren, stark aktivierter Edelstahl aus stillgelegten Beschleunigeranlagen)	497	0.66
Total		**6229**	**8.3**

1) Entspricht RA-G-E2 und RA-B-E2 aus Tab. 3.3-4.

2) Entspricht SA-L-SM, SA-B-SM, SA-G-SM, SA-M-SM aus Tab. 3.3-4.

3) Entspricht BA-P-MI1 und BA-P-O4_SMA aus Tab. 3.3-4.

4) Entspricht SA-P-DI2, SA-P-W2, SA-Z-LU1 aus Tab. 3.3-4.

Tab. 3.3-8: Abfallzuteilung auf das SMA- bzw. HAA-Lager für $K = 10^{-10}$ m/s (Referenzzuteilung RZ).

Abfälle der bestehenden KKW bei 50 Jahren Betrieb und einer Sammelperiode der Abfälle aus dem MIF-Bereich bis 2050 (in m^3 konditionierter und zusätzlich in Endlagerbehältern verpackter Abfälle, Zahlen gerundet). Die Zahlen enthalten für das SMA-Lager Reserven von 12'000 m^3 für Abfälle aus dem MIF-Bereich, vgl. Tab. 2.5-1a.

Diese Tabelle ist identisch mit Tab. 2.2-2 in Nagra (2008b).

		HAA-Lager		SMA-Lager	Total
		in BE/HAA-Stollen	in LMA-Tunnels	in SMA-Kavernen	
Kategorien gemäss KEV	HAA	7'325 [1)]	–	–	7'325
	ATA	–	2'280	–	2'280
	SMA	–	430	88'980 [2)]	89'410
	Total	7'325 [1)]	2'710	88'980 [2)]	99'015

1) Entspricht 1'955 Behältern.

2) Da die dem SMA-Lager zugeteilten Abfälle der BE-/HAA-Verpackungsanlage (2'220 m^3) erst nach Verschluss des SMA-Lagers anfallen, werden diese im Referenzfall gemäss Entsorgungsprogramm (Nagra 2008a) in Abweichung zu den Zahlen in dieser Tabelle im HAA-Lager in den LMA-Tunnels entsorgt; dies ergibt 4'930 m^3 Abfälle, welche im Referenzfall und für die Referenzzuteilung in den LMA-Tunnels entsorgt werden.

Tab. 3.3-9: Abfallzuteilung auf das SMA- bzw. HAA-Lager für $K = 10^{-9}$ m/s (alternative Zuteilung AZ).

Abfälle der bestehenden KKW bei 50 Jahren Betrieb und einer Sammelperiode der Abfälle aus dem MIF-Bereich bis 2050 (in m^3 konditionierter und zusätzlich in Endlagerbehältern verpackter Abfälle, Zahlen gerundet). Die Zahlen enthalten für das SMA-Lager Reserven von 12'000 m^3 für Abfälle aus dem MIF-Bereich, vgl. Tab. 2.5-1a.

		HAA-Lager		SMA-Lager	Total
		in BE/HAA-Stollen	in LMA-Tunnels	in SMA-Kavernen	
Kategorien gemäss KEV	HAA	7'325 [1)]	–	–	7'325
	ATA	–	2'280	–	2'280
	SMA	–	6'230	83'180 [2)]	89'410
	Total	7'325 [1)]	8'510	83'180 [2)]	99'015

1) entspricht 1'955 Behältern.

2) Da die dem SMA-Lager zugeteilten Abfälle der BE-/HAA-Verpackungsanlage (2'220 m^3) erst nach Verschluss des SMA-Lagers anfallen, werden diese im Referenzfall gemäss Entsorgungsprogramm (Nagra 2008a) in Abweichung zu den Zahlen in dieser Tabelle im HAA-Lager in den LMA-Tunnels entsorgt; dies ergibt 10'730 m^3 Abfälle, welche im Referenzfall und für die alternative Zuteilung in den LMA-Tunnels entsorgt werden.

Für die Festlegung der erforderlichen Lagerkapazität wird von einem sogenannten "umhüllenden Abfallinventar" ausgegangen, in dem zusätzlich zu den Abfallmengen gemäss Tab. 2.5-1a diejenigen einer Verlängerung der Betriebsdauer der KKW um 10 Jahre (Tab. 2.5-1b) und diejenigen aus einer zusätzlichen Elektrizitätsproduktion von 5 GWe während 60 Jahren durch neue KKW (Tab. 2.5-1c) berücksichtigt werden. Für die Abfallzuteilung beim umhüllenden Abfallinventar werden die Abfallmengen in Tab. 3.3-8 (Referenzfall/Referenzzuteilung) skaliert, unter Berücksichtigung des zeitlichen Anfalls der Abfälle der BE/HAA-Verpackungsanlage. Dies ergibt für das SMA-Lager einen Platzbedarf von 200'000 m^3 für in Endlagerbehälter verpackte Abfälle, für das HAA-Lager einen solchen von 20'000 m^3 für BE/HAA und 7'500 m^3 für LMA (gerundete Zahlen).

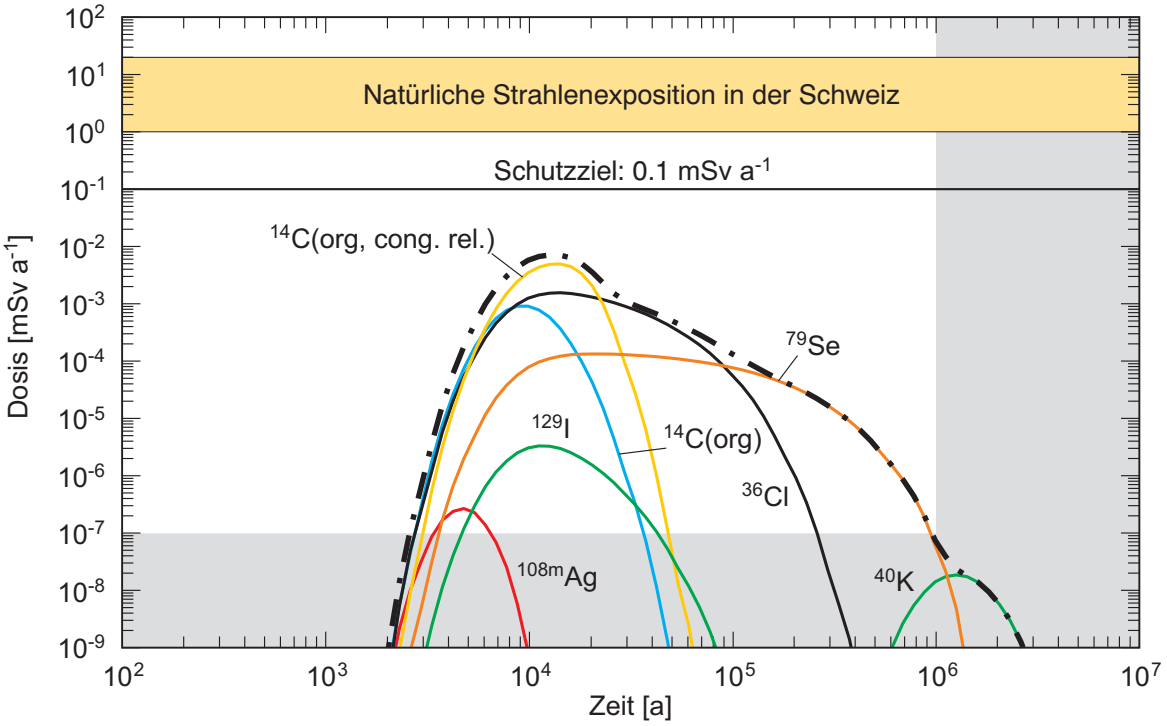


Fig. 3.3-6: Berechnete Dosen für ein SMA-Lager in einem homogen-porösen Wirtgestein (RZ).

Inventar: Referenzzuteilung (50 Jahre Betrieb der bestehenden KKW); Wirtgestein: Homogen-porös; hydraulischer Gradient: 0.1 m/m (vertikal); hydraulische Durchlässigkeit: 10^{-10} m/s; Transportpfadlänge: 50 m; Sorption: Tonstein. Weitere Resultate von Rechnungen für die Referenzzuteilung im Zusammenhang mit der Ableitung von Anforderungen an die Geologie sind im Anhang 5 aufgeführt.

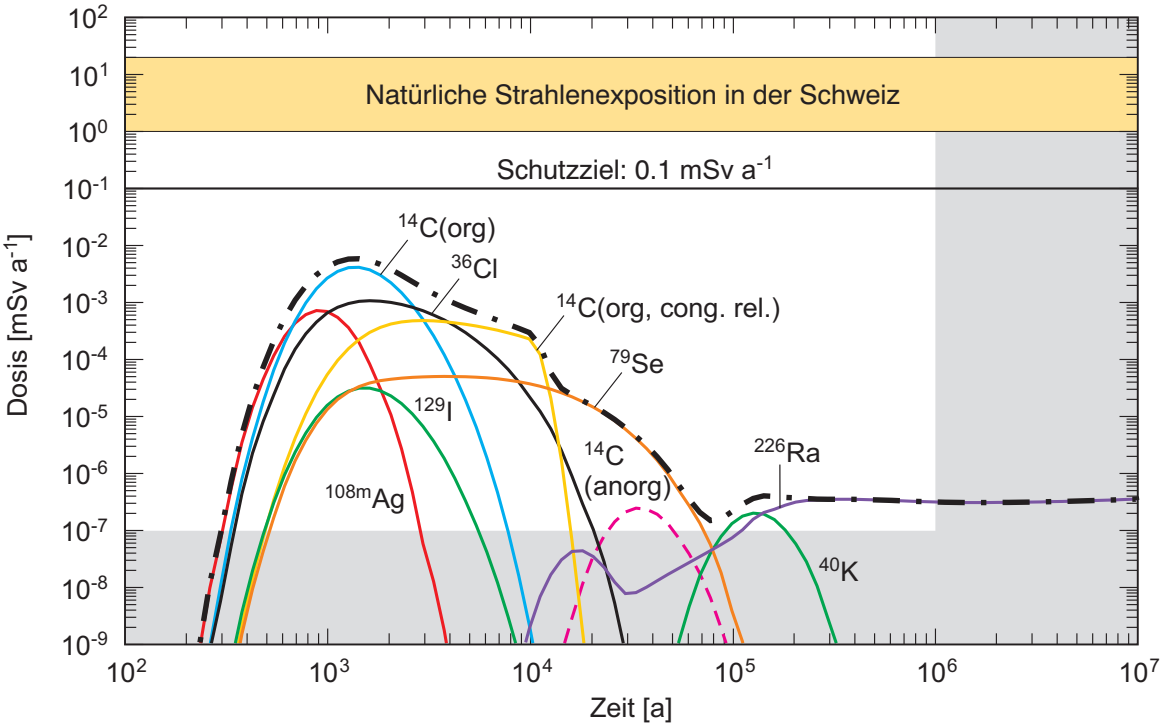


Fig. 3.3-7: Berechnete Dosen für ein SMA-Lager in einem homogen-porösen Wirtgestein (AZ).

Inventar: Alternative Zuteilung (50 Jahre Betrieb der bestehenden KKW); Wirtgestein: Homogen-porös; hydraulischer Gradient: 0.1 m/m (vertikal); hydraulische Durchlässigkeit: 10^{-9} m/s; Transportpfadlänge: 50 m; Sorption: Tonstein.

3.4 Schlussfolgerungen

Kap. 3 befasst sich mit der Abfallzuteilung. In Kap. 3.2 wurde das Vorgehen bei der Abfallzuteilung zu den geologischen Tiefenlagern SMA und HAA vorgestellt, und in Kap. 3.3 wurden die entsprechenden Vorschläge präsentiert, charakterisiert durch Mindestanforderungen an die grossräumige hydraulische Durchlässigkeit des Wirtgesteins für das SMA-Lager von 10^{-10} m/s und 10^{-9} m/s. Erwartungsgemäss ist das Volumen der ATA/SMA-Abfallsorten, die dem LMA-Lager zugeteilt werden, bei der Variante 10^{-9} m/s etwas höher als bei der Variante 10^{-10} m/s. Aufgrund der Einschätzung der geologischen Möglichkeiten in der Schweiz, die zeigt, dass es genügend geeignete Wirtgesteine resp. einschlusswirksame Gebirgsbereiche mit einer grossräumigen hydraulischen Durchlässigkeit von 10^{-10} m/s oder besser gibt, wurde die entsprechende Zuteilungsvariante als Referenzzuteilung (RZ) bezeichnet; die Variante für 10^{-9} m/s als alternative Zuteilung (AZ). Am Beispiel eines homogen-porösen Wirtgesteins wurde aufgezeigt, dass die mit der vollständigen Modellkette berechnete Dosis für den Fall eines SMA-Lagers mit dem grösseren Inventar (RZ) in einem Wirtgestein mit einer geringeren grossräumigen hydraulischen Durchlässigkeit (10^{-10} m/s) vergleichbar ist mit derjenigen für den Fall eines SMA-Lagers mit dem kleineren Inventar (AZ) in einem Wirtgestein mit einer höheren grossräumigen hydraulischen Durchlässigkeit (10^{-9} m/s). In beiden Fällen liegt die Dosis deutlich unter dem Schutzziel. Dies bestätigt die Aussage, dass durch eine gezielte Reduktion des Inventars die Anforderungen an die Geologie reduziert werden können bei gleichbleibender Sicherheit.

4 Barrieren- und Sicherheitskonzept für das SMA- und das HAA-Lager

4.1 Ziel und Aufbau des Kapitels

Abgestimmt auf die gewählte Abfallzuteilung wird im vorliegenden Kapitel das Barrieren- und Sicherheitskonzept für das SMA- und das HAA-Lager festgelegt und erläutert. Kap. 4.2 gibt einen Überblick über die wichtigsten Merkmale eines geologischen Tiefenlagers. In Kap. 4.3 wird das Barrieren- und Sicherheitskonzept für das SMA- und das HAA-Lager festgelegt und erläutert, in Kap. 4.4 werden die Sicherheitsfunktionen vorgestellt, auf das sich das Sicherheitskonzept abstützt, und in Kap. 4.5 wird aufgezeigt, wie die Sicherheitsfunktionen durch die Elemente des Barrierensystems gewährleistet werden. In Kap. 4.6 werden lagerinduzierte Phänomene mit dem Potenzial zur Beeinträchtigung der Barrierenwirkung diskutiert. In Kap. 4.7 werden Illustrationen zur Wirksamkeit der Elemente des Barrierensystems präsentiert, und Kap. 4.8 enthält die Schlussfolgerungen.

4.2 Beschreibung eines geologischen Tiefenlagers

Kap. 4.2 gibt einen Überblick über die wichtigsten Merkmale eines geologischen Tiefenlagers und identifiziert die übergeordneten Aspekte bzgl. Anforderungen an das Barrierensystem. Diese Merkmale und Anforderungen können wie folgt zusammengefasst werden:

- **Langzeitstabilität des Barrierensystems** – Eine langfristig stabile Situation stellt sicher, dass das Barrierensystem vor ungünstigen Prozessen und Ereignissen geschützt ist und deshalb über die notwendigen Zeiten[57] seine Funktion erfüllen kann. Dazu sind wichtig:
  - **Geologische Langzeitstabilität** – Zur Gewährleistung der Langlebigkeit des Barrierensystems wird eine stabile geologisch-tektonische Situation gesucht.
  - **Überdeckung der untertägigen Lagerkammern** – Damit die Rückhaltung der Abfälle in den Lagerkammern im Betrachtungszeitraum nicht durch oberflächennahe Prozesse, durch menschliche Tätigkeiten sowie durch Erosion unzulässig beeinträchtigt wird, muss das Wirtgestein in genügender Tiefe (abgestimmt auf die Erosionsrate) liegen.
- **Barrierenwirkung des Wirtgesteins und seine Geometrie** – Zur Barrierenwirkung für Radionuklide können neben dem Wirtgestein auch die sogenannten Rahmengesteine beitragen. Bezüglich Barrierenwirkung des Wirtgesteins bzw. der Rahmengesteine (nachfolgend werden der Einfachheit halber nur noch Wirtgesteine erwähnt) sind verschiedene Merkmale wichtig, nämlich:
  - **Wasserführung des Wirtgesteins** – Die Wasserführung des Wirtgesteins ist ein zentraler Faktor für die Freisetzungsrate von Radionukliden aus dem Nahfeld in die Geosphäre und für den Radionuklidtransport durch die Geosphäre in die Biosphäre. Ausserdem kann sie die Langzeitentwicklung resp. das Langzeitverhalten der technischen Barrieren beeinflussen durch An- bzw. Abtransport reaktiver gelöster Stoffe. Es werden Wirtgesteine mit geringer Wasserführung gesucht.
  - **Länge der Transportpfade im Wirtgestein** – Damit genügend lange Transportpfade zur Verfügung stehen, werden als Wirtgesteine Gesteinseinheiten mit einem Potenzial für genügende Mächtigkeit und laterale Ausdehnung gesucht. Bei einer geeigneten Konfiguration (Geometrie) des Wirtgesteins ergibt dies eine genügende Länge der

[57] D.h. im Betrachtungszeitraum.

Transportpfade, wobei die notwendige Transportpfadlänge von der Barrierenwirkung (hydraulische Durchlässigkeit, Art der Transportpfade und Ausbildung des Porenraums) abhängt.

- **Geochemische Verhältnisse im Wirtgestein** – Die geochemischen Verhältnisse im Wirtgestein, d.h. die Gesteins- und Porenwasserzusammensetzung, beeinflussen dessen Radionuklid-Rückhalteeigenschaften sowie die Langzeitentwicklung resp. das Langzeitverhalten der technischen Barrieren. Es werden Situationen und Wirtgesteine mit geeigneten geochemischen Bedingungen gesucht.
- **Weitere Wirtgesteinseigenschaften** – Für die Radionuklidrückhaltung in der Geosphäre sind weitere Eigenschaften der Wirtgesteine wie die Ausbildung der Wasserfliesspfade (Porositätsverteilung) und die Verträglichkeit bezüglich lagerbedingter Einflüsse (Gasfreisetzung, Temperatureffekte) wichtig. Es werden Wirtgesteine mit entsprechenden geeigneten Eigenschaften gesucht.

- **Bautechnische Machbarkeit** – Für den Bau, Betrieb und Verschluss eines geologischen Tiefenlagers entsprechend den Vorgaben der Sicherheit sind verschiedene Merkmale wichtig, nämlich:
  - **Geotechnische Eigenschaften des Wirtgesteins** – Für die Erstellung der untertägigen Bauten ist eine genügende Standfestigkeit des Gesteins notwendig. Es werden Wirtgesteine mit genügender Standfestigkeit gesucht.
  - **Geometrie des Wirtgesteins** – Damit die untertägigen Bauten des Lagers vernünftig angeordnet werden können, muss das Wirtgestein eine genügende Ausdehnung haben, eine genügend ruhige Lagerung ausweisen und seine Tiefenlage die bautechnisch machbare Maximaltiefe nicht überschreiten.
  - **Zugänglichkeit des Wirtgesteins** – Die untertägigen Bauten müssen zugänglich sein. Es werden deshalb Situationen gesucht, bei denen die über dem Wirtgestein liegenden Gesteine mit vernünftigem Aufwand durchfahren werden können.
- **Charakterisierbarkeit der Geologie** – Für den Nachweis der Langzeitsicherheit bzw. die Belastbarkeit der Aussagen sind die Charakterisierbarkeit (Explorierbarkeit) und die Prognostizierbarkeit (Aussagen zur zukünftigen Entwicklung) des gewählten Standorts bzw. seiner Geologie von zentraler Bedeutung. Gute Charakterisierbarkeit schon von der Oberfläche aus ist von Vorteil, da damit später bei der untertägigen Exploration (Sondierstollen) negative Überraschungen mit grosser Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen werden können[58]. Folgende Merkmale sind wichtig:
  - **Kenntnis der Wirtgesteinseigenschaften** – Bezüglich der oben erwähnten Wirtgesteinseigenschaften sind gut explorierbare Wirtgesteine bzw. gut verstandene Wirtgesteine vorteilhaft.
  - **Charakterisierbarkeit der Geometrie des Wirtgesteins** – Es werden Situationen gesucht mit ausreichender Explorierbarkeit der geometrischen Verhältnisse (genügende Raumreserven, keine komplexen Situationen etc.).
  - **Prognostizierbarkeit der geologischen Situation** – Für die Langzeitsicherheit sind zuverlässige Aussagen über die zeitliche Entwicklung des Barrierensystems im Betrachtungszeitraum notwendig. Damit die mögliche Entwicklung genügend zuverlässig eingegrenzt werden kann, werden Situationen mit ausreichender Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen gesucht.

---

[58] Im Extremfall könnte ein Standort je nach Raumreserven durch einen ungünstig gelegten Sondierstollen unbrauchbar werden.

Die für die Abfallzuteilung und die Lagerauslegung erfahrungsgemäss zu berücksichtigenden sicherheitsbezogenen und bautechnischen Aspekte eines geologischen Tiefenlagers sind in Tab. 4.2-1 zusammengestellt. Die detaillierten Anforderungen an die Geologie werden in Kap. 5 behandelt.

Tab. 4.2-1: Sicherheitsbezogene und bautechnische Aspekte eines geologischen Tiefenlagers (zusammenfassende Tabelle).

Aspekt	**Merkmal**	**Relevanz**
Langzeitstabilität des Barrierensystems	Geologische Langzeitstabilität	Barrierenwirkung im Betrachtungszeitraum
	Tiefenlage/Überdeckung der untertägigen Lagerkammern	Barrierenwirkung im Betrachtungszeitraum
Eigenschaften des Wirtgesteins bzgl. Barrierenwirkung und seiner Geometrie	Mächtigkeit	Länge des Transportwegs im Wirtgestein
	Laterale Ausdehnung	Länge des Transportwegs im Wirtgestein
	Hydraulische Eigenschaften des Wirtgesteins (Durchlässigkeit, Anwesenheit und Eigenschaften von Störungszonen, Ausbildung der Wasserfliesspfade, …)	Wasserführung des Wirtgesteins beeinflusst (i) Radionuklidfreisetzung (ii) Lebensdauer der technischen Barrieren
	Gesteins- und Porenwasser-zusammensetzung	Geochemische Verhältnisse im Wirtgestein beeinflussen (i) Radionuklid-Rückhalteeigenschaften; (ii) Langzeitentwicklung der technischen Barrieren
	Verträglichkeit bezüglich lagerbedingter Einflüsse (Gas, Wärme, pH-Fahne, …)	Lagerbedingte Einflüsse sollten günstige sicherheitstechnische Eigenschaften des Wirtgesteins möglichst wenig beeinflussen
Bautechnische Machbarkeit	Geotechnische Eigenschaften Wirtgestein	Standfestigkeit des Gesteins
	Mächtigkeit	Platzbedarf
	Laterale Ausdehnung	Platzbedarf
	Ruhige Lagerung	Machbarkeit unter Einhaltung der Vorgaben aus der Sicherheitsanalyse (min. Länge des Transportwegs)

Tab. 4.2-1: (Fortsetzung)

Aspekt	Merkmal	Relevanz
Bautechnische Machbarkeit	Maximaltiefe	Machbarkeit
	Eigenschaften des über dem Wirtgestein liegenden Gesteins	Zugänglichkeit des Wirtgesteins
Charakterisierbarkeit der Geologie	Kenntnis der Wirtgesteinseigenschaften	Explorierbarkeit und Prognostizierbarkeit der Wirtgesteinseigenschaften Belastbarkeit der Aussagen der Sicherheitsanalyse
	Charakterisierbarkeit der Geometrie des Wirtgesteins	Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse Machbarkeit
	Prognostizierbarkeit der geologischen Situation	Belastbarkeit der Voraussagen zur Langzeitentwicklung des Barrierensystems

4.3 Festlegung des Barrieren- und Sicherheitskonzepts für das SMA- und das HAA-Lager

Das **Barrierenkonzept** beschreibt die funktionale Beschaffenheit der verschiedenen technischen und geologischen Barrieren des Tiefenlagers. Die Fig. 4.3-1 und 4.3-2 zeigen beispielhafte Auslegungen des SMA- bzw. HAA-Lagers. Die entsprechenden Referenz-Barrierenkonzepte sind in Fig. 4.3-3 bis 4.3-6 abgebildet. Alle diese Konzepte basieren auf einem System von gestaffelten passiven Sicherheitsbarrieren, bestehend aus folgenden Elementen:

- **Abfallmatrizen:** Brennstofftabletten (in Hüllrohren) im Falle der BE, Glasmatrix im Falle der HAA und Verfestigungsmatrizen im Falle der LMA und SMA
- **Endlagerbehälter:** Stahlbehälter[59] im Falle von BE und HAA, Betoncontainer im Falle von LMA und SMA
- **Verfüllung der untertägigen Lagerkammern:** Bentonit-Verfüllung im Falle von BE und HAA und zementbasierter Mörtel im Falle von LMA und SMA
- **Verfüllung und Versiegelung der untertägigen Bauwerke (Zugang, weitere Bauwerke)**
- **Wirtgestein und allenfalls vorhandene Rahmengesteine (einschlusswirksamer Gebirgsbereich)**
- **Geologische Situation**

[59] Referenzfall; alternative Materialien sind möglich (s. auch Erläuterungen im nachfolgenden Text).

Für verschiedene Elemente des Barrierensystems sind alternative Varianten möglich. Beispielsweise können bei Bedarf Kupferbehälter statt Stahlbehälter für BE und HAA (Nagra 2002c, Johnson & King 2003) oder zusätzliche Bentonit-Barrieren für LMA und SMA verwendet werden. Diese Varianten sind nicht Bestandteil der Referenz-Barrierenkonzepte und werden in diesem Bericht nicht weiter diskutiert[60].

Das **Sicherheitskonzept** zeigt auf, wie die verschiedenen technischen und geologischen Barrieren zur Sicherheit des Gesamtsystems beitragen. Generell wird ein Sicherheitskonzept angestrebt, bei dem sowohl die technischen als auch die geologischen Barrieren (Wirtgestein, allenfalls vorhandene Rahmengesteine und ihre geologische Situation) in signifikantem Masse zur Barrierenwirkung des Gesamtsystems beitragen. Gemäss diesem Grundsatz werden Sicherheitskonzepte, die sich praktisch vollständig auf die Barrierenwirkung der technischen Barrieren abstützen (z.B. Kupferbehälter in durchlässigeren Gesteinsformationen) oder bei denen die technischen Barrieren praktisch nicht zur Barrierenwirkung beitragen (z.B. nicht sorbierendes Verfüllmaterial in Lagerkammern und Zugangsbauwerken, Lager mit Langzeitkontrolle ohne Verfüllung) bei der Evaluation der Standortmöglichkeiten nicht in Betracht gezogen. Des Weiteren werden Wirtgesteine nicht betrachtet, die zwar von einschlusswirksamen Rahmengesteinen umschlossen sind, sonst aber über keine eigene Barrierenwirkung verfügen (z.B. höher durchlässige Fremdgesteinseinschlüsse).

[60] Für die spätere Realisierung der geologischen Tiefenlager bleiben jedoch alternative Barrierenkonzepte grundsätzlich offen.

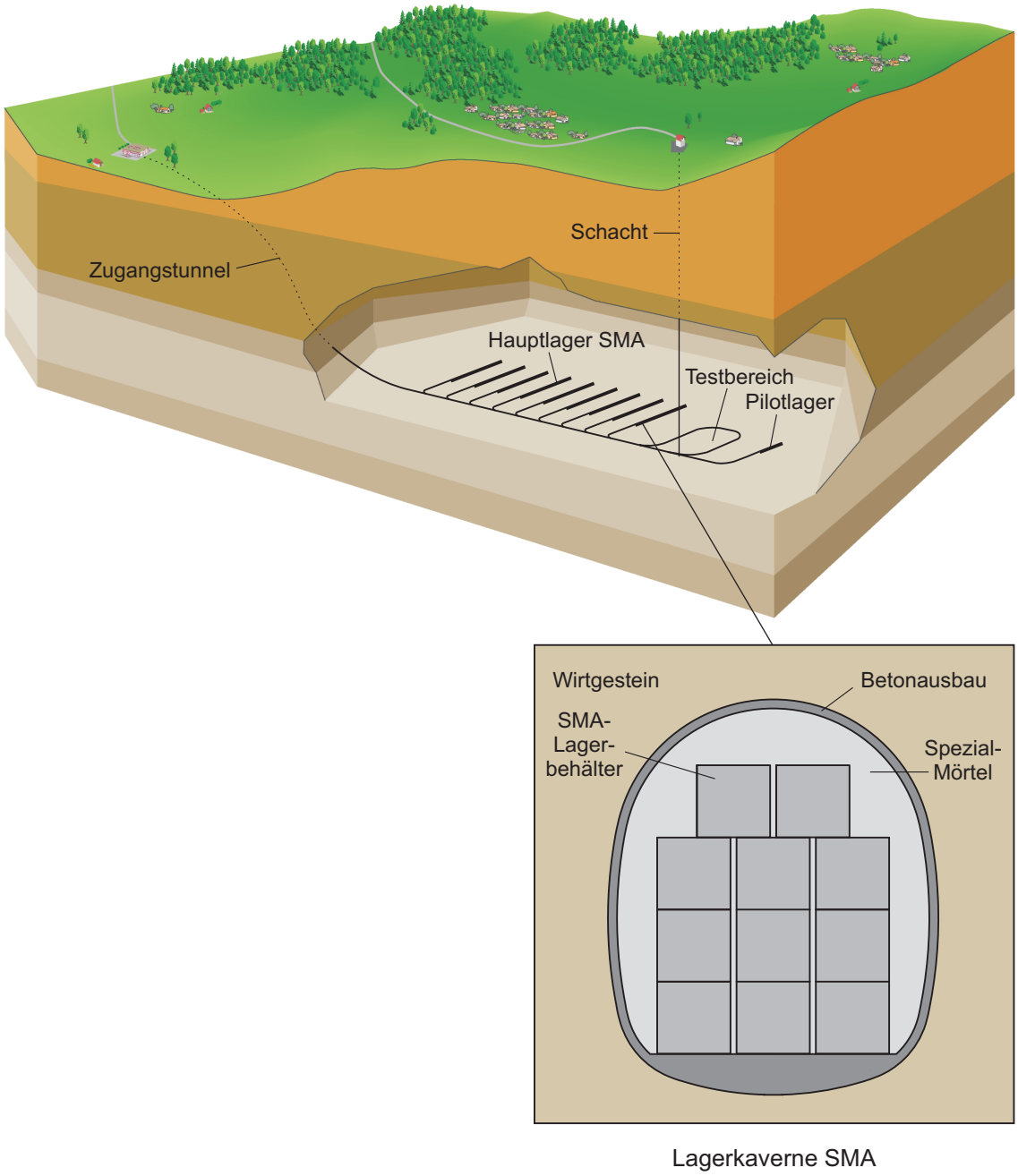


Fig. 4.3-1: Konzeptionelle Darstellung des geologischen Tiefenlagers SMA.

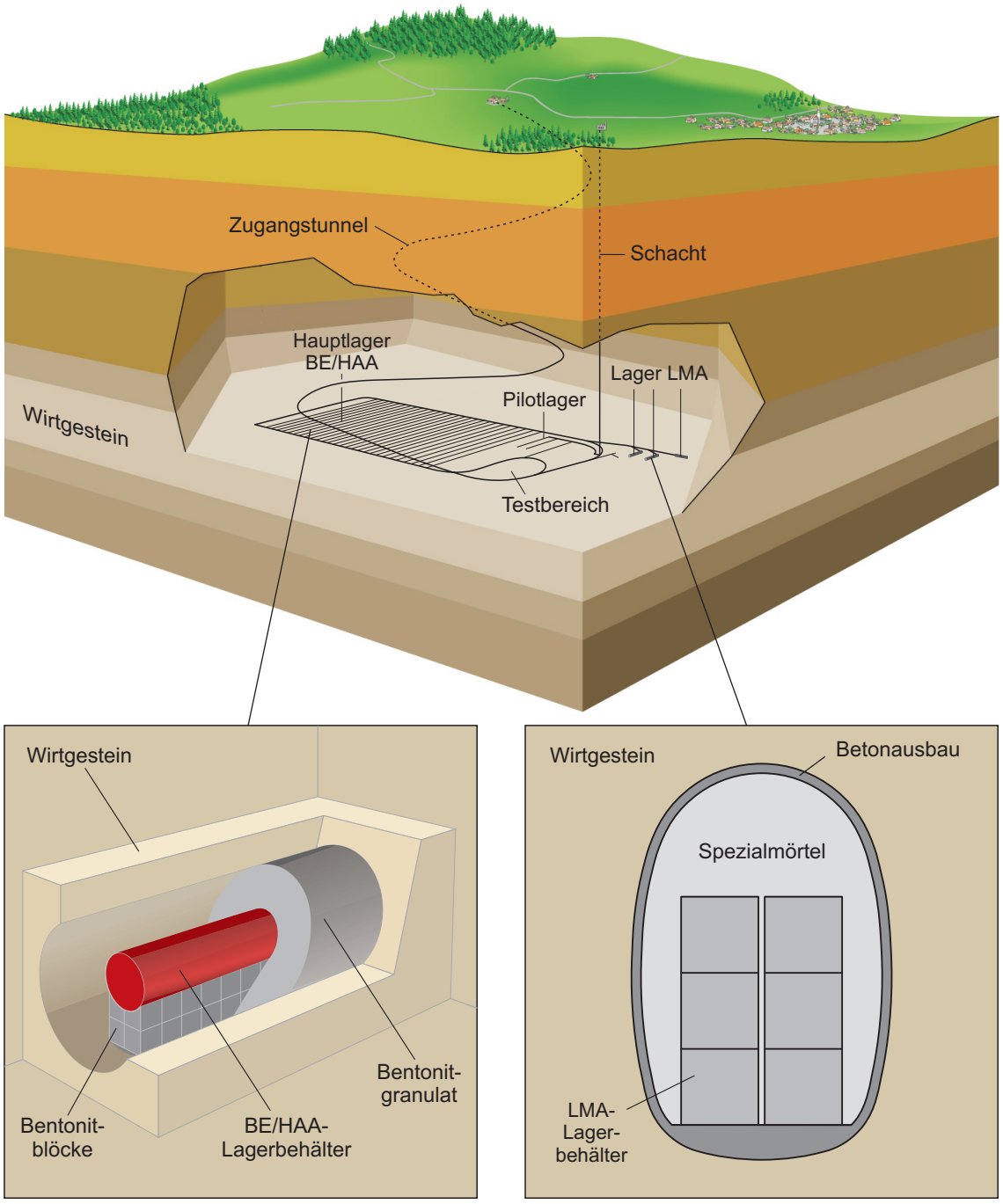
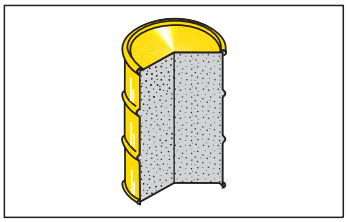


Fig. 4.3-2: Konzeptionelle Darstellung des geologischen Tiefenlagers HAA für abgebrannte Brennelemente (BE), verglaste hochaktive Abfälle aus der Wiederaufarbeitung (HAA) und langlebige mittelaktive Abfälle (LMA).

Sicherheitsbarrieren SMA

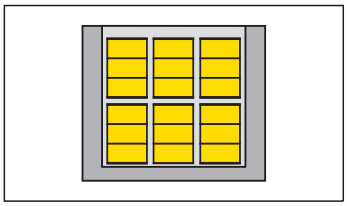
Abfallmatrix (diverse Materialien)

- Fixierung der Radionuklide in der Abfallmatrix
- Kleine Degradationsrate der Abfallmatrix



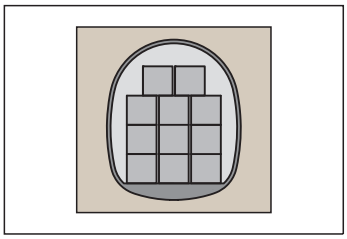
Endlagerbehälter

- Einschluss der Abfälle für eine beschränkte Zeit
- Danach: Begrenzung Wasserzutritt und Radionuklid-Rückhaltung (Sorption an Behältermaterialien und Korrosionsprodukten)



Verfüllung (Zementmörtel)

- Geeigneter Übergang zwischen Endlagerbehältern und Wirtgestein
- Günstige Radionuklid-Rückhalteeigenschaften
- Günstige Bedingungen für Langzeitstabilität der Endlagerbehälter



Wirtgestein

- Geringe Wasserführung
- Günstige Ausbildung des Porenraums
- Günstige geochemische Bedingungen für Radionuklid-Rückhaltung
- Günstige Bedingungen für Langzeitstabilität der technischen Barrieren

Geologische Situation

- Günstige Konfiguration Wirtgestein zur Anordnung der Lagerkavernen
- Günstige Bedingungen für Langzeitstabilität des Barrierensystems
- Abwesenheit von in absehbarer Zukunft nutzungswürdigen Rohstoffvorkommen

Anordnung der Lagerkammern tief im Untergrund

- Isolation der Abfälle
- Schutz vor unerwünschtem Zugriff
- Schutz vor unbeabsichtigtem Eindringen
- Schutz vor Erosion

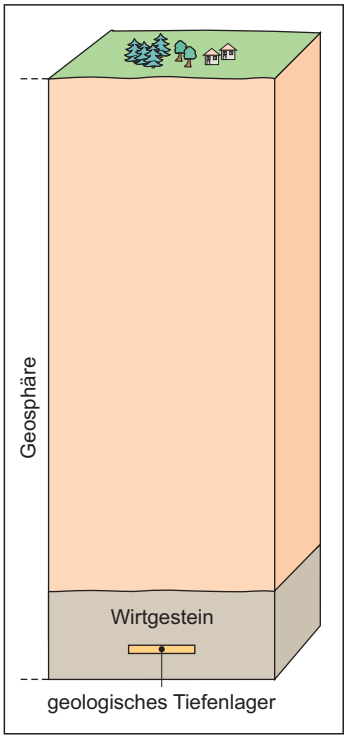
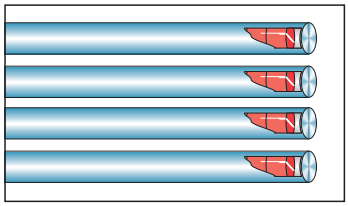


Fig. 4.3-3: Referenz-Barrierenkonzept für schwach- und mittelaktive Abfälle (SMA).

Sicherheitsbarrieren BE

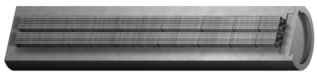
Abfallmatrix (UO_2/MOX)

- Fixierung der Radionuklide in der Brennstoffmatrix
- Kleine Korrosionsrate der Brennstoffmatrix



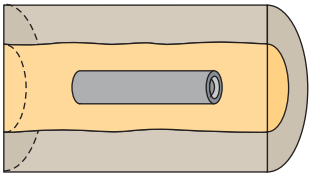
Endlagerbehälter

- Einschluss der Abfälle für mehrere tausend Jahre
- Danach: Begrenzung Wasserzutritt und Radionuklid-Rückhaltung (Sorption an Korrosionsprodukten)



Verfüllung (Bentonit)

- Geeigneter Übergang zwischen Endlagerbehältern und Wirtgestein
- Günstige Radionuklid-Rückhalteeigenschaften
- Günstige Bedingungen für Langzeitstabilität der Endlagerbehälter



Wirtgestein

- Geringe Wasserführung
- Günstige Ausbildung des Porenraums
- Günstige geochemische Bedingungen für Radionuklid-Rückhaltung
- Günstige Bedingungen für Langzeitstabilität der technischen Barrieren

Geologische Situation

- Günstige Konfiguration Wirtgestein zur Anordnung der Lagerstollen
- Günstige Bedingungen für Langzeitstabilität des Barrierensystems
- Abwesenheit von in absehbarer Zukunft nutzungswürdigen Rohstoffvorkommen

Anordnung der Lagerkammern tief im Untergrund

- Isolation der Abfälle
- Schutz vor unerwünschtem Zugriff
- Schutz vor unbeabsichtigtem Eindringen
- Schutz vor Erosion

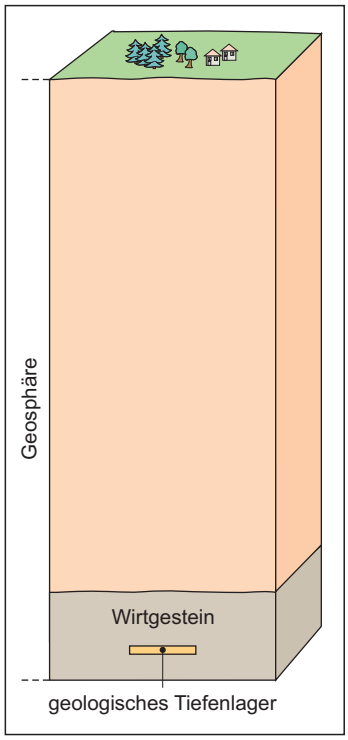
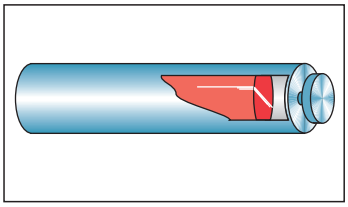


Fig. 4.3-4: Referenz-Barrierenkonzept für abgebrannte Brennelemente (BE).

Sicherheitsbarrieren HAA

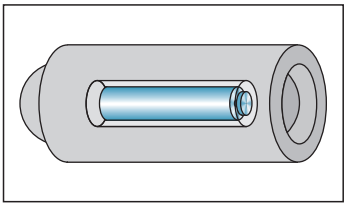
Abfallmatrix (Glas)

- Fixierung der Radionuklide in der Glasmatrix
- Kleine Glaskorrosionsrate



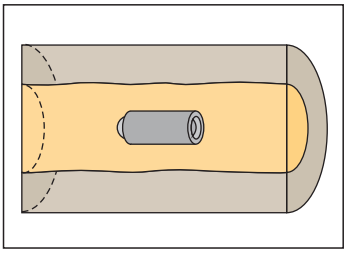
Endlagerbehälter

- Einschluss der Abfälle für mehrere tausend Jahre
- Danach: Begrenzung Wasserzutritt und Radionuklid-Rückhaltung (Sorption an Korrosionsprodukten)



Verfüllung (Bentonit)

- Geeigneter Übergang zwischen Endlagerbehältern und Wirtgestein
- Günstige Radionuklid-Rückhalteeigenschaften
- Günstige Bedingungen für Langzeitstabilität der Endlagerbehälter



Wirtgestein

- Geringe Wasserführung
- Günstige Ausbildung des Porenraums
- Günstige geochemische Bedingungen für Radionuklid-Rückhaltung
- Günstige Bedingungen für Langzeitstabilität der technischen Barrieren

Geologische Situation

- Günstige Konfiguration Wirtgestein zur Anordnung der Lagerstollen
- Günstige Bedingungen für Langzeitstabilität des Barrierensystems
- Abwesenheit von in absehbarer Zukunft nutzungswürdigen Rohstoffvorkommen

Anordnung der Lagerkammern tief im Untergrund

- Isolation der Abfälle
- Schutz vor unerwünschtem Zugriff
- Schutz vor unbeabsichtigtem Eindringen
- Schutz vor Erosion

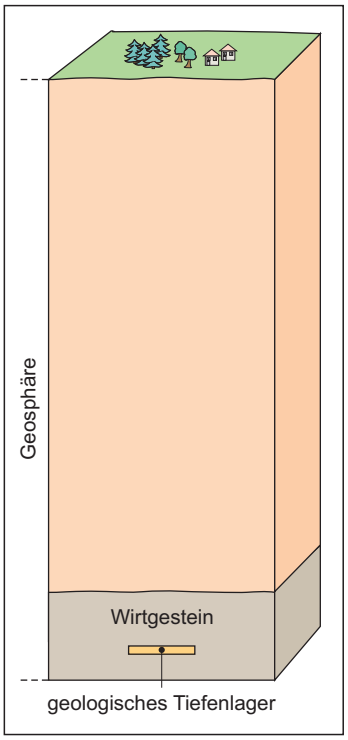
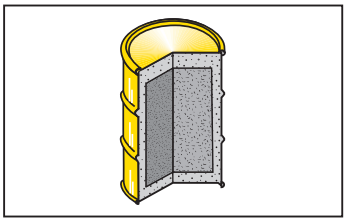


Fig. 4.3-5: Referenz-Barrierenkonzept für verglaste hochaktive Abfälle (HAA).

Sicherheitsbarrieren LMA

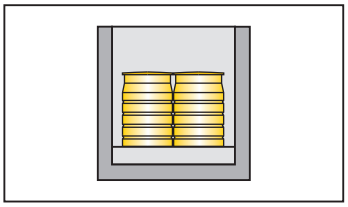
Abfallmatrix (diverse Materialien)

- Fixierung der Radionuklide in der Abfallmatrix
- Kleine Degradationsrate der Abfallmatrix



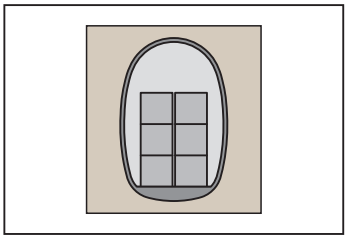
Endlagerbehälter

- Einschluss der Abfälle für eine beschränkte Zeit
- Danach: Begrenzung Wasserzutritt und Radionuklid-Rückhaltung (Sorption an Behältermaterialien und Korrosionsprodukten)



Verfüllung (Zementmörtel)

- Geeigneter Übergang zwischen Endlagerbehältern und Wirtgestein
- Günstige Radionuklid-Rückhalteeigenschaften
- Günstige Bedingungen für Langzeitstabilität der Endlagerbehälter



Wirtgestein

- Geringe Wasserführung
- Günstige Ausbildung des Porenraums
- Günstige geochemische Bedingungen für Radionuklid-Rückhaltung
- Günstige Bedingungen für Langzeitstabilität der technischen Barrieren

Geologische Situation

- Günstige Konfiguration Wirtgestein zur Anordnung der Lagertunnels
- Günstige Bedingungen für Langzeitstabilität des Barrierensystems
- Abwesenheit von in absehbarer Zukunft nutzungswürdigen Rohstoffvorkommen

Anordnung der Lagerkammern tief im Untergrund

- Isolation der Abfälle
- Schutz vor unerwünschtem Zugriff
- Schutz vor unbeabsichtigtem Eindringen
- Schutz vor Erosion

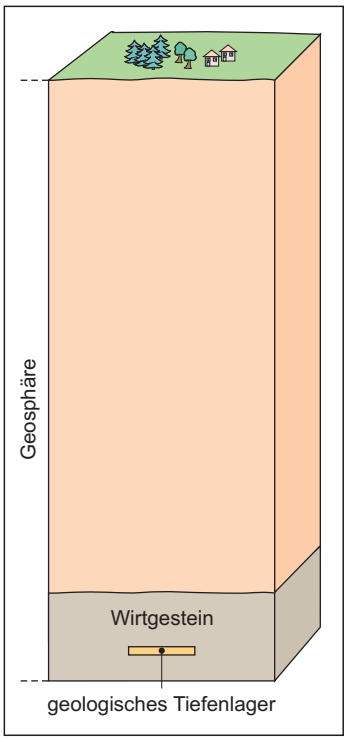


Fig. 4.3-6: Referenz-Barrierenkonzept für langlebige mittelaktive Abfälle (LMA).

4.4 Sicherheitsfunktionen des Barrierensystems

Die Elemente des Barrierensystems gewährleisten eine Reihe von **Sicherheitsfunktionen,** welche einen unerwünschten direkten Kontakt des Menschen mit den radioaktiven Abfällen verhindern, die Freisetzung von Radionukliden aus dem geologischen Tiefenlager klein halten und damit die radiologische Langzeitsicherheit des Tiefenlagers und den Schutz des spaltbaren Materials vor unerwünschtem menschlichen Zugriff gewährleisten. Die Sicherheitsfunktionen umfassen:

- **Physische Trennung der Abfälle vom menschlichen Lebensraum ("Isolation") und Gewährleistung der erforderlichen Langzeitstabilität ("Stabilität") –** Die Sicherheit der Abfälle, inkl. Schutz des spaltbaren Materials vor unerwünschtem menschlichen Zugriff (Non-Proliferation, Schutz bei Krisen), wird sichergestellt durch die Anordnung der Lagerkammern tief im Untergrund, wobei alle Zugangswege verfüllt und versiegelt werden. Dies schützt das Lager auch vor Prozessen und Ereignissen an der Erdoberfläche, welche z.B. die Sicherheit eines oberflächennahen Lagers gefährden könnten (z.B. Krieg, Unruhen, künftige Vergletscherungen, Erosion, …). Durch die Vermeidung von absehbaren Nutzungskonflikten wird zudem die Wahrscheinlichkeit eines Anbohrens des Tiefenlagers (z.B. im Zusammenhang mit der Exploration und dem Abbau von Rohstoffvorkommen) stark vermindert.
- **Einschluss der Radionuklide ("Einschluss") –** Ein grosser Teil der ursprünglich vorhandenen Radionuklide zerfällt in stabile Nuklide im Zeitintervall, während dem die Abfälle vollständig von den Abfallgebinden eingeschlossen sind. Dies gilt speziell für BE und HAA, welche in massiven Endlagerbehältern platziert werden, die dank günstigen geochemischen und felsmechanischen Bedingungen während mehrerer tausend Jahren einen vollständigen Einschluss bieten (Fig. 4.7-1a, b und Fig. 4.7-2a, b). Sogar nachdem die Behälter erstmals undicht geworden sind, stellen sie noch eine Barriere für den Radionuklidtransport dar aufgrund des begrenzten Wasserzutritts zur Abfallmatrix und aufgrund der für viele Radionuklide günstigen Retentionseigenschaften der Behälterkorrosionsprodukte.
- **Verzögerte Freisetzung der Radionuklide ("verzögerte Freisetzung") –** Nachdem die Abfallgebinde erstmals undicht geworden sind, ist die Rate, mit der die Radionuklide aus der Abfallmatrix freigesetzt werden, dank günstigen geochemischen Bedingungen (insbesondere durch die vorherrschenden reduzierenden Bedingungen) sehr niedrig. Dies gilt speziell für BE (stabile UO_2-Matrix) und HAA (stabile Glasmatrix), aber auch für diejenigen LMA und SMA, bei denen ein Grossteil der Radionuklide in langsam korrodierendem Stahl eingebettet ist (Fig. 4.7-1a, b und Fig. 4.7-2a, b).
- **Radionuklidrückhaltung im Nahfeld und in der Geosphäre ("Rückhaltung") –** Nachdem die Radionuklide aus der Abfallmatrix freigesetzt worden sind, werden sie dank vielfältiger günstiger Eigenschaften der technischen und geologischen Barrieren (z.B. günstige geochemische Bedingungen im Nahfeld und in der Geosphäre, geringe Wasserführung des Wirtgesteins und der Rahmengesteine) nur sehr langsam durch die weiteren Nahfeldbarrieren (Verfüllung/Versiegelung) und durch das Wirtgestein und die Rahmengesteine transportiert. Dabei findet zusätzlicher radioaktiver Zerfall statt, was die Freisetzung von Radionukliden aus dem geologischen Tiefenlager in den menschlichen Lebensraum weiter reduziert (Fig. 4.7-1a, b und Fig. 4.7-2a, b).
- **Kleine Freisetzungsraten –** Eine Vielzahl von zusätzlichen Prozessen, die während des Transports der Radionuklide in Richtung menschlicher Lebensraum wirksam sind, tragen dazu bei, dass die Radionuklidkonzentration in diesem Lebensraum beschränkt bleibt. Dazu gehören der radioaktive Zerfall während des Transports sowie die zeitliche und räumliche Verteilung der Radionuklide durch Diffusion, hydrodynamische Dispersion und Verdünnung.

4.5 Erwartete Beiträge der verschiedenen Elemente des Barrierensystems zur Sicherheit des Gesamtsystems

Die verschiedenen (funktionalen) Elemente des Barrierensystems gewährleisten die langfristige Wirksamkeit der im vorhergehenden Unterkapitel diskutierten Sicherheitsfunktionen. Sie umfassen:

- die **Anordnung der Lagerkammern tief im Untergrund,** welche die erforderliche physische Isolation der radioaktiven Abfälle über den zu betrachtenden Zeitraum auch unter Berücksichtigung der Erosion gewährleistet;
- die **geologische Situation,** welche sich durch eine geringe Wahrscheinlichkeit von geologischen Ereignissen und Prozessen auszeichnet, welche die Langzeitstabilität der verschiedenen Elemente des Barrierensystems innerhalb des zu betrachtenden Zeitraums beeinträchtigen könnten und welche ein unbeabsichtigtes menschliches Eindringen unwahrscheinlich macht aufgrund der Abwesenheit von in absehbarer Zeit nutzungswürdigen Rohstoffvorkommen;
- das **Wirtgestein und allenfalls vorhandene Rahmengesteine (einschlusswirksamer Gebirgsbereich),** welche durch eine geringe Wasserführung, eine günstige Ausbildung des Porenraums und günstige geochemische Bedingungen zum langsamen Radionuklidtransport beitragen und welche für die technischen Barrieren bzgl. Langzeitstabilität und Radionuklid-Rückhaltung eine geeignete hydrogeologische, geochemische und geomechanische Umgebung zur Verfügung stellen. Dies setzt auch eine geeignete Konfiguration des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs voraus (Tiefenlage, Mächtigkeit, laterale Ausdehnung), welche eine geeignete Anordnung der Lagerkammern erlaubt und genügend lange Migrationsdistanzen gewährleistet;
- die **Verfüllung der untertägigen Lagerkammern,** welche einen geeigneten Übergang bildet zwischen den Endlagerbehältern und dem Wirtgestein, mit günstigen Radionuklid-Rückhalteeigenschaften und welche für die Endlagerbehälter bzgl. Langzeitstabilität und für die Radionuklid-Rückhaltung geeignete Bedingungen schafft, wobei sie die günstigen Wirtgesteinseigenschaften möglichst wenig beeinträchtigt;
- die **Verfüllung und Versiegelung der untertägigen Bauwerke,** welche den menschlichen Zutritt zu den Abfällen verhindern und welche sicherstellen, dass die untertägigen Strukturen mechanisch stabil sind, welche kontrollierte hydraulische Bedingungen schaffen, günstige Radionuklid-Rückhalteeigenschaften aufweisen und geochemische Eigenschaften haben, welche sowohl mit dem Wirtgestein als auch mit den anderen technischen Barrieren kompatibel sind;
- die **Endlagerbehälter,** welche – im Falle der BE und der HAA – für eine Zeitdauer von mehreren tausend Jahren einen Einschluss der BE und der HAA sicherstellen; welche – im Falle der LMA und der SMA – entweder Abfallgebinde oder in gewissen Fällen (z.B. bei gewissen Stilllegungsabfällen) direkt die einzulagernden Abfälle enthalten und welche ebenfalls für eine gewisse Zeit zum Einschluss der Radionuklide beitragen, und welche selbst nachdem sie undicht geworden sind noch einen signifikanten Beitrag zur Radionuklid-Rückhaltung bzw. zur Verringerung der Freisetzungsraten liefern aufgrund einer Begrenzung des Wasserzutritts zu den Abfällen und aufgrund der günstigen Sorptionseigenschaften der Korrosionsprodukte für viele Radionuklide;

- die **Abfallmatrizen** (sowie gewisse metallische Abfallbestandteile), welche bei Bedingungen, wie sie in einem geologischen Tiefenlager vorherrschen, langzeitbeständig sind, dadurch kleine Korrosions- bzw. Degradationsraten aufweisen und dank der Fixierung eines Grossteils der Radionuklide in den Matrizen (und zum Teil in metallischen Abfallbestandteilen) wichtige Beiträge zur Radionuklid-Rückhaltung bzw. zur Verringerung der Radionuklid-Freisetzungsraten liefern.

Diese qualitative Beschreibung wird durch quantitative Analysen untermauert; dies ist Thema von Kap. 4.7. Zunächst werden aber im nachfolgenden Kapitel lagerbedingte Einflüsse mit dem Potenzial zur Beeinträchtigung der Barrierenwirkung diskutiert.

4.6 Diskussion von lagerbedingten Einflüssen mit dem Potenzial zur Beeinträchtigung der Barrierenwirkung

Die Erfahrungen aus früheren Sicherheitsanalysen zeigen, dass je nach betrachtetem Typ des geologischen Tiefenlagers (SMA oder HAA) bzw. je nach eingelagerten Abfällen und je nach betrachtetem Wirtgestein folgende lagerbedingte Einflüsse wichtig sein können: (i) Komplexbildner und andere Stoffe mit dem Potenzial zur Beeinträchtigung der Barrierenwirkung, (ii) pH-Fahne, (iii) Nahfeld-Kolloide, (iv) Gasbildung, (v) Wärmeeintrag.

Diese lagerbedingten Einflüsse und deren erwartete Auswirkungen auf die Langzeitsicherheit der geologischen Tiefenlager SMA und HAA werden im Folgenden kurz diskutiert.

4.6.1 Komplexbildner und andere Stoffe mit dem Potenzial zur Beeinträchtigung der Barrierenwirkung

Wie in Kap. 4.3 dargestellt, ist die chemische Rückhaltung der Radionuklide im Nahfeld (geringe Löslichkeit, Sorption) und im Wirtgestein (Sorption) wichtig für die Langzeitsicherheit eines geologischen Tiefenlagers.

Einige der SMA bzw. LMA enthalten Stoffe, welche die oben genannte chemische Rückhaltung von Radionukliden verringern könnten,

- weil sie mit letzteren Komplexe bilden und so deren Mobilität erhöhen können (Cyanide, Zellulose-Abbauprodukte etc.) oder
- weil sie zu oxidierenden Bedingungen führen können und so die Mobilität der meisten redox-sensitiven Radionukliden erhöhen (Nitrat) oder
- weil sie bei ihrer Zersetzung CO_2 freisetzen, welches den für die Sorption wichtigen Zementstein im Nahfeld degradiert (organische Stoffe wie Bitumen).

Solche Stoffe können die chemische Rückhaltung von Radionukliden vor allem im Nahfeld beeinträchtigen. Diese Rückhaltung wird mit technischen Massnahmen optimiert, indem die chemischen Wechselwirkungen zwischen den Abfallsorten minimiert werden. An Menge und Aktivität überwiegen Abfälle mit einer geringen Konzentration solcher Stoffe. Diese werden in einer Abfallgruppe 1 (SMA 1 oder LMA 1) zusammengefasst und in den jeweiligen Lagern räumlich separiert von Abfällen mit einer höheren Konzentration solcher Stoffe, welche in einer Abfallgruppe 2 (SMA 2 oder LMA 2) zusammengefasst werden, eingelagert.

Solche Stoffe können auch in das Wirtgestein gelangen (chemische Fahne), wenn sie nicht im Nahfeld zurückgehalten oder abgebaut werden. Die sorptionsmindernde Wirkung dieser Stoffe ist aber meist geringer, weil die Konzentrationen kleiner sind und weil andere chemische Bedingungen herrschen (tieferer pH-Wert).

In der Sicherheitsanalyse wird der Einfluss von solchen Stoffen quantitativ berücksichtigt, indem für die Abfallgruppe 2 in den geochemischen Nahfelddatenbanken im Vergleich mit der Abfallgruppe 1 radionuklidspezifisch die Sorptionswerte reduziert und die Löslichkeitslimiten erhöht werden.

4.6.2 pH-Fahne

SMA- und LMA-Kavernen enthalten hauptsächlich Zementmaterialien wie Mörtel und Beton. Rund 20 % des Kaverneninhalts besteht deshalb aus Zementstein. Letzterer setzt sich aus Portlandit ($Ca(OH)_2$) und Calcium-Aluminium-Silikat-Hydrat-Phasen (CSH, CASH) sowie wenig Alkalihydroxid zusammen. Im Kontakt mit dem Gesteinsporenwasser ist Zementstein thermodynamisch nicht stabil, sodass über lange Zeiträume die zementhaltigen Teile eines Tiefenlagers degradieren. Als Folge dieser Degradation ändert sich die Mineralzusammensetzung in den Kavernen und somit die chemische Rückhaltefähigkeit des Nahfelds. Gleichzeitig kann sich im Wirtgestein um das Lager und in den verfüllten Zugangsstollen eine Hoch-pH-Fahne ausbreiten.

Bei frischem Zement enthält das Zementporenwasser Alkalihydroxide und weist deshalb einen pH-Wert von über 13 auf. Solches Porenwasser kann im Gestein zur Auflösung von Mineralen führen, wobei die Porosität und in der Folge die hydraulische Durchlässigkeit tendenziell zunehmen. Allerdings ist die Menge an Alkalihydroxiden gering, sodass diese, unabhängig von der zeitlichen Entwicklung, quantitativ keine grossen Veränderungen des Wirtgesteins oder des Verfüllmaterials im Zugangsstollen bewirken können (Schwyn et al. 2003).

Im Gegensatz zu den Alkalihydroxiden fällt der in normalem Portlandzement enthaltene Portlandit ($Ca(OH)_2$) mengenmässig ins Gewicht. Das resultierende Porenwasser, welches zeitlich dem oben beschriebenen Hoch-pH-Wasser folgt, hat einen pH-Wert von etwa 12.5. Obwohl auch solches Wasser eine Mineralauflösung im Wirtgestein bewirkt, nimmt die Porosität in einem solchen System tendenziell ab, da die Ausfällung von Sekundärmineralen volumenmässig die Mineralauflösung mehr als kompensiert. In einem hydraulisch dynamischen System finden Auflösung und Ausfällung in der Regel an verschiedenen Orten statt, sodass sich die Porosität heterogenen entwickelt (Schwyn et al. 2003).

Durch die Mineralumwandlung im Wirtgestein und die vom Nahfeld beeinflusste Porenwasserzusammensetzung wird sich die Sorption elementspezifisch verändern; die Gesamtretardierung der Radionuklide im Einflussbereich einer pH-Fahne ist aber der Gesamtretardierung im ungestörten Wirtgestein etwa ebenbürtig (Bradbury & Baeyens 1997 und 2004). Durch den Einbau in Sekundärminerale können Radionuklide sogar längerfristig immobilisiert werden.

In der Entwicklung einer Hoch-pH-Fahne und in der Ungewissheit dieser Entwicklung unterscheiden sich homogen-poröse Gesteine mit diffusionsdominiertem Transport von geklüfteten Gesteinen mit advektiv dominiertem Transport.

Bei einem homogen-porösen Gestein mit diffusionsdominiertem Transport wie etwa Opalinuston verlaufen die Zementdegradation und die Entwicklung einer Hoch-pH-Fahne wegen des geringen Wasseraustauschs zwischen dem Gestein und dem zementhaltigen Nahfeld sehr langsam über Millionen von Jahren. Eine Hoch-pH-Fahne ist örtlich beschränkt und würde sich weniger als 10 Meter in das Gestein ausdehnen, selbst wenn sämtlicher Zementstein in den Lagerkammern degradiert würde (Nagra 2002c).

Die Ungewissheit über die Folgen einer Hoch-pH-Fahne für geklüftete Gesteine wie etwa den Mergel des Wellenbergs ist wesentlich grösser. Trotzdem kann ein wahrscheinliches Szenarium skizziert werden (Neall 1998): Nach der Aufsättigung des Lagers wird eine Fahne mit pH über 13 die Fliesspfade des angrenzenden Mergels im Abstrom tendenziell öffnen. Die Wirkung wird aber wegen der relativ geringen Menge an reaktiven Stoffen (Alkalihydroxide) begrenzt sein, obwohl nicht ausgeschlossen werden kann, dass sich diese pH-Fahne, abhängig vom Fliesssystem, 10 bis 100 Meter ausdehnen kann. Eine zu erwartende Porositätsreduktion (Versiegelung) an der Grenzfläche Zementlager – Fels vor allem im Anstrombereich wirkt der Bildung der pH-Fahne entgegen (Pfingsten 2001). Die Porositätsreduktion kommt durch die Ausfällung von Calcit zustande, wenn Bikarbonat im Gesteinsporenwasser mit dem Calcium-haltigen Zementporenwasser reagiert.

Das zeitlich folgende, durch Calciumhydroxid gepufferte Zementwasser (pH 12.5) wird die Fliesswege tendenziell schliessen, wahrscheinlich bis zur Versiegelung. Modellierarbeiten (Soler 2003) und Beobachtungen im Zusammenhang mit dem natürlichen Analogon Maqarin (Alexander & Mazurek 1996) unterstützen dieses Szenarium. Die versiegelten Fliesspfade können temporär anfangs durch im Lager produziertes Gas, später nur noch tektonisch reaktiviert werden.

Im pessimistischen Randbereich der oben erwähnten Ungewissheit steht das Szenarium, bei welchem die Fliesswege sich nicht total verschliessen, die Fliessgeschwindigkeit tendenziell zunimmt und die Porosität in der an die Fliesswege angrenzenden Matrix verringert wird, was ihre Rückhaltefähigkeit für Radionuklide beeinträchtigen würde.

4.6.3 Nahfeld-Kolloide

Für die Beurteilung der Barrierenwirkung des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs wird der Radionuklidtransport in der Regel als advektiv/dispersiver bzw. diffusiver Transportprozess innerhalb eines homogen-porösen Mediums oder diskreter wasserführender Strukturen abgebildet. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Radionuklide entweder als freie Ionen oder in komplexierter Form in der mobilen (wässerigen) Phase vorhanden oder aber durch Oberflächensorption auf festen Mineralphasen gebunden bzw. durch chemische Ausfällung immobilisiert sind. Falls in geklüfteten Wirtgesteinen eine Diffusion in Gesteinsbereiche mit stagnierendem Porenwasser erfolgt (Matrixdiffusion), führt dies zu einer zusätzlichen Verzögerung bzw. Abschwächung der Freisetzung. Unter Umständen können aber kolloidale Partikel – falls die Kolloide mobil sind – für stark sorbierende Radionuklide (welche gewöhnlich weitgehend zurückgehalten werden) die Radionuklidfreisetzung beschleunigen beziehungsweise verstärken; unter anderem weil solche Radionuklide an den Kolloiden sorbieren können und die Kolloide aufgrund ihrer Grösse und / oder Ladung nicht in die Gesteinsbereiche mit stagnierendem Porenwasser eindringen können (Voegelin & Kretzschmar 2002, Honeyman 1999, Kretzschmar et al. 1999, McCarthy & Zacharia 1989).

Damit der durch Kolloide beeinflusste Radionuklidtransport im Wirtgestein einen bedeutenden Beitrag liefern kann, müssen gleichzeitig die folgenden Bedingungen erfüllt sein:

- Signifikante Kolloidkonzentrationen im Porenwasser des Wirtgesteins
- Mobilität der Kolloide (keine Kolloid-Filtration)
- (Chemische) Stabilität der Kolloide im Wirtgestein
- Grosses bzw. irreversibles Sorptionsvermögen der Kolloide

Grundsätzlich können solche Kolloide entweder aus dem Nahfeld stammen oder aber unabhängig von der Anwesenheit eines geologischen Tiefenlagers im Wirtgestein vorhanden sein (natürliche Kolloide). In Kap. 4.6.3 werden ausschliesslich Kolloide betrachtet, die im Nahfeld gebildet werden. Es werden die beiden folgenden Fälle diskutiert: (i) Kolloide aus dem Nahfeld eines BE- bzw. HAA-Lagers (mit Bentonit-Barriere); (ii) Kolloide aus dem Nahfeld eines LMA- bzw. SMA-Lagers (zementhaltiges Nahfeld ohne Bentonit-Barriere).

(i) Kolloide aus dem Nahfeld eines BE- bzw. HAA-Lagers

(a) Kolloide, die innerhalb der Bentonit-Barriere gebildet werden

Die Bentonit-Barriere hat nicht nur günstige Radionuklid-Rückhalteeigenschaften, sondern wirkt auch als Kolloidfilter (Nagra 2002c). Demzufolge wird es im Wirtgestein (ausserhalb der Bentonit-Barriere) zu keinen signifikanten Konzentrationen von solchen Nahfeld-Kolloiden kommen.

(b) Bentonit-Kolloide

Grundsätzlich kann der Bentonit selbst als Quelle für Kolloide in Frage kommen (Bentonit-Erosion). Bei den geringen Wasserfliessraten im Nahfeld (sichergestellt durch die Mindestanforderungen an die hydraulische Durchlässigkeit des Wirtgesteins) und der vergleichsweise hohen Salinität des Porenwassers im Bentonit für die in Frage kommenden Wirtgesteine wird davon ausgegangen, dass sich keine signifikante Mengen an Bentonit-Kolloiden bilden können.

(ii) Kolloide aus dem zementhaltigen Nahfeld eines LMA- bzw. SMA-Lagers

Wieland (2001) hat gezeigt, dass in einem für ein LMA- bzw. SMA-Lager repräsentativen Zementnahfeld die Porenwasserkonzentration von Kolloiden, die aus Zementmineralien bestehen, sehr niedrig ist (≤ 100 µg/L). Ausserdem wird erwartet, dass solche Kolloide beim Übergang vom Nahfeld (hoher pH-Wert) in die Geosphäre (etwa neutraler pH-Wert in den in Frage kommenden Wirtgesteinen) ausflocken, da sie in einer solchen Umgebung nicht stabil sind.

Aus den oben genannten Gründen ist nach heutigem Kenntnisstand der Einfluss der Nahfeldkolloide auf die Langzeitsicherheit für die betrachteten Barrierenkonzepte und für die in Frage kommenden Wirtgesteine vernachlässigbar.

4.6.4 Gasbildung

Radioaktive Abfälle enthalten Metalle und/oder organische Materialien, die durch Korrosion resp. Degradation Gase bilden können. Zusätzlich kann durch Radiolyse von Wasser Gas gebildet werden[61]. Die relativen Anteile dieser Prozesse an der Gasbildung sind abhängig von der Art der Abfälle sowie von den geochemischen Bedingungen.

[61] Dieser Anteil ist bei allen Abfällen klein im Vergleich zum Anteil der durch Korrosion von Metallen und Degradation von organischen Materialien gebildeten Gasen (s. Diskussion in Nagra 2004a).

Gasbildung in einem geologischen Tiefenlager kann grundsätzlich die folgenden Auswirkungen auf die Langzeitsicherheit haben:

1. Bildung von neuen Freisetzungspfaden für Radionuklide im Wirtgestein (graduelle temporäre Veränderung der Wirtgesteinseigenschaften)
2. Auspressen von Porenwasser mit Radionukliden
3. Transport von volatilen Radionukliden in der Gasphase

HAA-Lager

Im Rahmen des Projekts Entsorgungsnachweis wurde die Gasbildung und deren Auswirkung auf die Langzeitsicherheit eines geologischen Tiefenlagers für BE, HAA und LMA im Opalinuston untersucht (Nagra 2002a, Nagra 2002c, Nagra 2004a). Speziell die mögliche Bildung von neuen Freisetzungspfaden für Radionuklide im Wirtgestein wurde detailliert behandelt, da Opalinuston sowohl eine niedrige hydraulische Durchlässigkeit als auch eine niedrige Permeabilität für Gas aufweist. Es wurde aufgezeigt, durch welche Prozesse das Gas durch das Wirtgestein transportiert wird und dass diese Prozesse die Langzeit-Barrierenwirkung des Wirtgesteins nicht signifikant beeinträchtigen (Nagra 2002a, Nagra 2002c, Nagra 2004a). Es wurde auch gezeigt, dass keine der beiden anderen grundsätzlich möglichen Auswirkungen (Auspressen von Porenwasser mit Radionukliden und Transport von volatilen Radionukliden in der Gasphase) die Langzeitsicherheit in Frage stellt (Nagra 2002c, Nagra 2004a). Für Wirtgesteine mit einer höheren hydraulischen Durchlässigkeit und Gaspermeabilität als Opalinuston (d.h. für alle anderen potenziellen Wirtgesteine) verliert die erste grundsätzlich mögliche Auswirkung der Gasbildung (Bildung von neuen Freisetzungspfaden für Radionuklide im Wirtgestein) an Bedeutung, und für die beiden anderen werden noch geringere resp. vergleichbar geringe Konsequenzen erwartet.

SMA-Lager

Im Sicherheitsbericht zum Rahmenbewilligungsgesuch für ein SMA-Lager am Standort Wellenberg (Nagra 1994b) wurden die zweite und dritte Auswirkung (Auspressen von Porenwasser mit Radionukliden und Transport von volatilen Radionukliden in der Gasphase) ebenfalls im Detail analysiert, mit dem Ergebnis, dass diese die Langzeitsicherheit nicht in Frage stellen. Die erste Auswirkung (Bildung von neuen Freisetzungspfaden für Radionuklide im Wirtgestein) ist in dem betrachteten geklüfteten Wirtgestein (Valanginien-Mergel) mit einem vergleichsweise niedrigen *in-situ* Gaseintrittsdruck, der unterhalb des Drucks liegt, ab welchem mit einer Schädigung des Wirtgesteins gerechnet werden muss, von untergeordneter Bedeutung (s. auch Nagra 1997).

Grundsätzlich könnte ein SMA-Lager auch in einem dichteren Wirtgestein als Valanginien-Mergel gebaut werden; z.B. im Opalinuston. In diesem Falle wären aus den oben erwähnten Gründen die Gasbildung und der Gastransport durch die technischen und geologischen Barrieren speziell zu untersuchen. Falls gezeigt werden kann, dass die Gasbildung selbst im Opalinuston nicht zu einer Beeinträchtigung der Langzeit-Barrierenwirkung führt, so würde dies auch für Wirtgesteine mit einer im Vergleich zum Opalinuston etwas höheren Durchlässigkeit gelten.

Aus diesen Gründen hat die Nagra die Gasbildung in einem generischen SMA-Lager im Opalinuston detailliert untersucht (Nagra 2008h). Es konnte gezeigt werden, dass ein Teil des Gases durch das Wirtgestein und ein weiterer Teil durch den verfüllten und versiegelten Zugangs-

tunnel transportiert wird[62], so dass die maximalen Drücke in den SMA-Kavernen keine Werte erreichen, die zu einer Beeinträchtigung der Langzeit-Barrierenwirkung der technischen und geologischen Barrieren führen.

In Nagra (2008h) wurde gezeigt, dass die zu erwartenden gasinduzierten spezifischen Wasserflüsse in einem Bereich $\leq 10^{-11}$ m/s liegen. Wie Fig. A5.2-1 zeigt, würde selbst unter Annahme eines zeitlich konstanten Wasserflusses von 10^{-11} m/s das Schutzziel deutlich unterschritten (hydraulische Durchlässigkeit $K = 10^{-10}$ m/s, hydraulischer Gradient i = 0.1 m/m).

Aus all diesen Gründen werden zum Zweck der Ableitung von geologischen Standortgebieten keine Mindestanforderungen an das Wirtgestein bzgl. Gastransporteigenschaften gestellt; hingegen wird bei der Bewertung der Wirtgesteine berücksichtigt, inwiefern bauliche Massnahmen zur Ableitung der im Lager produzierten Gase entlang der Zugangsbauwerke notwendig sind (s. Tab. 5.4-1, S. 210).

4.6.5 Wärmeeintrag

Alle radioaktiven Abfälle generieren Wärme durch den radioaktiven Zerfall der darin enthaltenen Radionuklide. Die spezifische Wärmeleistung hängt ab von der betrachteten Abfallkategorie (Fig. 3.2-3b). Der Wärmeeintrag ins Barrierensystem kann grundsätzlich die folgenden Auswirkungen auf die Langzeitsicherheit haben:

- mögliche Beeinträchtigung der Barrierenwirkung der Nahfeld-Barrieren
- mögliche Beeinträchtigung der Barrierenwirkung des Wirtgesteins

Sowohl die internationalen als auch die eigenen Erfahrungen bei Sicherheits- und Systemanalysen für geologische Tiefenlager zeigen, dass speziell der Wärmeeintrag in die Bentonit-Barriere bei abgebrannten Brennelementen und bei verglasten hochaktiven Abfällen beachtet werden muss, damit die günstigen sicherheitstechnischen Eigenschaften des Bentonits (z.B. seine Quellfähigkeit) nicht signifikant beeinträchtigt werden. Je nach betrachtetem Wirtgestein gilt dies entsprechend, aber wegen der grösseren Distanz zur Wärmequelle in reduziertem Ausmass, auch für das Wirtgestein. Durch eine geeignete Wahl der Zeitdauer der Zwischenlagerung, der Beladung der Behälter und der Einlagerungsdichte kann sichergestellt werden, dass der Wärmeeintrag aus diesen Abfällen die sicherheitstechnischen Eigenschaften der Barrieren nicht signifikant beeinträchtigt. Diese Überlegungen fliessen ein in die Lagerauslegung (Nagra 2002c, Johnson et al. 2002).

4.7 Illustration der Wirksamkeit der Elemente des Barrierensystems

Zur Illustration der Wirksamkeit der Elemente des Barrierensystems wird im vorliegenden Kapitel ein generisches geologisches Tiefenlager für abgebrannte Brennelemente (BE), verglaste hochaktive Abfälle (HAA) und langlebige mittelaktive Abfälle (LMA) einerseits und für schwach- und mittelaktive Abfälle (SMA) andererseits betrachtet, wobei von der Referenz-Abfallzuteilung gemäss Kap. 3 und vom Szenario "50 Jahre Betrieb der bestehenden KKW" ausgegangen wird. Das Wirtgestein wird als homogen-porös angenommen, mit einer Transportpfadlänge von 40 m (wie im Projekt Entsorgungsnachweis, s. Nagra 2002c). Alle Berechnungen werden für zwei unterschiedliche hydraulische Situationen durchgeführt, um den Einfluss des Wasserflusses auf die Wirksamkeit der Elemente des Barrierensystems zu illustrieren: (1) Hydraulische Durchlässigkeit des Wirtgesteins: 10^{-13} m/s; hydraulischer Gra-

[62] Bei entsprechender Auslegung der Verfüllung und Versiegelung des Zugangstunnels.

dient: 1 m/m; Darcy-Fluss: 10^{-13} m/s und (2) hydraulische Durchlässigkeit des Wirtgesteins: 10^{-10} m/s; hydraulischer Gradient: 0.1 m/m; Darcy-Fluss: 10^{-11} m/s. Dabei werden zwei unterschiedliche Darstellungen verwendet: (i) Aufteilung der Radiotoxizität auf die verschiedenen Komponenten des Systems als Funktion der Zeit (Kap. 4.7.1) und (ii) Radionuklid-Transferraten zwischen Systemkomponenten (Kap. 4.7.2).

4.7.1 Aufteilung der Radiotoxizität auf die verschiedenen Komponenten des Systems als Funktion der Zeit

Fig. 4.7-1a zeigt die Aufteilung der Radiotoxizität (dargestellt als Radiotoxizitätsindex, RTI[63]) zu verschiedenen Zeiten auf die verschiedenen Komponenten des Systems (technische Barrieren, Wirtgestein) sowie das Gebiet ausserhalb des Wirtgesteins für abgebrannte Brennelemente für die hydraulische Situation (1) mit einem Darcy-Fluss von 10^{-13} m/s. Die Figur zeigt, dass der grösste Teil der Gesamt-Radiotoxizität, welche hauptsächlich von Actiniden stammt, während mehr als 10 Mio. Jahren fast vollständig in der Brennstoff-Matrix eingeschlossen bleibt. Ab etwa 200'000 Jahren ist die Gesamt-Radiotoxizität auf ein Niveau abgeklungen, welches einem natürlichen Uranerz-Vorkommen mit einem Volumen der Brennelement-Lagerstollen entspricht.

Nach dem Versagen der Behälter, welches hier nach einer Zeitdauer von 10'000 Jahren angenommen wurde, ist neben der Brennstoff-Matrix die Sorption am Bentonit der zweitwichtigste Beitrag zur Rückhaltung, der drittwichtigste Beitrag ist der langsame Transport im Wirtgestein, gefolgt von der begrenzten Löslichkeit wichtiger Radionuklide im Bentonit-Porenraum. Der maximale Anteil der Radiotoxizität, der sich zu einem bestimmten Zeitpunkt ausserhalb der technischen und geologischen Barrieren befindet, beträgt ca. 10^{-7} des Werts zum Zeitpunkt der Einlagerung der Abfälle; diese Radiotoxizität stammt hauptsächlich vom langlebigen ($T_{1/2}$ = 16 Mio. Jahre) und schwach sorbierenden (Annahme: K_d = 0 m^3/kg) Radionuklid ^{129}I.

Das Maximum der Radiotoxizität ausserhalb des Wirtgesteins tritt später auf als dasjenige der entsprechenden Dosiskurve (welches ebenfalls durch ^{129}I bestimmt wird und nach etwa 10^5 Jahren auftritt, s. Fig. 4.7-4a). Dies ist der Fall, weil die Radiotoxizitätsdarstellung auf der kumulativ aus dem Wirtgestein freigesetzten Aktivität beruht, wohingegen die Dosiskurven auf der Aktivität zu einer bestimmten Zeit an einem bestimmten Ort (dem betrachteten Biosphärengebiet) beruhen.

Methodik zur Quantifizierung der Beiträge der Elemente des Barrierensystems

Um die Beiträge der Elemente des Barrierensystems zu quantifizieren, wird die folgende Methodik angewendet:

(i) Zunächst wird der Gesamt-RTI zum Zeitpunkt der Einlagerung bestimmt.

(ii) Für den BE- resp. HAA-Behälter wird eine Einschlussdauer von 10'000 Jahren angenommen (wie im Projekt Entsorgungsnachweis, s. Nagra 2002c). Für das Ende dieses Zeitintervalls wird ebenfalls der Gesamt-RTI bestimmt.

---

[63] Der Radiotoxizitätsindex (RTI) ist hier in Analogie zur bisherigen Praxis (s. z.B. Nagra 2002c, Appendix 3) wie folgt definiert: $RTI(t) = \Sigma_j A_j(t)\, F_j/(10^{-4}\ Sv)$; wobei $A_j(t)$ die Aktivität [Bq] des Nuklids j zur Zeit t und F_j der Dosiskoeffizient [Sv/Bq] für Ingestion für Nuklid j ist.

(iii) Nun werden die RTI-Maxima[64] im Bentonit, im Wirtgestein und ausserhalb des Wirtgesteins bestimmt.

(iv) Der Quotient aus dem Gesamt-RTI zum Zeitpunkt der Einlagerung und den in den Schritten (ii) und (iii) gewonnenen RTI-Werten ist ein Mass für den (kumulativen) Beitrag der vorhergehenden Elemente des Barrierensystems zur Rückhaltung der Radiotoxizität.

Dies soll im Folgenden am Beispiel von abgebrannten Brennelementen (Fig. 4.7-1a) näher erläutert werden.

Gesamt-RTI zum Zeitpunkt der Einlagerung ("Referenz-RTI")

Der Gesamt-RTI zum Zeitpunkt der Einlagerung (Jahr 2050) beträgt 4.49×10^{15}.

Gesamt-RTI am Ende der Einschlussdauer des Behälters

Der langlebige Behälter gewährleistet einen anfänglichen vollständigen Einschluss. Bei einer Einschlussdauer von 10'000 Jahren nimmt die Radiotoxizität vom Beginn der Einlagerung bis zum Ende der Einschlussdauer im Behälter um einen Faktor von ca. 30 ab.

RTI-Maximum im Bentonit

Dank der Kombination von langlebigem Behälter und geochemisch stabiler Brennstoffmatrix tritt das Maximum der Radiotoxizität in der nachfolgenden Barriere, dem Bentonit, erst nach etwa 25'000 Jahren auf und beträgt lediglich noch 4.26×10^{11}. Im Vergleich zu einer hypothetischen Situation, in der zum Zeitpunkt der Einlagerung das gesamte Inventar ohne Behälter und ohne Brennstoffmatrix direkt in den Bentonit eingetragen würde, wird somit eine Verbesserung von einem Faktor $\sim 1 \times 10^4$ erreicht.

RTI-Maximum im Wirtgestein

Wird nun zusätzlich die Bentonit-Barriere berücksichtigt, ergibt sich eine Verbesserung um einen Faktor $\sim 2 \times 10^5$.

RTI-Maximum ausserhalb des Wirtgesteins

Eine zusätzliche Berücksichtigung der Wirtgesteinsbarriere ergibt gesamthaft eine Reduktion um einen Faktor $\sim 1 \times 10^7$. Dies illustriert eindrücklich die Wirksamkeit des gestaffelten Barrierensystems. Tab. 4.7-1 gibt eine Zusammenstellung der Resultate dieser Methodik für BE, HAA, LMA, SMA für alle betrachteten Fälle.

Diskussion der weiteren Figuren zur Illustration der Wirksamkeit des Barrierensystems anhand der Aufteilung der Radiotoxizität auf die verschiedenen Komponenten des Systems als Funktion der Zeit

Wird wieder für BE der Wasserfluss um zwei Grössenordnungen erhöht (Fig. 4.7-1b), so ändert sich das Gesamtbild qualitativ nicht wesentlich. Hingegen steigt der Anteil des Inventars ausserhalb des Wirtgesteins jetzt viel früher an; dies ist noch deutlicher ersichtlich in Fig. 4.7-4b, wo das Dosismaximum nun schon bei etwa 20'000 Jahren auftritt.

---

[64] Innerhalb eines Zeitraums von einer Million Jahren.

Fig. 4.7-2a zeigt für die verglasten hochaktiven Abfälle die Aufteilung der Radiotoxizität zu verschiedenen Zeiten auf die verschiedenen Komponenten des Systems und das Gebiet ausserhalb des Wirtgesteins. Die Figur zeigt, dass der grösste Teil der Gesamt-Radiotoxizität, welche hauptsächlich von den Aktiniden stammt, während mehr als 50'000 Jahren in der Glasmatrix eingeschlossen bleibt. Später dominieren die Anteile, die am Bentonit sorbieren oder im Bentonit-Porenraum ausgefällt werden, gefolgt vom Anteil im Wirtgestein. Für dieses Beispiel beträgt der maximale Anteil, der sich zu einem bestimmten Zeitpunkt ausserhalb der technischen und geologischen Barrieren befindet, etwa 10^{-9} des Werts zum Zeitpunkt der Einlagerung der Abfälle.

Wird der Wasserfluss um zwei Grössenordnungen erhöht (Fig. 4.7-2b), so ändert sich das Gesamtbild qualitativ nicht wesentlich. Der Anteil des Inventars, der gelöst im Bentonit vorkommt, ist jetzt etwas geringer; entsprechend ist der Anteil ausserhalb des Wirtgesteins jetzt etwas grösser.

Fig. 4.7-3a zeigt die entsprechende Darstellung für die LMA. Ein Vergleich der Figuren für BE/HAA einerseits und für LMA andererseits zeigt zwei wesentliche Unterschiede: (i) Bei den BE/HAA stellt der Endlagerbehälter einen absoluten Einschluss der Radionuklide während (mindestens) 10'000 Jahren sicher. In diesem Zeitintervall nimmt die Radiotoxizität der BE, der HAA und der LMA aufgrund des radioaktiven Zerfalls um mindestens eine Grössenordnung ab. Bei den LMA entfällt diese Barriere; trotzdem ist die relevante Grösse, nämlich die Radiotoxizität zum Zeitpunkt des Beginns der Freisetzung[65] für LMA deutlich geringer als bei den BE resp. vergleichbar mit den verglasten HAA. (ii) Bei den BE/HAA stellt die Brennstoff- resp. die Glasmatrix ebenfalls eine effiziente Barriere dar, während sie bei den LMA entfällt. Es gibt aber auch Gemeinsamkeiten zwischen den BE/HAA und den LMA. Auch bei den LMA wird ein grosser Teil der Radiotoxizität im Nahfeld sorbiert (hier: am Zement) resp. ausgefällt (hier: im Zementporenraum). Auch bei den LMA beträgt der maximale Anteil, der sich zu einem bestimmten Zeitpunkt ausserhalb der technischen und geologischen Barrieren befindet, nur einen Bruchteil (hier: weniger als 10^{-4}) des Werts zum Zeitpunkt der Einlagerung der Abfälle, und auch hier stammt die entsprechende Radiotoxizität hauptsächlich vom Radionuklid ^{129}I.

Wird der Wasserfluss um zwei Grössenordnungen erhöht (Fig. 4.7-3b), so ändert sich das Gesamtbild qualitativ nicht wesentlich. Wiederum wird hingegen ein deutlich früherer Anstieg des Anteils ausserhalb des Wirtgesteins beobachtet.

Fig. 4.7-4a und b zeigen die entsprechenden Dosiskurven für abgebrannte Brennelemente (oberste Figur), verglaste hochaktive Abfälle (mittlere Figur) und LMA (unterste Figur) für die zwei betrachteten hydraulischen Situationen. Im direkten Vergleich fällt auf, dass im Fall des 100-fach erhöhten Wasserflusses die Dosismaxima früher auftreten und höher liegen und dass bis auf eine Ausnahme die gleichen Nuklide die Hauptbeiträge zur Gesamtdosis leisten. Bei dieser Ausnahme handelt es sich um ^{108m}Ag aus den Abfallsorten RA-B-E2 und RA-G-E2 (stark aktivierte Teile von Reaktor-Steuerstäben und Messlanzen sowie sonstige stark aktivierte Kleinteile). Alle anderen Nuklide liegen unterhalb des dargestellten Dosisbereichs (d.h. unterhalb 10^{-9} mSv/a).

---

[65] BE/HAA: 10'000 Jahre; LMA: 100 Jahre nach Ende der Einlagerung der Abfälle. Die Zeitdauer von 100 Jahren für den Beginn der Freisetzung bei den LMA wurde aufgrund von Betrachtungen zur Wiederaufsättigung veranschlagt, analog zu Nagra (2002d).

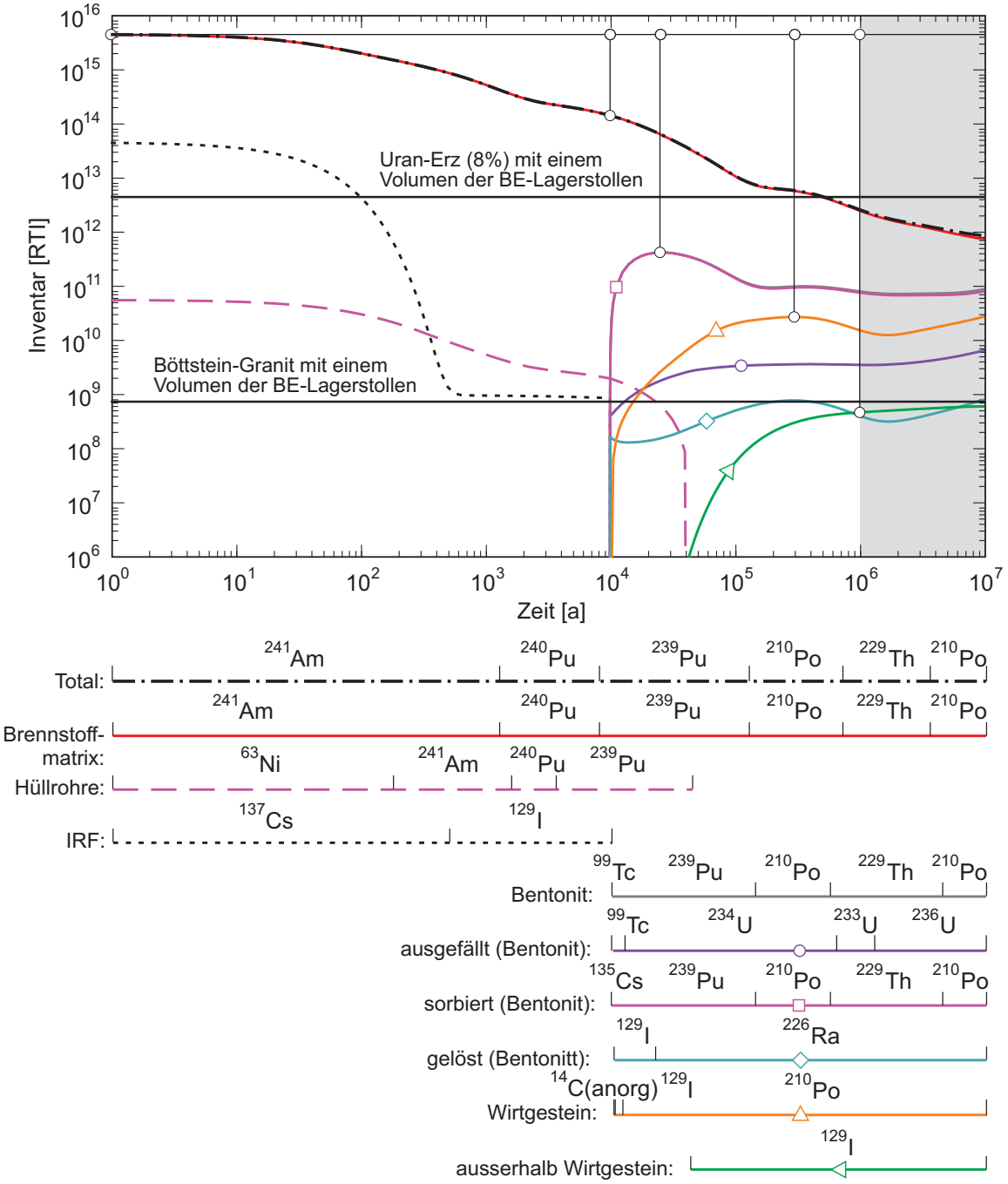


Fig. 4.7-1a: Entwicklung und Aufteilung der Radiotoxizität für abgebrannte Brennelemente auf die verschiedenen Komponenten des Nahfelds, das Wirtgestein und das Gebiet ausserhalb des Wirtgesteins für K = 10^{-13} m/s.

Die Balken unter der Figur zeigen auf, welche Radionuklide zu welchen Zeiten in welchen Komponenten des Systems hauptsächlich zur Radiotoxizität beitragen (IRF: *instant release fraction*).

Inventar: Nagra (2007); hydraulische Durchlässigkeit Wirtgestein: 10^{-13} m/s;
Gradient: 1 m/m; Transportpfadlänge: 40 m; Sorption: Tonstein.

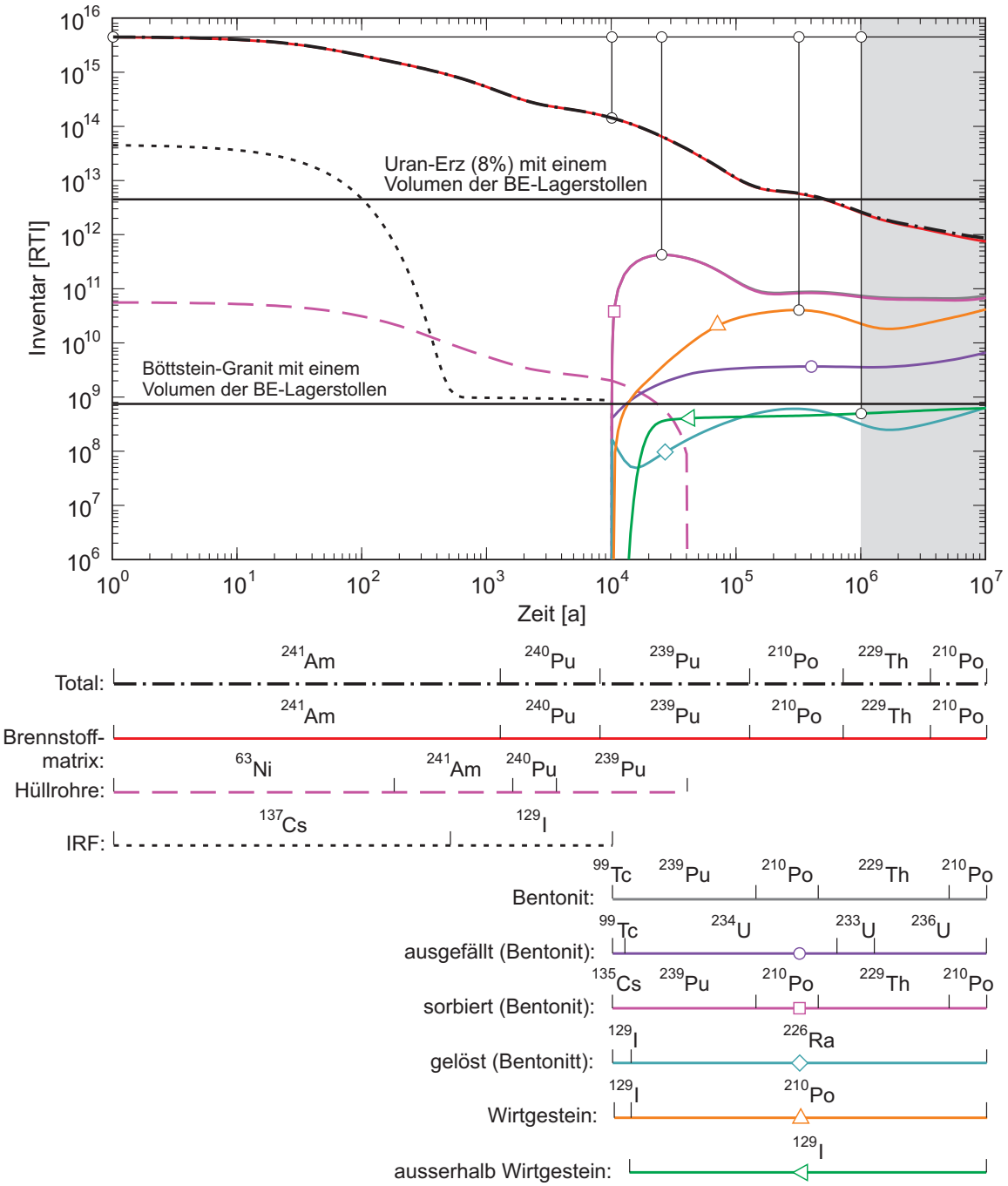


Fig. 4.7-1b: Entwicklung und Aufteilung der Radiotoxizität für abgebrannte Brennelemente auf die verschiedenen Komponenten des Nahfelds, das Wirtgestein und das Gebiet ausserhalb des Wirtgesteins für K = 10^{-10} m/s.

Die Balken unter der Figur zeigen auf, welche Radionuklide zu welchen Zeiten in welchen Komponenten des Systems hauptsächlich zur Radiotoxizität beitragen (IRF: *instant release fraction*).

Inventar: Nagra (2007); hydraulische Durchlässigkeit Wirtgestein: 10^{-10} m/s;
Gradient: 0.1 m/m; Transportpfadlänge: 40 m; Sorption: Tonstein.

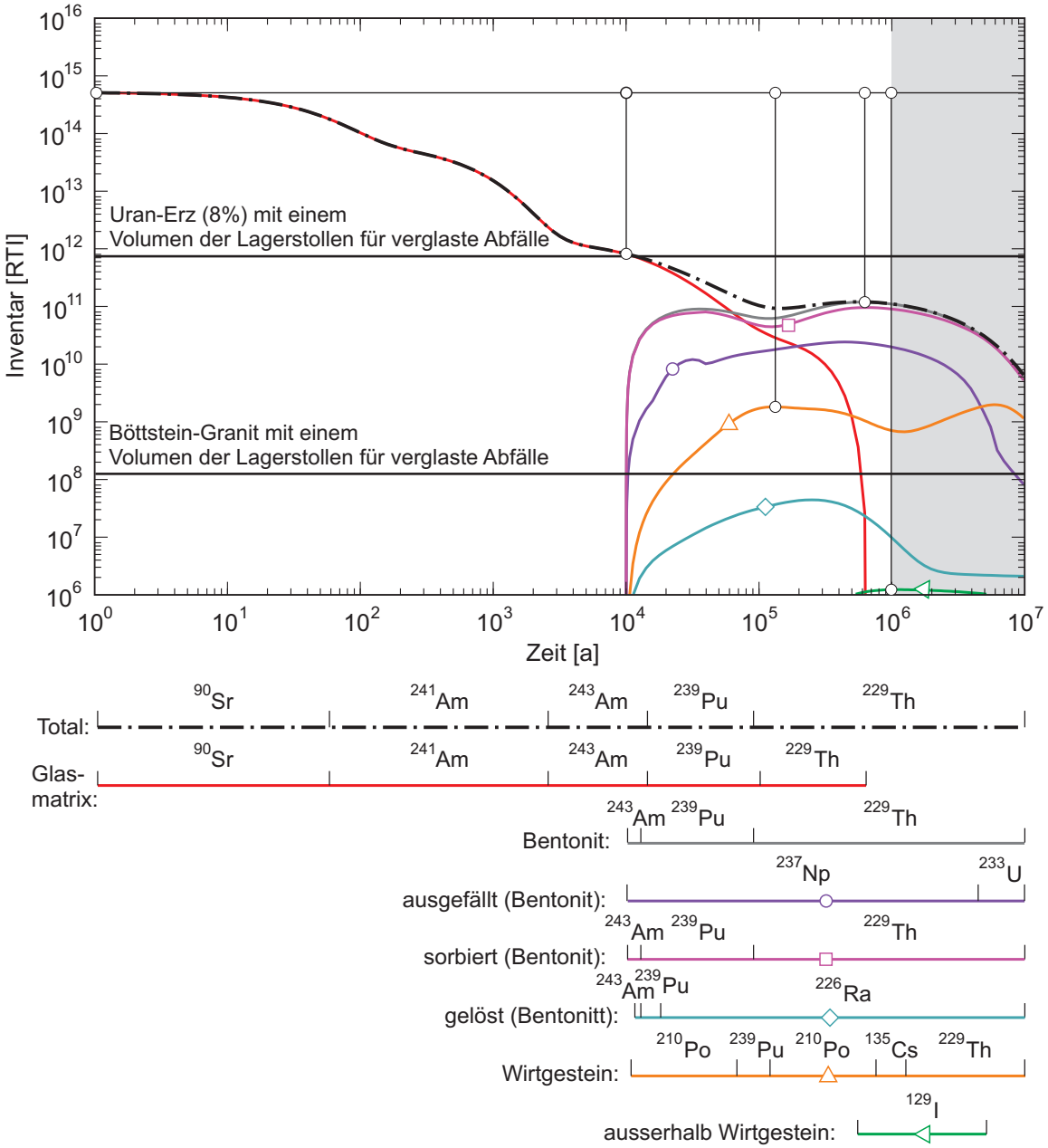


Fig. 4.7-2a: Entwicklung und Aufteilung der Radiotoxizität für verglaste hochaktive Abfälle auf die verschiedenen Komponenten des Nahfelds, das Wirtgestein und das Gebiet ausserhalb des Wirtgesteins für K = 10^{-13} m/s.

Die Balken unter der Figur zeigen auf, welche Radionuklide zu welchen Zeiten in welchen Komponenten des Systems hauptsächlich zur Radiotoxizität beitragen.

Inventar: Nagra (2007); hydraulische Durchlässigkeit Wirtgestein: 10^{-13} m/s;
Gradient: 1 m/m; Transportpfadlänge: 40 m; Sorption: Tonstein.

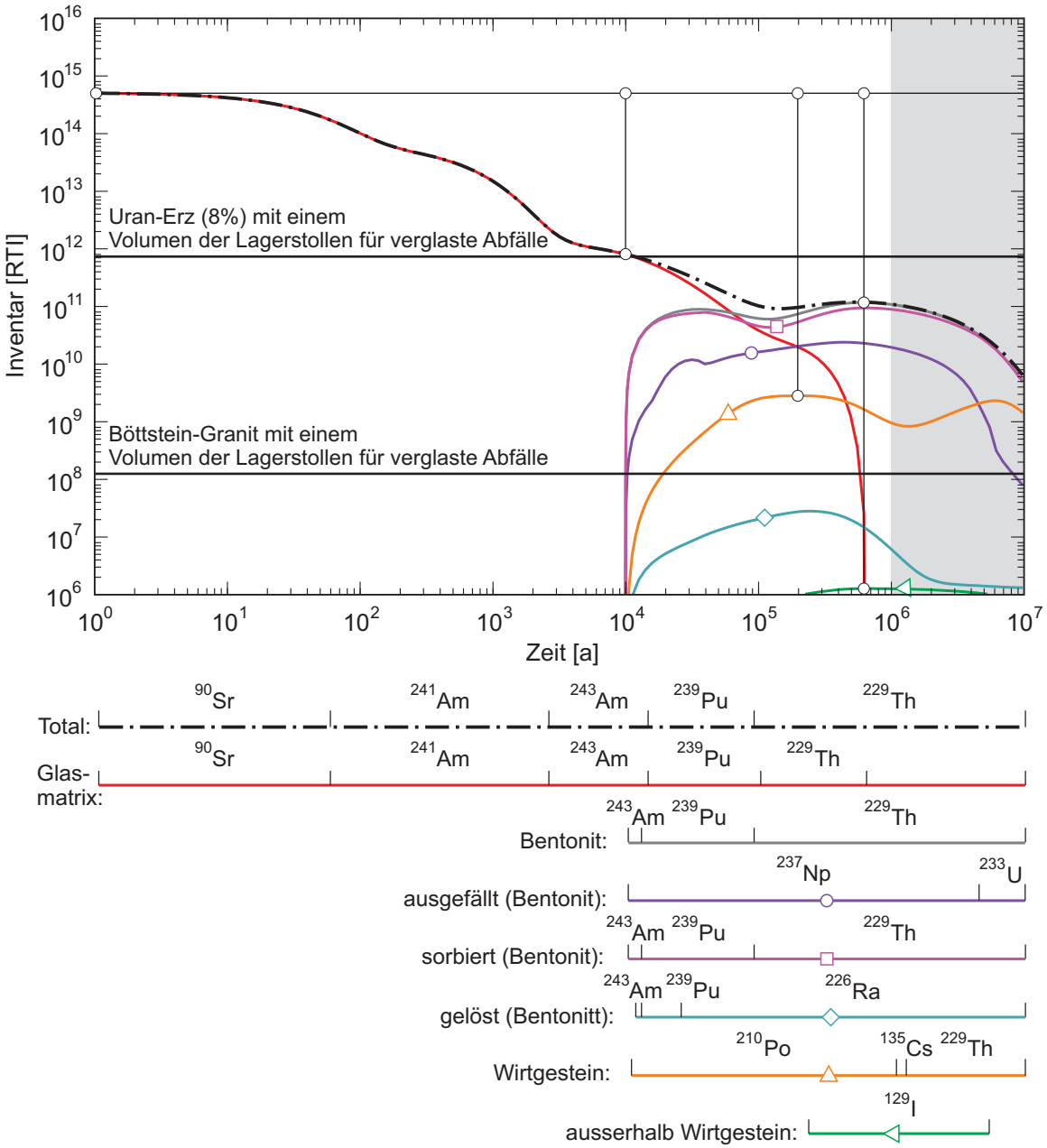


Fig. 4.7-2b: Entwicklung und Aufteilung der Radiotoxizität für verglaste hochaktive Abfälle auf die verschiedenen Komponenten des Nahfelds, das Wirtgestein und das Gebiet ausserhalb des Wirtgesteins für K = 10^{-10} m/s.

Die Balken unter der Figur zeigen auf, welche Radionuklide zu welchen Zeiten in welchen Komponenten des Systems hauptsächlich zur Radiotoxizität beitragen.

Inventar: Nagra (2007); hydraulische Durchlässigkeit Wirtgestein: 10^{-10} m/s;
Gradient: 0.1 m/m; Transportpfadlänge: 40 m; Sorption: Tonstein.

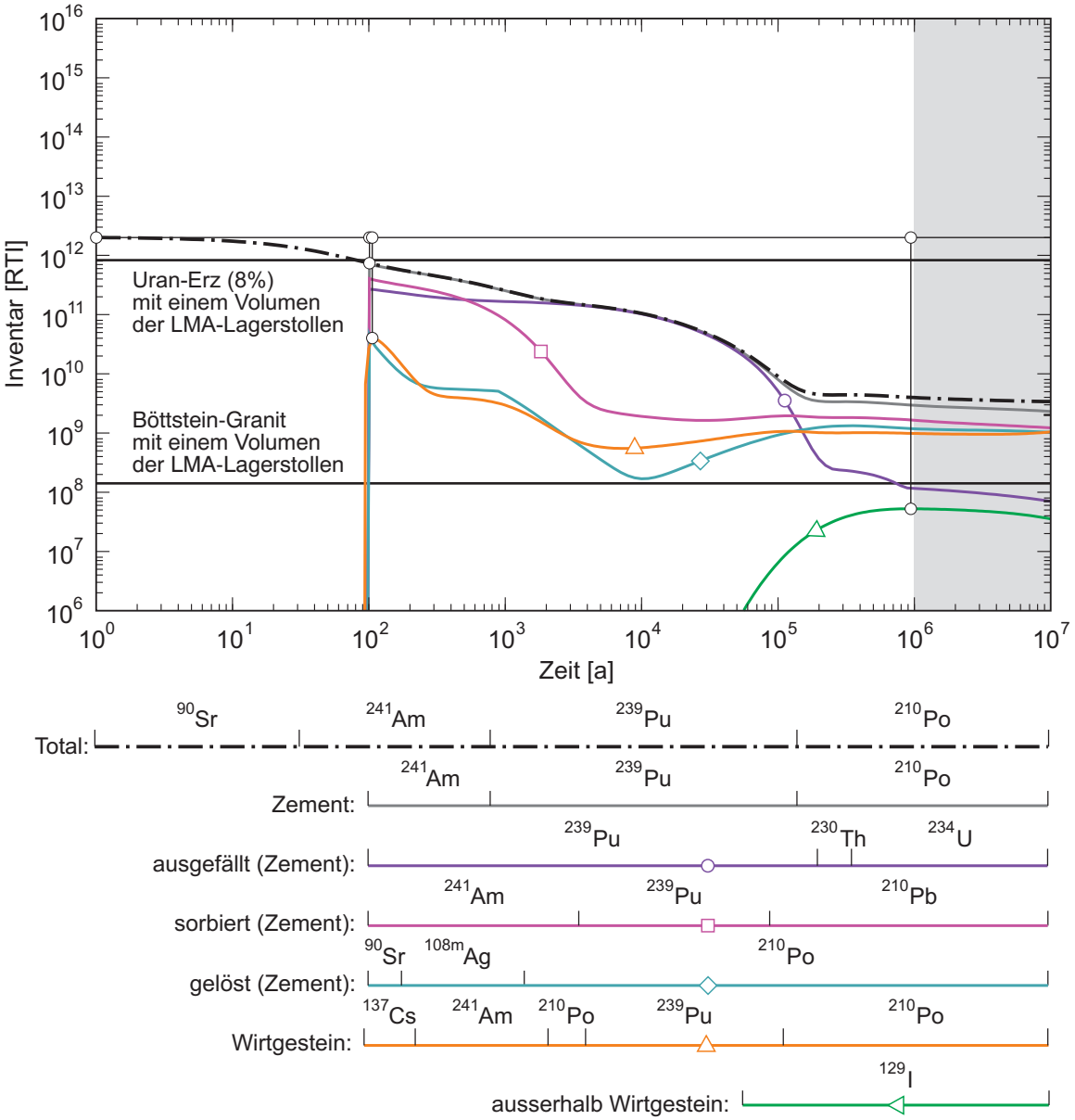


Fig. 4.7-3a: Entwicklung und Aufteilung der Radiotoxizität für langlebige mittelaktive Abfälle auf die verschiedenen Komponenten des Nahfelds, das Wirtgestein und das Gebiet ausserhalb des Wirtgesteins für $K = 10^{-13}$ m/s.

Die Balken unter der Figur zeigen auf, welche Radionuklide zu welchen Zeiten in welchen Komponenten des Systems hauptsächlich zur Radiotoxizität beitragen.

Inventar: LMA (Referenzzuteilung); hydraulische Durchlässigkeit Wirtgestein: 10^{-13} m/s; Gradient: 1 m/m; Transportpfadlänge: 40 m; Sorption: Tonstein.

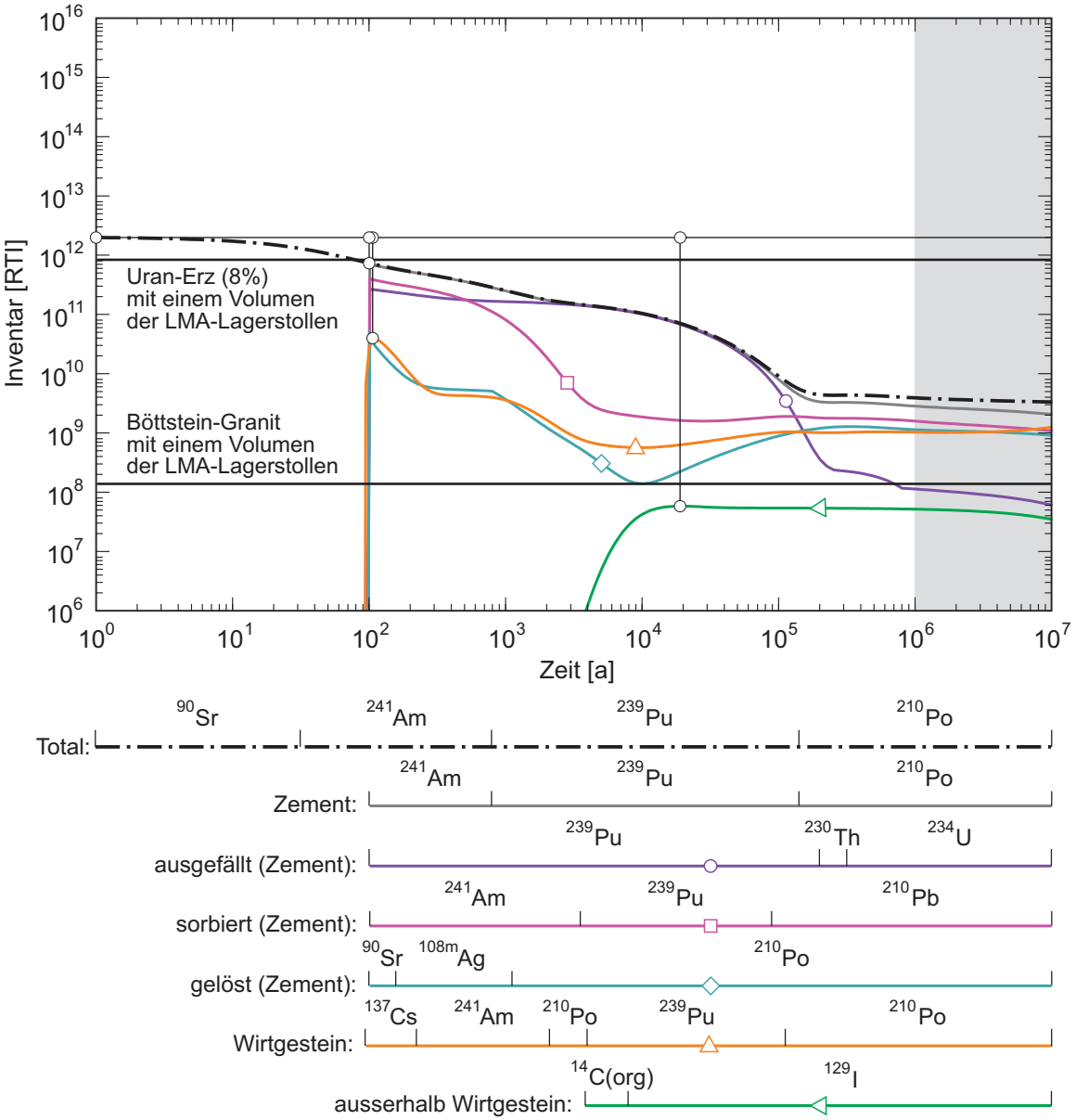


Fig. 4.7-3b: Entwicklung und Aufteilung der Radiotoxizität für langlebige mittelaktive Abfälle auf die verschiedenen Komponenten des Nahfelds, das Wirtgestein und das Gebiet ausserhalb des Wirtgesteins für K = 10^{-10} m/s.

Die Balken unter der Figur zeigen auf, welche Radionuklide zu welchen Zeiten in welchen Komponenten des Systems hauptsächlich zur Radiotoxizität beitragen.

Inventar: LMA (Referenzzuteilung); hydraulische Durchlässigkeit Wirtgestein: 10^{-10} m/s; Gradient: 0.1 m/m; Transportpfadlänge: 40 m; Sorption: Tonstein.

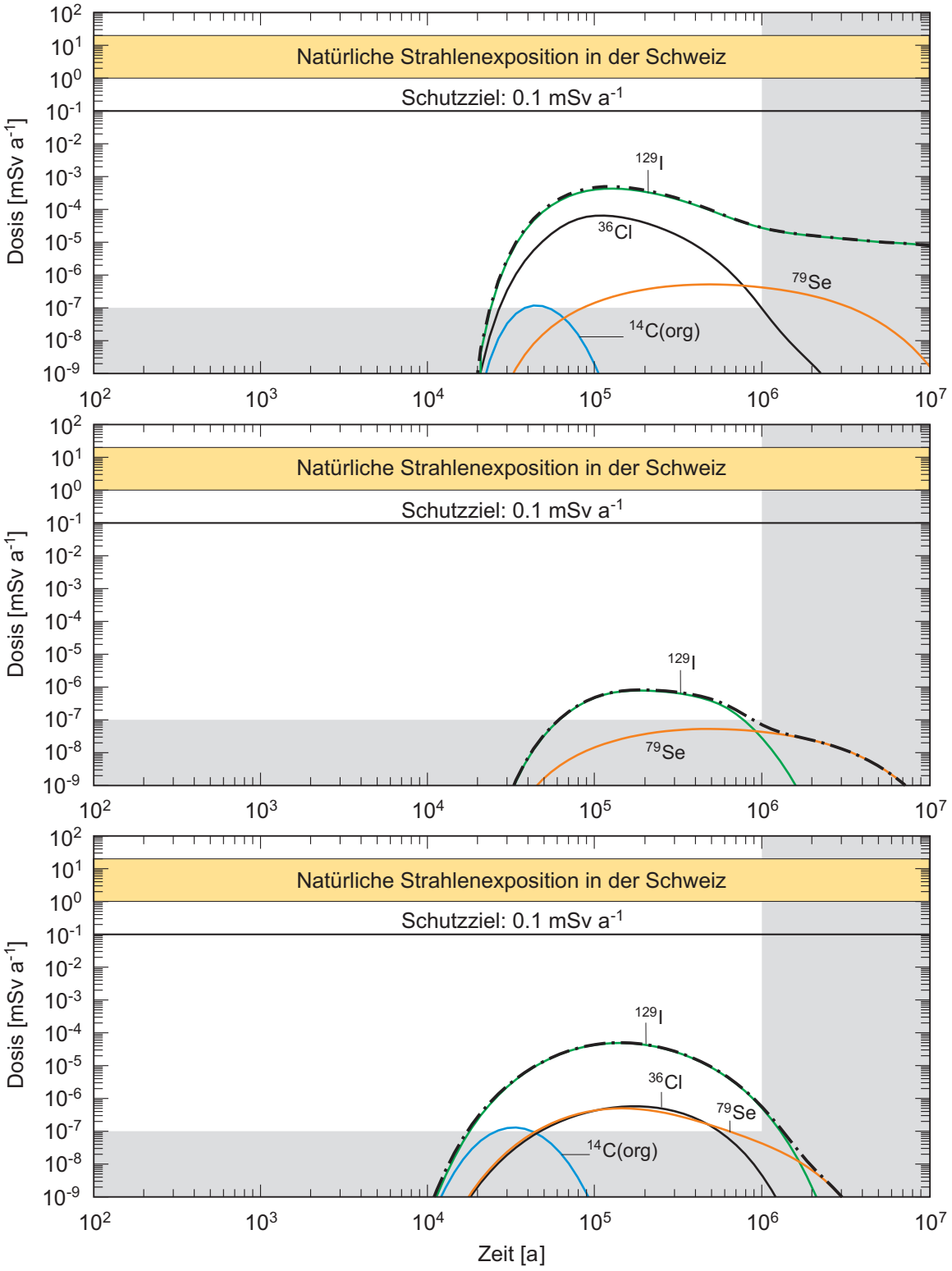


Fig. 4.7-4a: Berechnete Dosen für ein HAA-Lager in einem homogen-porösen Wirtgestein für $K = 10^{-13}$ m/s.

Oberste Figur: Abgebrannte Brennelemente; mittlere Figur: verglaste hochaktive Abfälle; unterste Figur: langlebige mittelaktive Abfälle (Referenzzuteilung).

Hydraulische Durchlässigkeit Wirtgestein: 10^{-13} m/s; Gradient: 1 m/m; Transportpfadlänge: 40 m; Sorption: Tonstein.

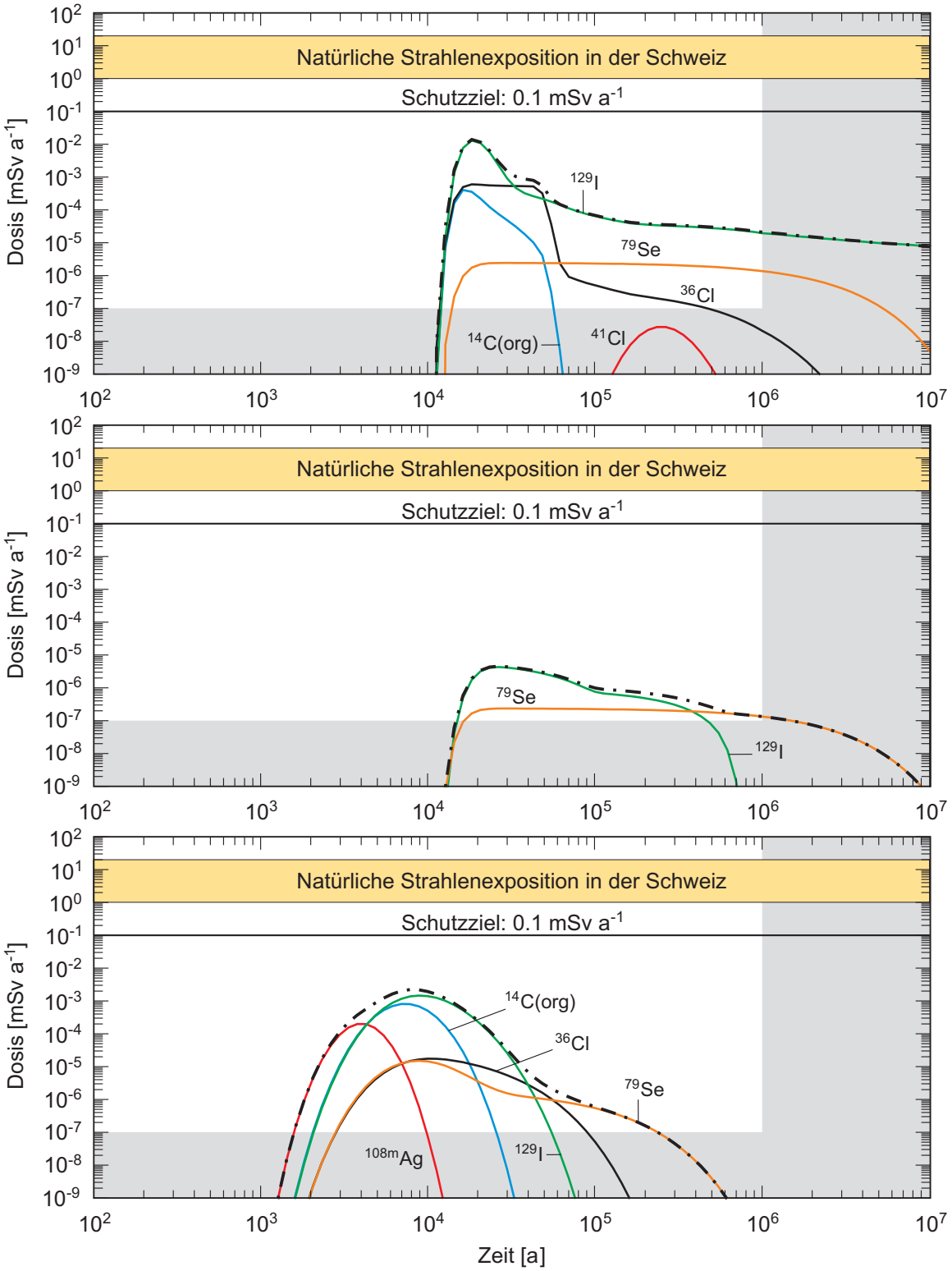


Fig. 4.7-4b: Berechnete Dosen für ein HAA-Lager in einem homogen-porösen Wirtgestein für $K = 10^{-10}$ m/s.

Oberste Figur: Abgebrannte Brennelemente; mittlere Figur: verglaste hochaktive Abfälle; unterste Figur: langlebige mittelaktive Abfälle (Referenzzuteilung).

Hydraulische Durchlässigkeit Wirtgestein: 10^{-10} m/s; Gradient: 0.1 m/m; Transportpfadlänge: 40 m; Sorption: Tonstein.

Fig. 4.7-5a zeigt die Aufteilung der Radiotoxizität zu verschiedenen Zeiten auf die verschiedenen Komponenten des Systems (technische Barrieren, Wirtgestein) sowie das Gebiet ausserhalb des Wirtgesteins für das SMA-Lager. Während mehr als 100'000 Jahren ist der Hauptanteil der Radiotoxizität sorbiert an Zement im Nahfeld. Ein weiterer wichtiger Anteil ist derjenige der im Zementporenwasser gelösten Radionuklide, gefolgt von demjenigen im Wirtgestein. In diesem Beispiel wird weniger als 10^{-5} der ursprünglichen Radiotoxizität aus den technischen und geologischen Barrieren freigesetzt.

Wird der Wasserfluss um zwei Grössenordnungen erhöht (Fig. 4.7-5b), so ändert sich das Gesamtbild qualitativ nicht wesentlich. Wiederum wird hingegen ein deutlich früherer Anstieg des Anteils ausserhalb des Wirtgesteins beobachtet.

Fig. 4.7-6a und b zeigen die entsprechenden Dosiskurven für SMA. Wiederum treten die Dosismaxima früher auf und liegen höher im Fall mit dem 100-fach erhöhten Wasserfluss. In Fig. 4.7-6b treten zwei zusätzliche Nuklide auf im Vergleich mit Fig. 4.7-6a: ^{108m}Ag und ^{40}K. Alle anderen Nuklide liegen unterhalb des dargestellten Dosisbereichs (d.h. unterhalb 10^{-9} mSv/a).

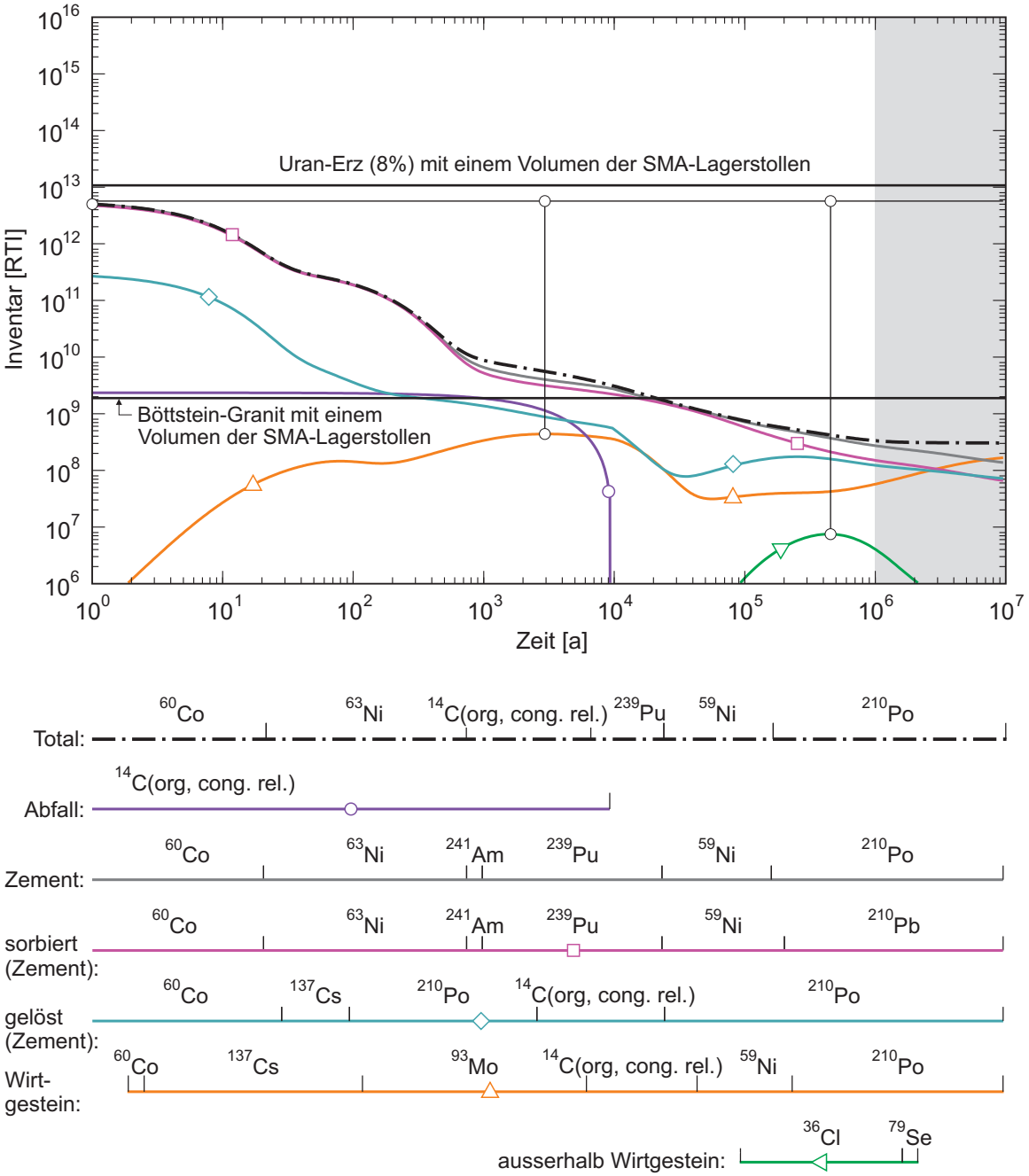


Fig. 4.7-5a: Entwicklung und Aufteilung der Radiotoxizität für ein SMA-Lager für $K = 10^{-13}$ m/s.

Die Balken unter der Figur zeigen auf, welche Radionuklide zu welchen Zeiten in welchen Komponenten des Systems hauptsächlich zur Radiotoxizität beitragen.

Inventar: SMA (Referenzzuteilung); Wirtgestein: Homogen-porös; hydraulische Durchlässigkeit: 10^{-13} m/s; Gradient: 1 m/m; Transportpfadlänge: 40 m; Sorption: Tonstein.

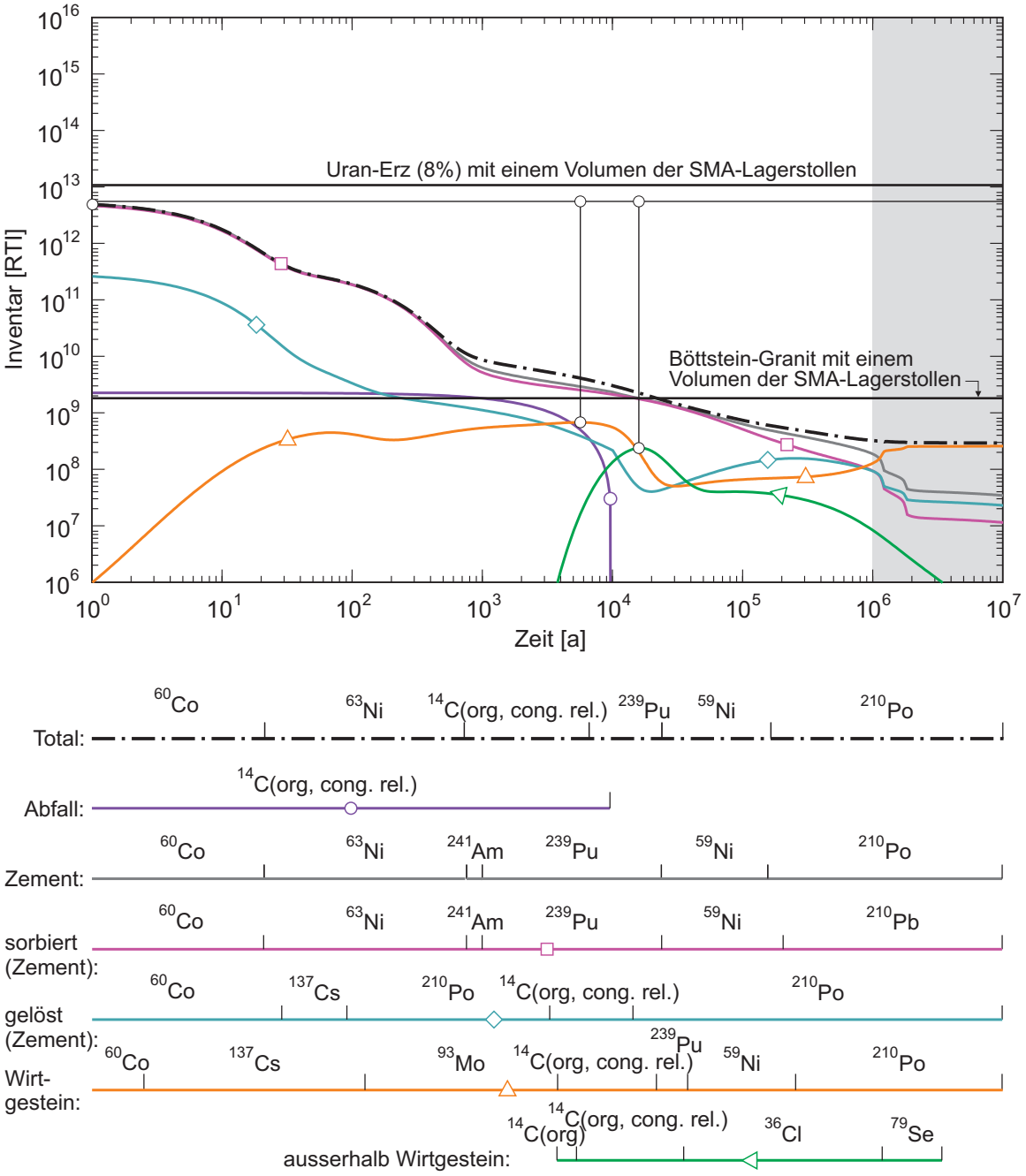


Fig. 4.7-5b: Entwicklung und Aufteilung der Radiotoxizität für ein SMA-Lager für $K = 10^{-10}$ m/s.

Die Balken unter der Figur zeigen auf, welche Radionuklide zu welchen Zeiten in welchen Komponenten des Systems hauptsächlich zur Radiotoxizität beitragen.

Inventar: SMA (Referenzzuteilung); Wirtgestein: Homogen-porös; hydraulische Durchlässigkeit: 10^{-10} m/s; Gradient: 0.1 m/m; Transportpfadlänge: 40 m; Sorption: Tonstein.

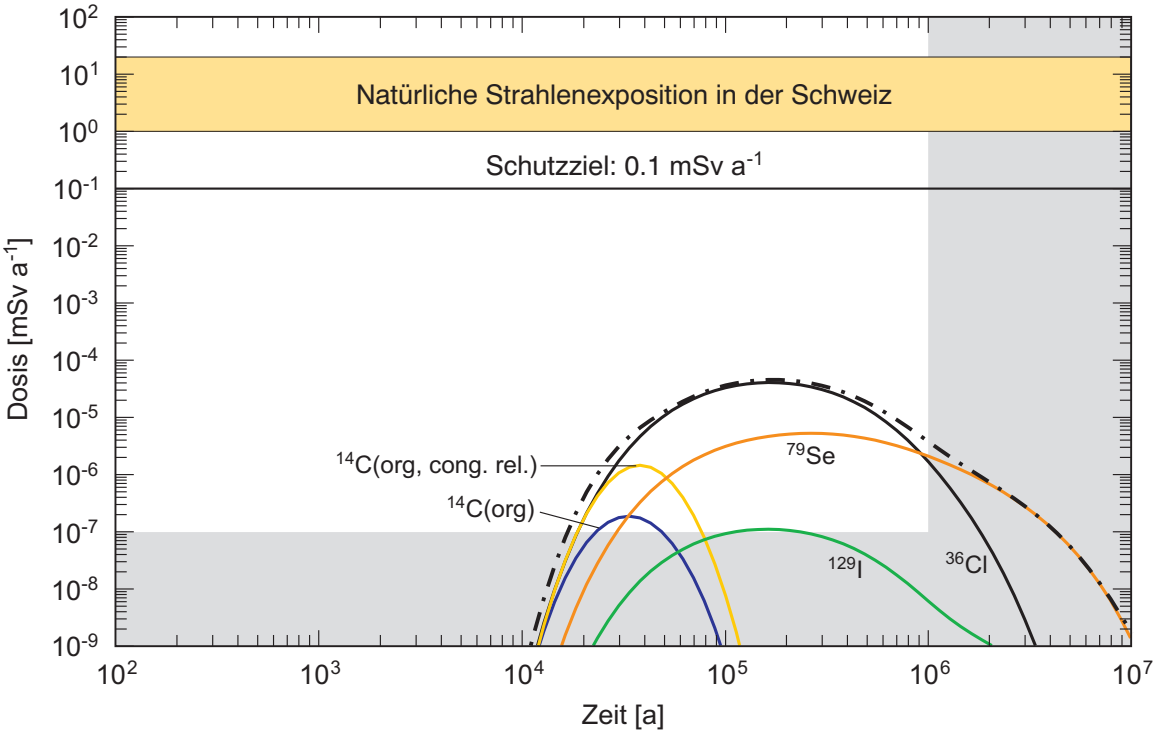


Fig. 4.7-6a: Berechnete Dosen für ein SMA-Lager in einem homogen-porösen Wirtgestein für $K = 10^{-13}$ m/s.

Inventar: SMA (Referenzzuteilung); Wirtgestein: Homogen-porös; hydraulische Durchlässigkeit: 10^{-13} m/s; Gradient: 1 m/m; Transportpfadlänge: 40 m; Sorption: Tonstein.

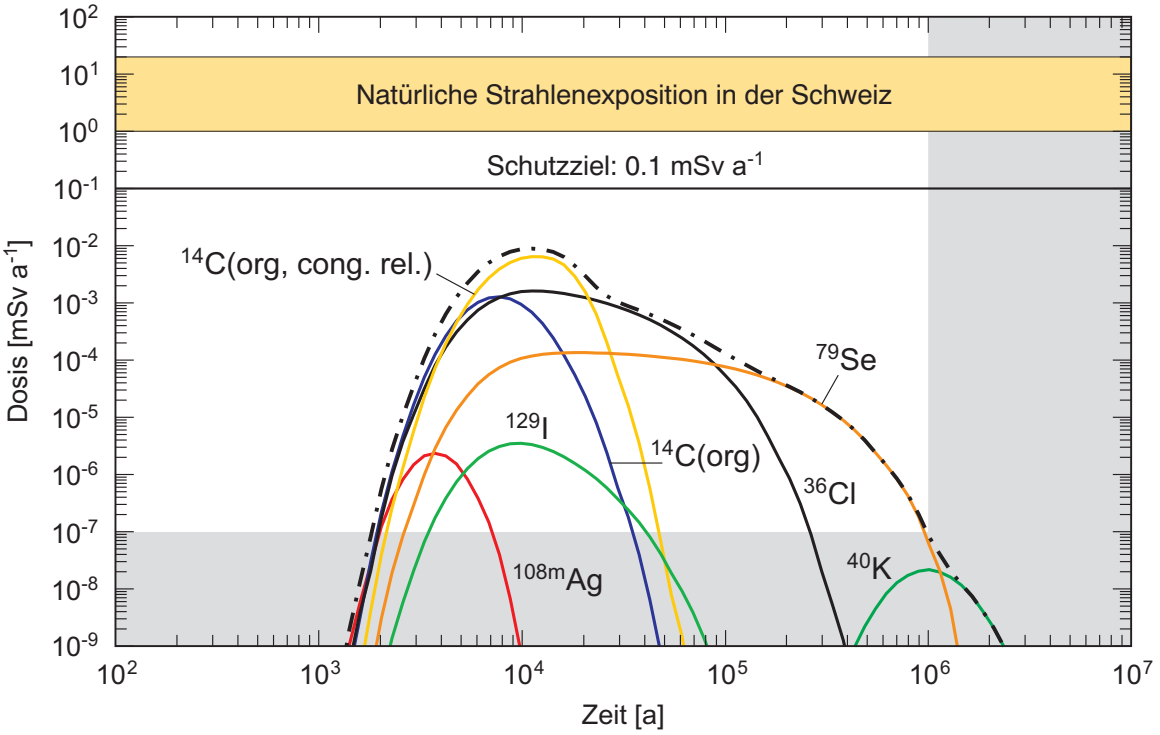


Fig. 4.7-6b: Berechnete Dosen für ein SMA-Lager in einem homogen-porösen Wirtgestein für $K = 10^{-10}$ m/s.

Inventar: SMA (Referenzzuteilung); Wirtgestein: Homogen-porös; hydraulische Durchlässigkeit: 10^{-10} m/s; Gradient: 0.1 m/m; Transportpfadlänge: 40 m; Sorption: Tonstein.

Tab. 4.7-1: Quantifizierung der Wirksamkeit der Elemente des Barrierensystems anhand der Entwicklung und Aufteilung der Radiotoxizität auf die verschiedenen Komponenten des Nahfelds, das Wirtgestein und das Gebiet ausserhalb des Wirtgesteins.

Es werden jeweils zwei hydraulische Situationen betrachtet:

(1): Hydraulische Durchlässigkeit $K = 10^{-13}$ m/s, hydraulischer Gradient i = 1 m/m; dies ergibt einen Darcy-Fluss von $q = 10^{-13}$ m/s.

(2): Hydraulische Durchlässigkeit $K = 10^{-10}$ m/s, hydraulischer Gradient i = 0.1 m/m; dies ergibt einen Darcy-Fluss von $q = 10^{-11}$ m/s.

Rechenfall	**Fig.**	**Komponente**	**RTI**	**Zeit** [a]	**Wirksame Barrieren**	**Δ%**	**Faktor**
BE **q = 1E-13 m/s**	4.7-1a	Behälter	4.49E+15	1.00E+00	keine	0.0000	1.00E+00
		Matrix	1.43E+14	1.00E+04	Behälter	96.8056	3.13E+01
		Bentonit	4.26E+11	2.51E+04	Behälter + Matrix	99.9905	1.05E+04
		WG	2.73E+10	2.99E+05	Behälter + Matrix + Bentonit	99.9994	1.64E+05
		ausserhalb WG	4.72E+08	1.00E+06	Behälter + Matrix + Bentonit + WG	100.0000	9.51E+06
BE **q = 1E-11 m/s**	4.7-1b	Behälter	4.49E+15	1.00E+00	keine	0.0000	1.00E+00
		Matrix	1.43E+14	1.00E+04	Behälter	96.8056	3.13E+01
		Bentonit	4.24E+11	2.51E+04	Behälter + Matrix	99.9905	1.06E+04
		WG	4.03E+10	3.16E+05	Behälter + Matrix + Bentonit	99.9991	1.11E+05
		ausserhalb WG	4.94E+08	1.00E+06	Behälter + Matrix + Bentonit + WG	100.0000	9.08E+06
HAA **q=1E-13 m/s**	4.7-2a	Behälter	5.20E+14	1.00E+00	keine	0.0000	1.00E+00
		Matrix	8.21E+11	1.00E+04	Behälter	99.8421	6.33E+02
		Bentonit	1.19E+11	6.31E+05	Behälter + Matrix	99.9771	4.37E+03
		WG	1.79E+09	1.33E+05	Behälter + Matrix + Bentonit	99.9997	2.90E+05
		ausserhalb WG	1.19E+06	1.00E+06	Behälter + Matrix + Bentonit + WG	100.0000	4.38E+08
HAA **q = 1E-11 m/s**	4.7-2b	Behälter	5.20E+14	1.00E+00	keine	0.0000	1.00E+00
		Matrix	8.21E+11	1.00E+04	Behälter	99.8421	6.33E+02
		Bentonit	1.18E+11	6.31E+05	Behälter + Matrix	99.9772	4.39E+03
		WG	2.81E+09	2.00E+05	Behälter + Matrix + Bentonit	99.9995	1.85E+05
		ausserhalb WG	1.24E+06	6.31E+05	Behälter + Matrix + Bentonit + WG	100.0000	4.19E+08

Tab. 4.7-1: (Fortsetzung)

Rechenfall	**Fig.**	**Komponente**	**RTI**	**Zeit** [a]	**Wirksame Barrieren**	**Δ%**	**Faktor**
LMA q = 1E-13 m/s	4.7-3a	Zement	1.98E+12	1.00E+00	keine	0.0000	1.00E+00
		WG	3.97E+10	1.06E+02	Zement	97.9929	4.98E+01
		ausserhalb WG	5.17E+07	9.44E+05	Zement + WG	99.9974	3.83E+04
LMA q = 1E-11 m/s	4.7-3b	Zement	1.98E+12	1.00E+00	keine	0.0000	1.00E+00
		WG	3.99E+10	1.06E+02	Zement	97.9874	4.97E+01
		ausserhalb WG	5.86E+07	1.88E+04	Zement + WG	99.9970	3.38E+04
SMA q = 1E-13 m/s	4.7-5a	Zement	5.65E+12	1.00E+00	keine	0.0000	1.00E+00
		WG	4.29E+08	3.02E+03	Zement	99.9924	1.32E+04
		ausserhalb WG	7.24E+06	4.73E+05	Zement + WG	99.9999	7.80E+05
SMA q = 1E-11 m/s	4.7-5b	Zement	5.65E+12	1.00E+00	keine	0.0000	1.00E+00
		WG	6.90E+08	5.62E+03	Zement	99.9878	8.19E+03
		ausserhalb WG	2.42E+08	1.59E+04	Zement + WG	99.9957	2.33E+04

4.7.2 Radionuklid-Transferraten zwischen Systemkomponenten

Fig. 4.7-7a und b zeigen die Radionuklid-Transferraten für abgebrannte Brennelemente zwischen dem Behälter und dem Bentonit (oberste Figur), zwischen dem Bentonit und dem Wirtgestein (mittlere Figur) und aus dem Wirtgestein in die Biosphäre (unterste Figur) für die hydraulische Situationen 1 ($K = 10^{-13}$ m/s, i = 1 m/m, $q = 10^{-13}$ m/s) und 2 ($K = 10^{-10}$ m/s, i = 0.1 m/m, $q = 10^{-11}$ m/s). Für beide Situationen zeigt ein Vergleich der drei Teilfiguren die Wirksamkeit der Bentonit-Barriere und der Wirtgesteinsbarriere. Die Transferraten sind angegeben als hypothetische Dosis, wobei zu deren Berechnung die Referenzfall-BTKs verwendet wurden (s. Kap. 2.5.5). Es fällt auf, dass insbesondere die Wirtgesteinsbarriere (Vergleich mittlere Figur – untere Figur) sehr effizient ist: von allen betrachteten Nukliden führen nur die langlebigen und/oder schwach sorbierenden Nuklide ^{14}C (org), ^{36}Cl, ^{79}Se und ^{129}I zu Dosiswerten in der Biosphäre, die über der unteren Darstellungsgrenze von 10^{-9} mSv/a liegen.

Fig. 4.7-8a und b zeigen die entsprechenden Darstellungen für verglaste hochaktive Abfälle. Qualitativ ergibt sich ein ähnliches Bild wie bei den abgebrannten Brennelementen.

Fig. 4.7-9a und b und Fig. 4.7-10a und b zeigen die entsprechenden Darstellungen für LMA und SMA. Auch für LMA und SMA ist das Wirtgestein eine wirksame Barriere, wobei hier die Wirksamkeit beim höheren Wasserfluss deutlich reduziert ist.

Quantifizierung der Abschwächung der Radionuklidfreisetzung beim Transport durch die Elemente des Barrierensystems

In Tab. 4.7-2a und b wird die in Fig. 4.7-7a und b bis Fig. 4.7-10a und b gezeigte Abschwächung der Radionuklidfreisetzung beim Transport durch die Elemente des Barrierensystems quantifiziert. Generell kann festgestellt werden, dass der Einfluss des Wasserflusses auf die Freisetzung von "Innen" nach "Aussen" zunimmt: Bei der Freisetzung in den Bentonit ist weder

bei den abgebrannten Brennelementen noch bei den verglasten HAA ein Unterschied feststellbar; bei der Freisetzung ins Wirtgestein sind die Unterschiede schon etwas ausgeprägter (ca. ein Faktor 1 bis 5); und bei der Freisetzung in die Biosphäre sind die Unterschiede beträchtlich (ca. ein Faktor 5 bis 200). Ausser bei den SMA im Fall des erhöhten Wasserflusses beträgt aber die Abschwächung in der Wirtgesteinsbarriere in jedem Fall mehr als einen Faktor 100.

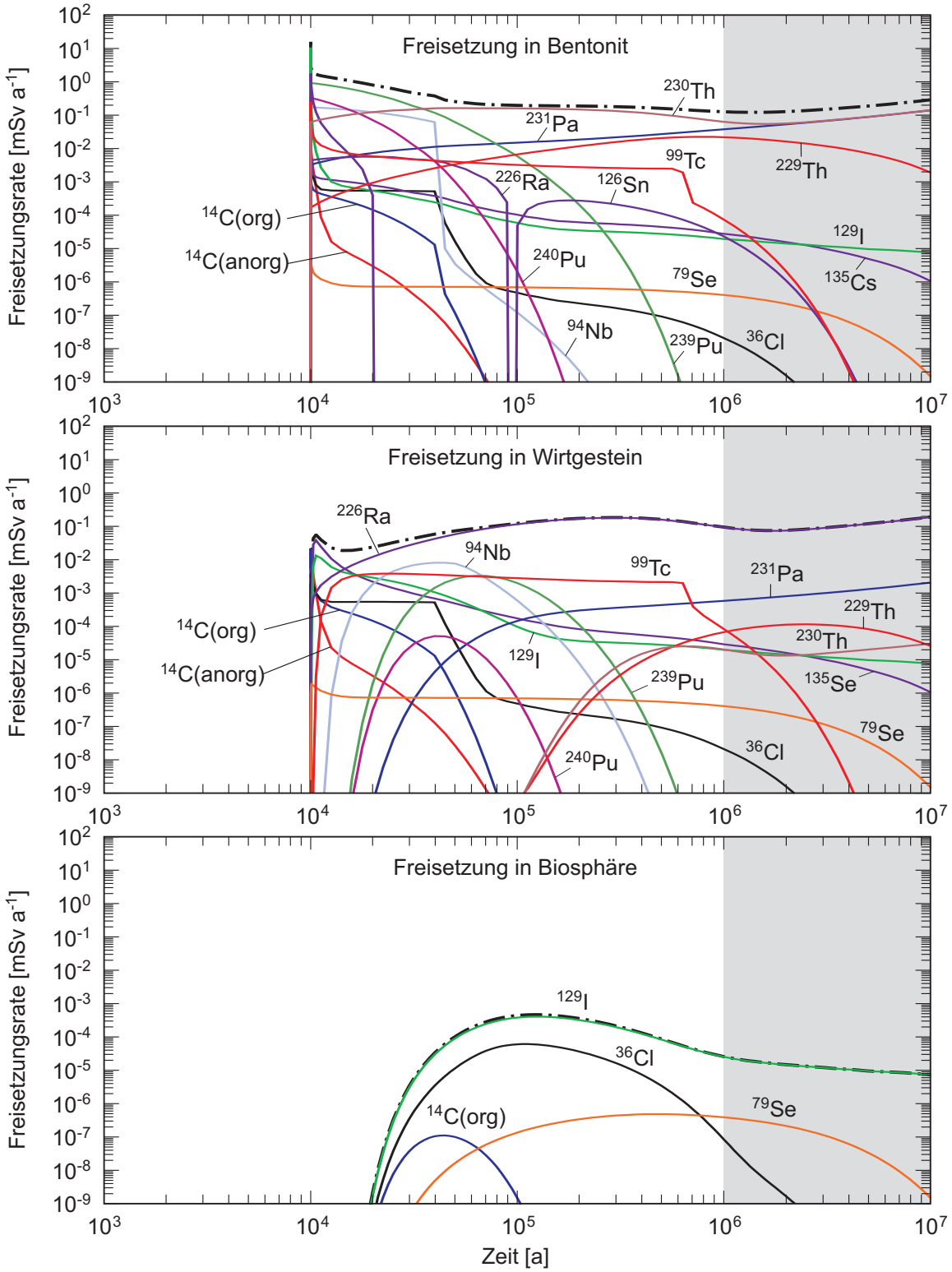


Fig. 4.7-7a: Radionuklid-Transferraten für abgebrannte Brennelemente für K = 10^{-13} m/s.

Obere Figur: Freisetzung in den Bentonit; mittlere Figur: Freisetzung aus dem Bentonit ins Wirtgestein; untere Figur: Freisetzung aus dem Wirtgestein in die Biosphäre, dargestellt als hypothetische Dosis.

Inventar: Nagra (2007); Wirtgestein: Homogen-porös; hydraulische Durchlässigkeit: 10^{-13} m/s; Gradient: 1 m/m; Transportpfadlänge: 40 m; Sorption: Tonstein.

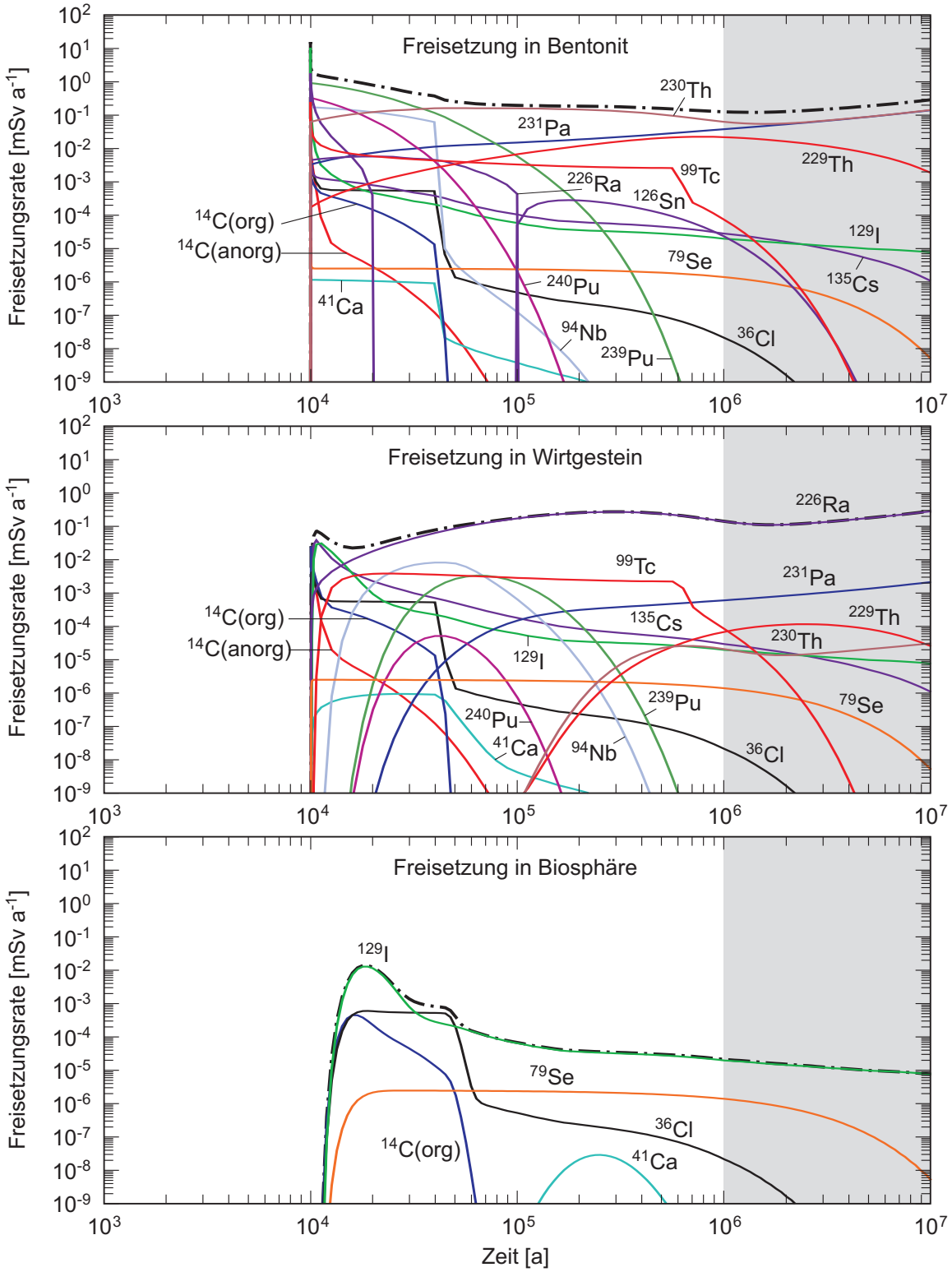


Fig. 4.7-7b: Radionuklid-Transferraten für abgebrannte Brennelemente für K = 10^{-10} m/s.

Obere Figur: Freisetzung in den Bentonit; mittlere Figur: Freisetzung aus dem Bentonit ins Wirtgestein; untere Figur: Freisetzung aus dem Wirtgestein in die Biosphäre, dargestellt als hypothetische Dosis.

Inventar: Nagra (2007); Wirtgestein: Homogen-porös; hydraulische Durchlässigkeit: 10^{-10} m/s; Gradient: 0.1 m/m; Transportpfadlänge: 40 m; Sorption: Tonstein.

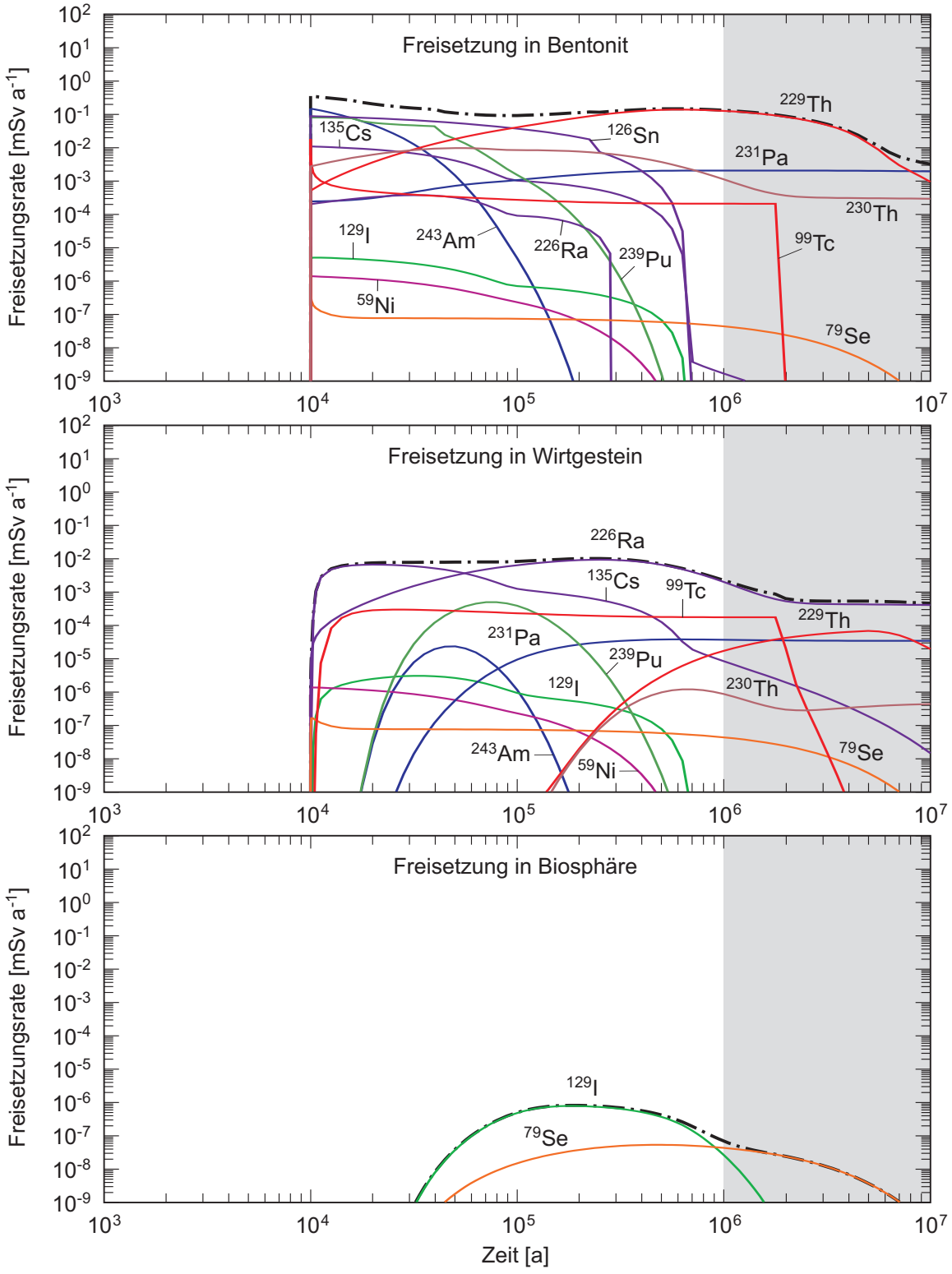


Fig. 4.7-8a: Radionuklid-Transferraten für verglaste hochaktive Abfälle für K = 10^{-13} m/s.

Obere Figur: Freisetzung in den Bentonit; mittlere Figur: Freisetzung aus dem Bentonit ins Wirtgestein; untere Figur: Freisetzung aus dem Wirtgestein in die Biosphäre, dargestellt als hypothetische Dosis.

Inventar: Nagra (2007); Wirtgestein: Homogen-porös; hydraulische Durchlässigkeit: 10^{-13} m/s; Gradient: 1 m/m; Transportpfadlänge: 40 m; Sorption: Tonstein.

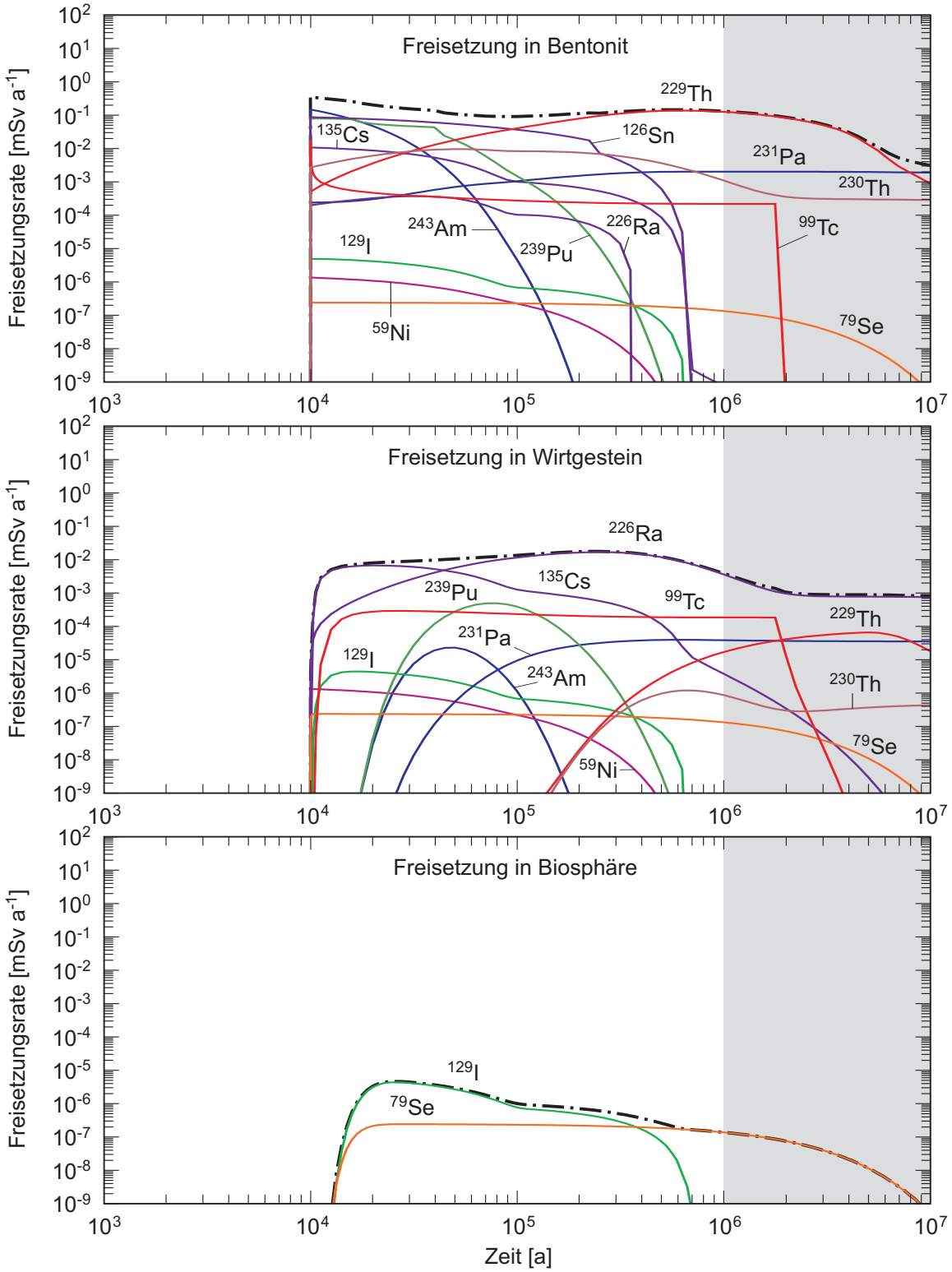


Fig. 4.7-8b: Radionuklid-Transferraten für verglaste hochaktive Abfälle für K = 10^{-10} m/s.

Obere Figur: Freisetzung in den Bentonit; mittlere Figur: Freisetzung aus dem Bentonit ins Wirtgestein; untere Figur: Freisetzung aus dem Wirtgestein in die Biosphäre, dargestellt als hypothetische Dosis.

Inventar: Nagra (2007); Wirtgestein: Homogen-porös; hydraulische Durchlässigkeit: 10^{-10} m/s; Gradient: 0.1 m/m; Transportpfadlänge: 40 m; Sorption: Tonstein.

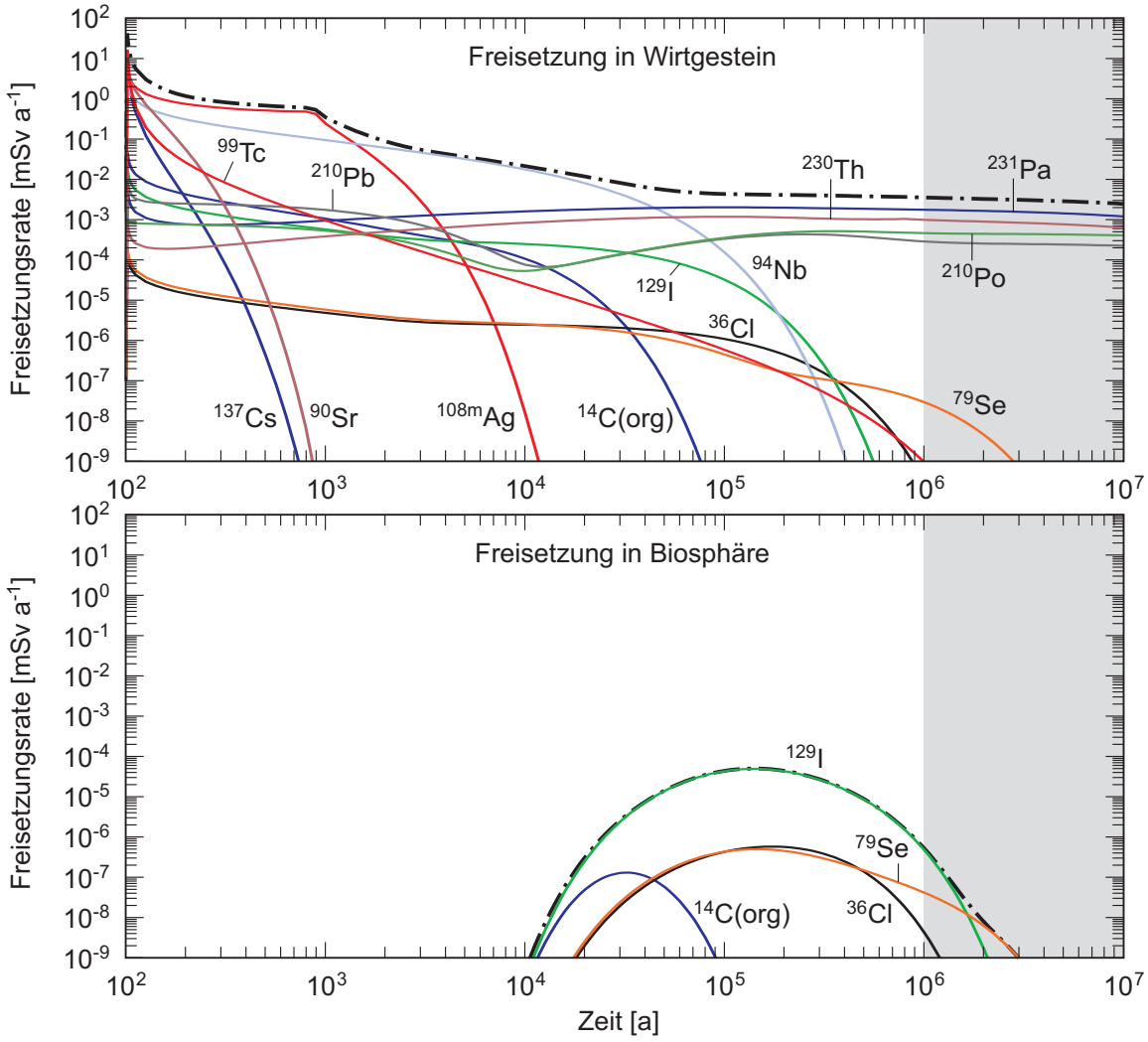


Fig. 4.7-9a: Radionuklid-Transferraten für LMA für K = 10^{-13} m/s.

Obere Figur: Freisetzung ins Wirtgestein; untere Figur: Freisetzung aus dem Wirtgestein in die Biosphäre, dargestellt als hypothetische Dosis.

Inventar: LMA (Referenzzuteilung); Wirtgestein: Homogen-porös; hydraulische Durchlässigkeit: 10^{-13} m/s; Gradient: 1 m/m; Transportpfadlänge: 40 m; Sorption: Tonstein.

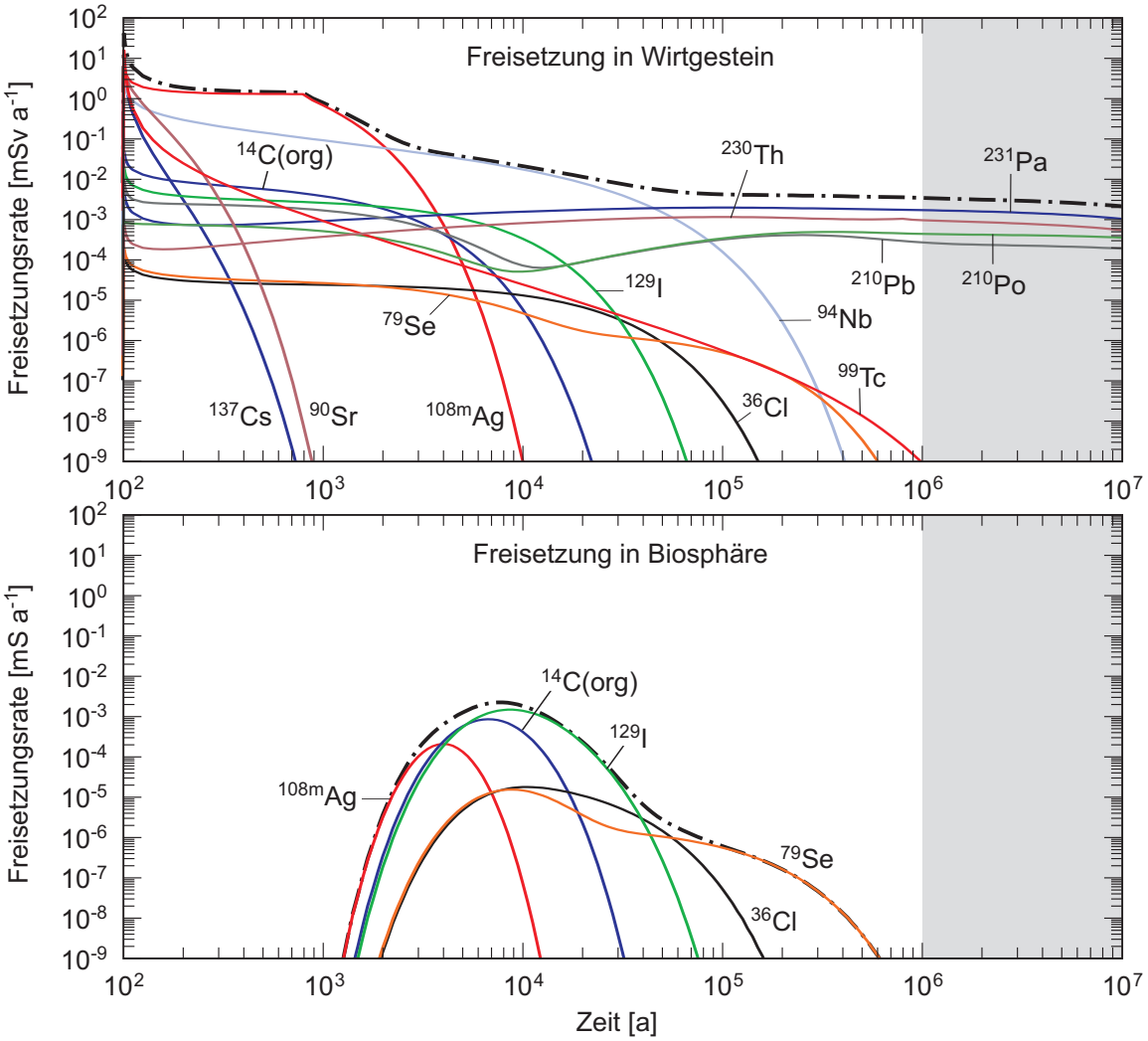


Fig. 4.7-9b: Radionuklid-Transferraten für LMA für K = 10^{-10} m/s.

Obere Figur: Freisetzung ins Wirtgestein; untere Figur: Freisetzung aus dem Wirtgestein in die Biosphäre, dargestellt als hypothetische Dosis.

Inventar: LMA (Referenzzuteilung); Wirtgestein: Homogen-porös; hydraulische Durchlässigkeit: 10^{-10} m/s; Gradient: 0.1 m/m; Transportpfadlänge: 40 m; Sorption: Tonstein.

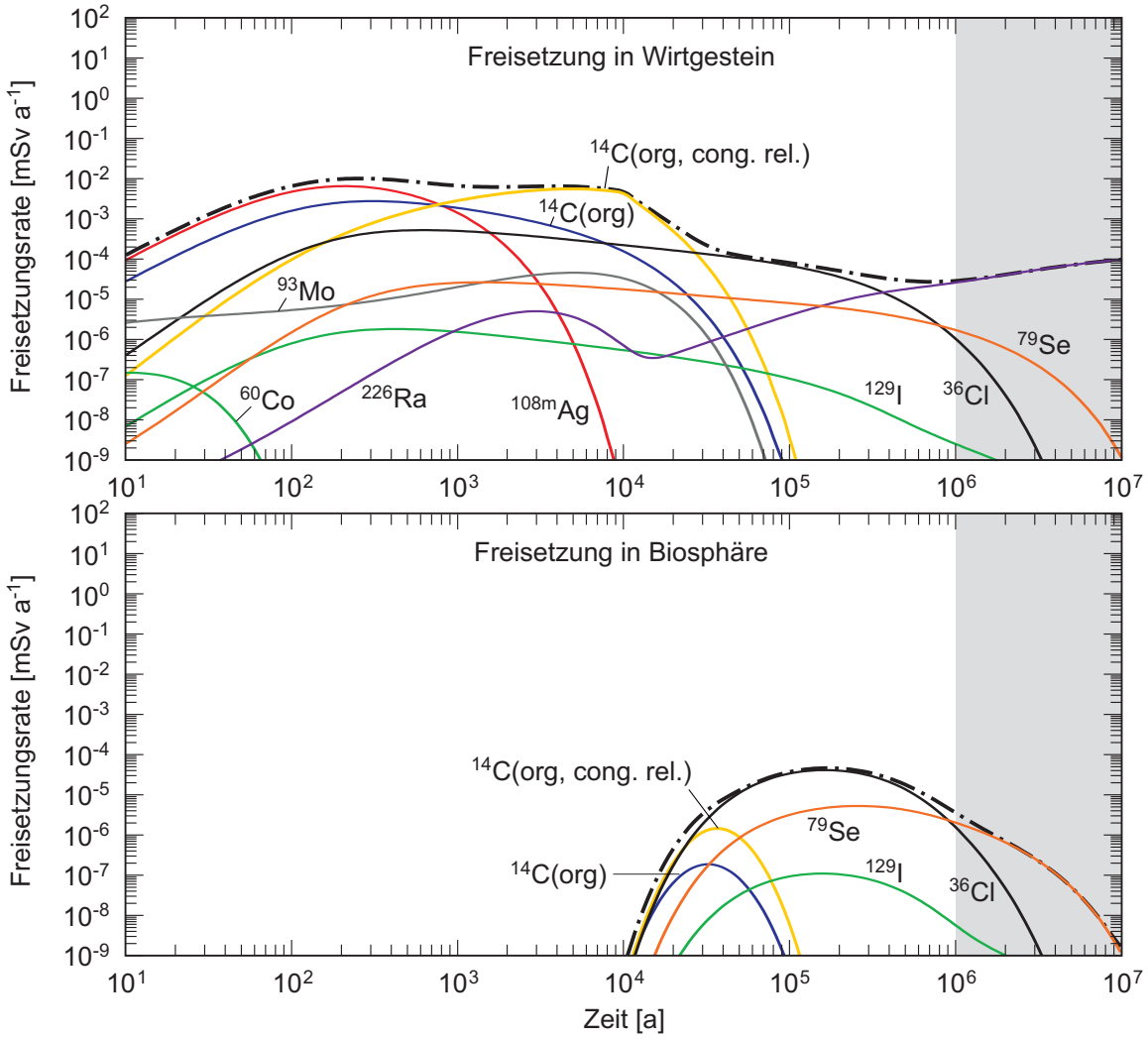


Fig. 4.7-10a: Radionuklid-Transferraten für SMA für K = 10^{-13} m/s.

Obere Figur: Freisetzung ins Wirtgestein; untere Figur: Freisetzung aus dem Wirtgestein in die Biosphäre, dargestellt als hypothetische Dosis.

Inventar: SMA (Referenzzuteilung); Wirtgestein: Homogen-porös; hydraulische Durchlässigkeit: 10^{-13} m/s; Gradient: 1 m/m, Transportpfadlänge: 40 m; Sorption: Tonstein.

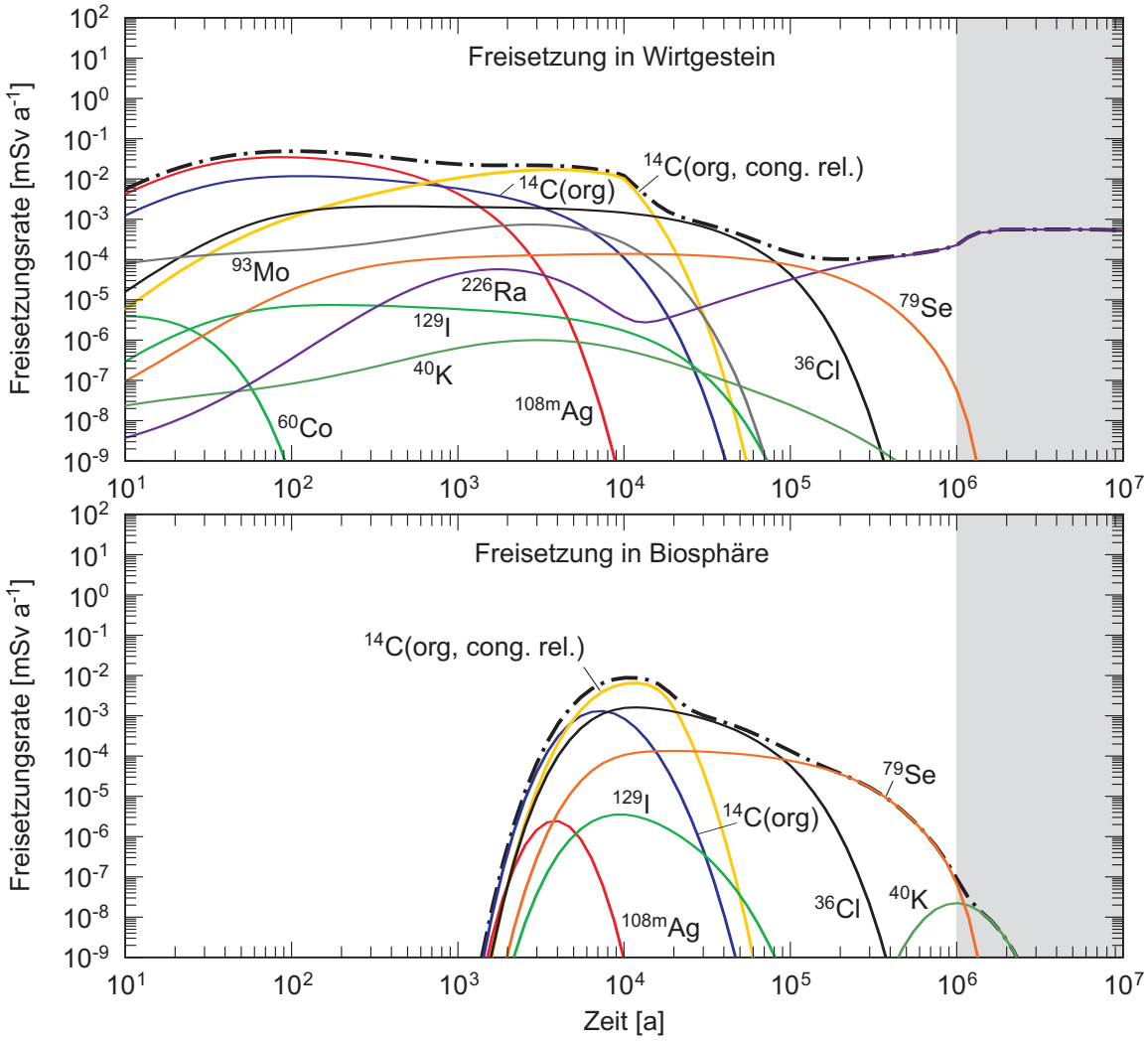


Fig. 4.7-10b: Radionuklid-Transferraten für SMA für K = 10^{-10} m/s.

Obere Figur: Freisetzung ins Wirtgestein; untere Figur: Freisetzung aus dem Wirtgestein in die Biosphäre, dargestellt als hypothetische Dosis.

Inventar: SMA (Referenzzuteilung); Wirtgestein: Homogen-porös; hydraulische Durchlässigkeit: 10^{-10} m/s; Gradient: 0.1 m/m; Transportpfadlänge: 40 m; Sorption: Tonstein.

Tab. 4.7-2a: Abschwächung der Radionuklidfreisetzung beim Transport durch die Elemente des Barrierensystems für $K = 10^{-13}$ m/s.

Wirtgestein: Homogen-porös; hydraulische Durchlässigkeit: 10^{-13} m/s; Gradient: 1 m/m; Transportpfadlänge: 40 m; Sorption: Tonstein.

Radionuklid-Transport durch Barrierensystem	**BE** i = 1 m/m $K = 10^{-13}$ m/s	**HAA** i = 1 m/m $K = 10^{-13}$ m/s	**LMA** i = 1 m/m $K = 10^{-13}$ m/s	**SMA** i = 1 m/m $K = 10^{-13}$ m/s
Freisetzung in Bentonit [mSv/a]	16	0.38	–	–
Freisetzung in Wirtgestein [mSv/a]	1.4	1.0×10^{-2}	41	1.0×10^{-2}
Abschwächung in Bentonit-Barriere	11	38	–	–
Abschwächung in Bentonit-Barriere [%]	91	97	–	–
Freisetzung in Biosphäre [mSv/a]	4.9×10^{-4}	8.1×10^{-7}	5.0×10^{-5}	4.6×10^{-5}
Abschwächung in Wirtgesteinsbarriere	2.9×10^{3}	1.2×10^{4}	8.2×10^{5}	2.2×10^{2}
Abschwächung in Wirtgesteinsbarriere [%]	> 99	> 99	> 99	> 99
Fig. Nr.	4.7-7a	4.7-8a	4.7-9a	4.7-10a

Tab. 4.7-2b: Abschwächung der Radionuklidfreisetzung beim Transport durch die Elemente des Barrierensystems für $K = 10^{-10}$ m/s.

Wirtgestein: Homogen-porös; hydraulische Durchlässigkeit: 10^{-10} m/s; Gradient: 0.1 m/m; Transportpfadlänge: 40 m; Sorption: Tonstein.

Radionuklid-Transport durch Barrierensystem	**BE** i = 0.1 m/m $K = 10^{-10}$ m/s	**HAA** i = 0.1 m/m $K = 10^{-10}$ m/s	**LMA** i = 0.1 m/m $K = 10^{-10}$ m/s	**SMA** i = 0.1 m/m $K = 10^{-10}$ m/s
Freisetzung in Bentonit [mSv/a)	16	0.38	–	–
Freisetzung in Wirtgestein [mSv/a]	2.1	1.9×10^{-2}	42	4.9×10^{-2}
Abschwächung in Bentonit-Barriere	7.6	20	–	–
Abschwächung in Bentonit-Barriere [%]	87	95	–	–
Freisetzung in Biosphäre [mSv/a]	1.4×10^{-2}	4.6×10^{-6}	2.2×10^{-3}	8.9×10^{-3}
Abschwächung in Wirtgesteinsbarriere	1.5×10^{2}	4.1×10^{3}	1.9×10^{4}	5.5
Abschwächung in Wirtgesteinsbarriere [%]	>99	> 99	> 99	82
Fig. Nr.	4.7-7b	4.7-8b	4.7-9b	4.7-10b

4.7.3 Zusammenfassung

Die quantitativen Betrachtungen in Kap. 4.7 zeigen, dass bei einem gut ausgelegten Lager[66] der grösste Teil der in das Lager eingebrachten Radiotoxizität innerhalb des Nahfelds zerfällt. Dazu tragen folgende Phänomene bei:

- Langlebige Behälter (BE bzw. HAA), die einen anfänglich vollständigen Einschluss gewährleisten: Bei einer Einschlussdauer von 10'000 Jahren nimmt die Radiotoxizität vom Beginn der Einlagerung bis zum Ende der Einschlussdauer in den Behältern um einen Faktor von ca. 30 für BE bzw. um einen Faktor von ca. 600 für HAA ab.
- Die Brennstoffmatrix bzw. die Glasmatrix (BE bzw. HAA) mit sehr kleinen Korrosionsraten: Für die BE führt die ausserordentlich kleine Korrosionsrate der Brennelementmatrix dazu, dass die in die Bentonit-Barriere freigesetzte Radiotoxizität um einen Faktor von ca. 10'000 abnimmt (gegenüber dem Fall, bei dem sich die Brennstoffmatrix direkt nach Einlagerung instantan auflösen würde). Auch bei den verglasten HAA nimmt die in die Bentonit-Barriere freigesetzte Radiotoxizität um einen Faktor von ca. 4'500 ab.
- Das Verfüllmaterial des Nahfelds mit guter Sorption und kleiner Löslichkeit für viele Radionuklide: Bei den in das Verfüllmaterial freigesetzten Radionukliden ist ihre Sorption am Verfüllmaterial und – für gewisse Nuklide – ihre geringe Löslichkeit weitere wichtige Rückhaltemechanismen. Insbesondere für LMA und SMA ist die Sorption im Zementnahfeld von zentraler Bedeutung, weil hier der langlebige Behälter und mehrheitlich auch die korrosionsresistente Matrix fehlen. So nimmt für SMA die in die Geosphäre freigesetzte Radiotoxizität um einen Faktor von ca. 13'200 ab (gegenüber dem Fall, bei dem die aus den Abfällen freigesetzte Radiotoxizität instantan in die Geosphäre freigesetzt würde). Aber auch für die BE und für die HAA sind die Sorption und Löslichkeit sehr gute (teilweise redundante) Barrieren: Die in die Geosphäre freigesetzte Radiotoxizität nimmt für die BE um einen Faktor von ca. 150'000 ab (gegenüber dem Fall, bei dem die gesamte Radiotoxizität direkt nach der Einlagerung instantan in die Geosphäre freigesetzt würde; unter Berücksichtigung des Beitrags der BE-Matrix bzw. des Behälters); für die HAA um einen Faktor von ca. 290'000.
- Die Geosphäre: Die Barrierenwirkung der Geosphäre ist sehr ausgeprägt. Die Freisetzung der Radiotoxizität in die Biosphäre nimmt – unter Berücksichtigung der Beiträge des Nahfelds – für die BE um ca. einen Faktor 10^7, für die HAA um ca. 4×10^8, für die LMA um ca. 4×10^4 und für die SMA um ca. 8×10^5 ab gegenüber dem Fall, wo die aus den Abfällen freigesetzte Radiotoxizität instantan in die Biosphäre freigesetzt würde.

[66] Ein gut ausgelegtes Lager zeichnet sich aus durch einen geeigneten Standort und ein geeignetes Barrierensystem.

4.8 Schlussfolgerungen

Kap. 4 stellt das Barrieren- und Sicherheitskonzept für die geologischen Tiefenlager SMA und HAA vor, abgestimmt auf die in Kap. 3 definierte Abfallzuteilung. Es werden die Sicherheitsfunktionen definiert, welche durch ein System von gestaffelten technischen und geologischen Barrieren gewährleistet werden. Die erwarteten Sicherheitsbeiträge der verschiedenen Elemente des Barrierensystems bei gegebener Langzeitstabilität werden diskutiert. Die Bewertung der bereits in früheren Sicherheitsanalysen identifizierten lagerbedingten Einflüsse mit dem Potenzial zur Beeinträchtigung der Barrierenwirkung zeigt, dass für das betrachtete Barrieren- und Sicherheitskonzept für das SMA- und das HAA-Lager keines dieser Phänomene die Sicherheit der entsprechenden geologischen Tiefenlager grundsätzlich in Frage stellt. Es wird anhand der Referenz-Abfallzuteilung illustriert, welche Elemente des Barrierensystems welchen Beitrag zur Sicherheit leisten. In beiden Lagertypen wird der weitaus grösste Anteil der Radiotoxizität durch Immobilisierung der Radionuklide und radioaktiven Zerfall bereits im Nahfeld abgebaut. Ein weiterer, wichtiger Anteil unterliegt während des Transports durch das Wirtgestein einem Abbau, so dass derjenige Anteil, der die technischen und geologischen Barrieren verlassen kann, nur noch einem winzigen Bruchteil der ursprünglichen Radiotoxizität entspricht. Dies bewirkt, dass die entsprechenden Dosen deutlich unter dem Schutzziel liegen. Den Hauptanteil an dieser Dosis tragen die Radionuklide ^{129}I, ^{14}C (organisch gebunden), ^{36}Cl und ^{79}Se. Das hydraulische Regime des umgebenden Wirtgesteins in den betrachteten Szenarien beeinflusst das Ergebnis nicht wesentlich, falls die hydraulische Durchlässigkeit innerhalb einer bestimmten Bandbreite bleibt. Die quantitativen Resultate von Kap. 4.7 untermauern die qualitativen Aussagen von Kap. 4.5 über die erwarteten Beiträge der verschiedenen Elemente des Barrierensystems zur Sicherheit des Gesamtsystems.

5 Anforderungen an die Geologie

5.1 Ziel und Aufbau des Kapitels

Basierend auf der Abfallzuteilung (Kap. 3) und dem Barrieren- und Sicherheitskonzept für das SMA- und das HAA-Lager (Kap. 4) werden im vorliegenden Kapitel die Anforderungen an die Geologie für die beiden Lager festgelegt und begründet. Zuerst wird in Kap. 5.2 das Vorgehen bei der Festlegung der Anforderungen erläutert. Kap. 5.3 legt die im Einengungsverfahren verwendeten Indikatoren fest und erläutert diese im Kontext der Vorgaben aus dem SGT. In Kap. 5.4 werden die Anforderungen an die im Einengungsverfahren verwendeten Indikatoren festgelegt und in tabellarischer Form zusammengefasst; die detaillierten Erläuterungen der Festlegungen finden sich im Anhang 1. Kap. 5.5 enthält die Schlussfolgerungen.

5.2 Vorgehen zur Festlegung der Anforderungen an die Geologie für das SMA- und das HAA-Lager

Das Ziel von Kap. 5.2 ist, das Vorgehen zur Festlegung der Anforderungen an die Geologie zu erläutern. Die Festlegung erfolgt in zwei Schritten. In einem ersten Schritt werden die Indikatoren festgelegt, welche die im SGT aufgeführten Kriterien[67] adäquat erfassen und welche im Verfahren zur Festlegung von geologischen Standortgebieten[68] verwendet werden. In einem zweiten Schritt werden die Anforderungen für die Indikatoren festgelegt. Die Indikatoren spielen somit eine zentrale Rolle im Einengungsverfahren.

(A) Festlegung der im Einengungsverfahren verwendeten Indikatoren

Bei der Festlegung der im Einengungsverfahren verwendeten Indikatoren wird wie folgt vorgegangen (s. auch Tab. 2.4-1 in Nagra 2008b):

- **Sicherheitsfunktionen und Prinzipien** – Den Ausgangspunkt bilden die in Kap. 4.4 bezeichneten Sicherheitsfunktionen und die in Kap. 2.3.5 aufgeführten Prinzipien. Dabei wird vorausgesetzt, dass das SMA- bzw. HAA-Lager genügend Sicherheit gewährleistet, falls diese Sicherheitsfunktionen wirksam sind und die Prinzipien eingehalten werden. Es gilt also, einen Satz von Indikatoren mit zugehörigen Anforderungen bzw. Bewertungsskalen so festzulegen, dass bei Anwendung der Indikatoren mit ihren Anforderungen bzw. Bewertungsskalen aus dem Einengungsverfahren geologische Standortgebiete resultieren, in welchen voraussichtlich geologische Tiefenlager gebaut werden können, welche die Sicherheitsfunktionen und Prinzipien erfüllen und somit genügend Sicherheit gewährleisten. Da die SGT-Kriterien bzw. zu beurteilenden Aspekte und die zugehörigen Indikatoren in der Regel in ihrer sicherheitsbezogenen Wirkung voneinander abhängig sind, wird einerseits der Beitrag der Kriterien bzw. Indikatoren zu den verschiedenen Sicherheitsfunktionen eines Lagers evaluiert und ihre funktionale Wirkung aufgezeigt. Daneben berücksichtigt die Evaluation auch die Prinzipien, welche verlangen, dass das SMA- bzw. HAA-Lager gemäss den

[67] Diese werden im Folgenden mit "SGT-Kriterien" bezeichnet.

[68] Dieses Verfahren wird in Übereinstimmung mit Nagra (2008b) "Einengungsverfahren" genannt.

Vorgaben der Sicherheit zuverlässig erstellt werden kann[69] und dass die für die Sicherheitsanalysen erforderlichen geologischen Informationen mit genügender Zuverlässigkeit erhoben werden können.

- **Relevante Elemente des Barrierensystems –** Die Sicherheitsfunktionen werden gewährleistet durch die Elemente des Barrierensystems (Barrieren- und Sicherheitskonzept, s. Kap. 4.3), wobei meistens mehrere Elemente des Barrierensystems zu einer bestimmten Sicherheitsfunktion beitragen. Mit geeigneten Elementen des Barrierensystems wird auch sichergestellt, dass die oben erwähnten Prinzipien erfüllt sind. Die gesetzlichen Vorgaben sowie die Abfalleigenschaften spielen ebenfalls eine wichtige Rolle bei der Festlegung des Barrieren- und Sicherheitskonzepts.
- **Sicherheitsrelevante Eigenschaften –** Damit die Elemente des Barrierensystems die Sicherheitsfunktionen im Betrachtungszeitraum gewährleisten können, müssen sie die entsprechenden sicherheitsrelevanten Eigenschaften besitzen (s. Beschreibung der Sicherheitsfunktionen, Kap. 4.4).
- **Zugeordnete SGT-Kriterien –** Um sicherzustellen, dass die SGT-Kriterien bei der Festlegung der Indikatoren korrekt und vollständig berücksichtigt werden, werden diese den entsprechenden sicherheitsrelevanten Eigenschaften zugeordnet, wobei dieselben SGT-Kriterien verschiedenen sicherheitsrelevanten Eigenschaften zugeordnet werden können.
- **Potenziell wichtige Indikatoren –** Die Analyse der sicherheitsrelevanten Eigenschaften bildet die Basis zur Festlegung der potenziell wichtigen Indikatoren; dabei werden auch Erfahrungen aus früheren Sicherheitsanalysen, aus der Entwicklung von Anlagenkonzepten sowie aus der Erarbeitung von geologischen Datensätzen für die Sicherheitsanalyse und für die Anlagenauslegung berücksichtigt. Die Indikatoren sind das Mittel, mit dem die Anforderungen an die Geologie festgelegt werden. Diese Anforderungen sind z.T. quantitativ, z.T. aber auch qualitative Beschreibungen.
- **Einteilung der Indikatoren bezüglich ihrer Relevanz** – Entsprechend ihrer Relevanz für die Langzeitsicherheit bzw. bautechnische Machbarkeit eines geologischen Tiefenlagers werden die Indikatoren in drei Relevanz-Klassen eingeteilt[70]:
  - **Indikatoren mit Mindestanforderungen –** Diese Indikatoren repräsentieren Merkmale, welche für die Langzeitsicherheit bzw. Machbarkeit eines geologischen Tiefenlagers unabdingbar sind; an diese werden deshalb Mindestanforderungen gestellt.
  - **Indikatoren mit verschärften Anforderungen –** Diese Indikatoren repräsentieren für die Langzeitsicherheit bzw. Machbarkeit besonders wichtige Merkmale. An diese Indikatoren werden bei Bedarf verschärfte Anforderungen mit der Zielsetzung gestellt, bzgl. Sicherheit vergleichbare und zuverlässige Varianten von hoher Qualität zu erhalten und um potenziell vorhandenen, grösseren Ungewissheiten Rechnung zu tragen.

---

[69] Die relevanten Anforderungen für die technische Machbarkeit der SMA- und HAA-Lager leiten sich in erster Linie ab aus folgenden Anforderungen: (1) eine ausreichende räumliche Ausdehnung des einschlusswirksamen Gebirgskörpers (Platzangebot), (2) eine begrenzte Tiefenlage, welche unter Berücksichtigung der Wirtgesteinseigenschaften die Erstellung der Hohlräume mit heutiger Technologie noch sicher zulassen, (3) geotechnische und hydrologische Bedingungen in den Gebirgsformationen des Liegenden, welche eine zuverlässige Erschliessung der Lagerzone mit Zugangstunnel und Schächten erlaubt, sowie (4) bei möglichem Gasvorkommen im Wirtgestein in Bezug auf die Gas-Überflutungsgefahr und das Ausgasverhalten eine Gefahrenstufe, welche während dem Betrieb sicher beherrscht werden kann.

[70] Mehrere Indikatoren sind gleichzeitig in allen drei Relevanz-Klassen vertreten; d.h. an diese werden Mindestanforderungen und verschärfte Anforderungen gestellt und es werden Bewertungsskalen festgelegt (vgl. Tab. 5.3-3).

- **Weitere Indikatoren** – Diese Indikatoren repräsentieren Merkmale, die für die Langzeitsicherheit bzw. Machbarkeit zwar nicht unabdingbar, aber für die Charakterisierung der geologischen Standortgebiete wichtig sind und deshalb über die Bewertung in die Einengung einfliessen; an diese werden weder Mindestanforderungen noch verschärfte Anforderungen gestellt.

- **Im Einengungsverfahren verwendete Indikatoren –** Die potenziell wichtigen Indikatoren werden nochmals den Erfahrungen aus früheren Sicherheitsanalysen und den verfügbaren geologischen Informationen für die Anwendung der Indikatoren gegenüber gestellt. Dabei werden Doppelspurigkeiten eliminiert, in dem Indikatoren, welche bereits indirekt durch andere Indikatoren berücksichtigt sind und solche, die erst in Etappe 2 vertieft beurteilt werden, aus der Liste der potenziell wichtigen Indikatoren entfernt. Dies führt zur Liste der im Einengungsverfahren verwendeten Indikatoren.

(B) Festlegung der Anforderungen für die Indikatoren

Bei der Festlegung der Anforderungen für die Indikatoren wird folgendermassen vorgegangen:

- **Bereitstellung der Grundlagen –** Die Grundlagen, die bei der Festlegung der Anforderungen für die Indikatoren verwendet werden, werden in verschiedene Klassen eingeteilt. Wenn immer möglich stützen sich die Festlegungen auf quantitative Grundlagen. Dies sind:

  - Radionuklid-Freisetzungsrechnungen (Dosis-Berechnungen)
  - Quantitative Modellvorstellungen zum Verhalten einzelner Barrieren oder Prozesse (Modellrechnungen zum Systemverhalten)
  - Beobachtungen und Erfahrungen (teilweise gestützt auf quantitative und qualitative Modellvorstellungen)

  Für mehrere der Indikatoren werden verschiedene Arten der Grundlagen bei der Festlegung der Anforderungen und Bewertungsskalen verwendet, und in vielen Fällen werden auch Expertenbeurteilungen in die Erwägungen miteinbezogen. Diese Grundlagen und ihre Verwendung zur Festlegung der Anforderungen und Bewertungsskalen für die Indikatoren werden in Kap. 5.4.2 weiter diskutiert.

- **Festlegung der Anforderungen für die Indikatoren –** Die Festlegung der Anforderungen für die Indikatoren erfolgt basierend auf den oben erwähnten Grundlagen mit dem übergeordneten Ziel, dass die Anwendung der Indikatoren zu Standorten führen soll, an denen Lager gebaut werden können, welche die Sicherheitsfunktionen gewährleisten und die Prinzipien erfüllen und damit sicher sind.

Die Dokumentation der Anforderungen und Bewertungsskalen erfolgt für jeden Indikator nach folgendem Schema (s. Anhang 1):

- **Festlegung der Anforderungen und Bewertungsskalen –** Zunächst werden die Anforderungen und Bewertungsskalen für den betrachteten Indikator in tabellarischer Form zusammengestellt.

- **Hintergrundinformationen**

  1. Relevanz für Langzeitsicherheit bzw. bautechnische Machbarkeit – Es folgt ein Block mit Hintergrundinformationen zum betrachteten Indikator, wobei eine Erläuterung der Relevanz des betrachteten Indikators für die Langzeitsicherheit bzw. bautechnische Machbarkeit den Ausgangspunkt bildet. Dazu werden alle Sicherheitsfunktionen bzw. Prinzipien, relevanten Elemente des Barrierensystems sowie sicherheitsrelevanten Eigenschaften, bei denen der betrachtete Indikator eine Rolle spielt, systematisch zusammengestellt.

2. Beschreibung und zugehörige Grundlagen – Danach werden spezifisch für den betrachteten Indikator die zugehörigen Grundlagen erläutert, wobei auf ein breites Spektrum von quantitativen und qualitativen Informationen zurückgegriffen wird. Wo relevant, wird ausserdem auf Abhängigkeiten zwischen dem betrachteten und anderen Indikatoren hingewiesen.

3. Erläuterung der Anforderungen und Bewertungsskalen – Hier werden die Anforderungen und Bewertungsskalen für jeden Indikator im Kontext der Anwendung im Einengungsverfahren zusammengestellt und erläutert, wobei einige der Indikatoren mehrmals zur Anwendung kommen; d.h. in den verschiedenen Schritten des Einengungsverfahrens und dort bei den verschiedenen Stufen 'Mindestanforderung', 'verschärfte Anforderung' und 'Bewertung der bevorzugten Varianten' (s. Nagra 2008b für eine detaillierte Beschreibung des Einengungsverfahrens).

Im Folgenden werden die im Einengungsverfahren zu verwendenden Indikatoren identifiziert (Kap. 5.3) und die entsprechenden Mindestanforderungen, verschärften Anforderungen und Bewertungsskalen festgelegt (Kap. 5.4).

5.3 Festlegung der im Einengungsverfahren verwendeten Indikatoren

5.3.1 Betrachtungszeitraum

Bei den quantitativen Anforderungen an das Wirtgestein und die Geosphäre spielt der Betrachtungszeitraum eine spezielle Rolle, da die Anforderungen für verschiedene Indikatoren von diesem abhängen. Deshalb wird der Betrachtungszeitraum festgelegt, bevor die potenziell wichtigen Indikatoren diskutiert werden.

Der Betrachtungszeitraum legt fest, wie lange die Barrieren des SMA- bzw. HAA-Lagers ihre Funktion zu erfüllen haben. Nach Ablauf des Betrachtungszeitraums kann nicht ausgeschlossen werden, dass die Lagerkammern aufgrund geologischer Vorgänge zunehmend Einflüssen der Erdoberfläche ausgesetzt werden. Auch für diese Zeiten soll der Variationsbereich der von einem geologischen Tiefenlager ausgehenden möglichen regionalen radiologischen Auswirkungen unter Berücksichtigung der inhärent vorhandenen Ungewissheiten im Bereich der natürlichen radiologischen Umweltrisiken liegen (HSK 2008a). Der erforderliche Betrachtungszeitraum ist in erster Linie abhängig vom zugeteilten Nuklidinventar und seiner zeitlichen Entwicklung (radioaktiver Zerfall) und wird deshalb unterschiedlich sein für SMA- und HAA-Lager.

Als Betrachtungszeitraum wird zunächst aufgrund der Erkenntnisse aus früheren eigenen Sicherheits- und Systemanalysen (s. Kap. 2.4) sowie – für das HAA-Lager – aus internationalen Erfahrungen (siehe z.B. AkEnd 2002b, BMU 2008, EPA 2005, NEA 2004b, NEA 2006) für das SMA-Lager 100'000 Jahre[71] und für das HAA-Lager 1 Million Jahre veranschlagt. Die Resultate der orientierenden sicherheitstechnischen Betrachtungen zu diesem Thema im vorliegenden Projekt (Anhang A5.4) zeigen, dass diese Werte vernünftig sind und dass auch für diese Phase, für die angenommen wurde, dass sich die Lagerkammern im Einflussbereich der Erdoberfläche befinden, weder durch den Konsum von Trinkwasser noch durch die Direktstrahlung aus dem Boden eine übermässige Strahlenbelastung zu erwarten ist.

---

[71] Es muss damit gerechnet werden, dass innerhalb der nächsten 100'000 Jahre mindestens eine Kaltzeit mit entsprechender Vergletscherung auftreten kann (Nagra 2008c). Mit den festgelegten Mindestanforderungen an die Tiefenlage des Lagers zum Zeitpunkt der Einlagerung der Abfälle wird auch ein ausreichender Schutz des Lagers vor glazialer Tiefenerosion gewährleistet.

5.3.2 Festlegung von potenziell wichtigen Indikatoren und Erläuterung ihres sicherheitstechnischen Kontexts

Im vorliegenden Kapitel werden die potenziell wichtigen Indikatoren gemäss dem in Kap. 5.2 vorgestellten Vorgehen festgelegt und ihr sicherheitstechnischer Kontext erläutert. Die in Tab. 5.3-1 enthaltene Zusammenfassung ist entsprechend strukturiert: Ausgehend von den **Sicherheitsfunktionen und Prinzipien** (1. Kolonne) werden die **Elemente des Barrierensystems** aufgeführt, welche zur Gewährleistung der Sicherheitsfunktionen und Prinzipien notwendig sind (2. Kolonne). Diese Elemente müssen eine Vielzahl von **sicherheitsrelevanten Eigenschaften** besitzen, damit sie die Sicherheitsfunktionen im Betrachtungszeitraum gewährleisten können (3. Kolonne). Um sicherzustellen, dass die **SGT-Kriterien** bei der Festlegung der Indikatoren korrekt und vollständig berücksichtigt werden, werden diese den sicherheitsrelevanten Eigenschaften zugeordnet, wobei dieselben SGT-Kriterien verschiedenen sicherheitsrelevanten Eigenschaften zugeordnet werden können (4. Kolonne). Nachfolgend wird ein Satz von **potenziell wichtigen Indikatoren** definiert (5. Kolonne) im Hinblick darauf, dass bei Anwendung der Indikatoren mit ihren Anforderungen bzw. Bewertungsskalen im Einengungsverfahren die evaluierten Elemente des Barrierensystems die erwünschten Eigenschaften aufweisen. Damit ist sichergestellt, dass geologische Standortgebiete resultieren, in welchen voraussichtlich geologische Tiefenlager gebaut werden können, welche die Sicherheitsfunktionen und Prinzipien erfüllen und somit genügend Sicherheit gewährleisten. Dabei sind Mehrfachnennungen von Indikatoren möglich; zur Vermeidung von textlichen Wiederholungen erfolgt die Beschreibung der mehrfach vorkommenden Indikatoren jedoch nur an einer Stelle (üblicherweise bei der ersten Nennung des Indikators, mit Verweisen bei den anderen Nennungen). Zur leichteren Orientierung werden die gleichen Identifikationsnummern für die Sicherheitsfunktionen bzw. Prinzipien, Elemente des Barrierensystems, sicherheitsrelevanten Eigenschaften und SGT-Kriterien verwendet wie in Tab. 5.3-1. Für die in Tab. 5.3-1 mit dem Symbol * versehenen Indikatoren sind keine Beschreibungen aufgeführt, da sie durch andere Indikatoren abgedeckt werden bzw. erst in Etappe 2 vertieft beurteilt werden (vgl. Tab. 5.3-2).

I Sicherheitsfunktionen S1/S2: Physische Trennung der Abfälle vom menschlichen Lebensraum ("Isolation") und Gewährleistung der erforderlichen Langzeitstabilität des Barrierensystems

Diese Sicherheitsfunktionen werden gewährleistet durch die (funktionalen) Elemente des Barrierensystems *Anordnung der Lagerkammern tief im Untergrund (B1)* und *geologische Situation (B2).*

I.1 Relevantes Element des Barrierensystems B1: Anordnung der Lagerkammern tief im Untergrund

Bei der *Anordnung der Lagerkammern tief im Untergrund* sind die folgenden Eigenschaften sicherheitsrelevant: *Physische Trennung der Abfälle vom menschlichen Lebensraum (E1)* und *Schutz des Lagers vor Prozessen und Ereignissen an der Erdoberfläche im Betrachtungszeitraum (z.B. Erosion, E2).*

I.1.1 Sicherheitsrelevante Eigenschaften E1/E2: Physische Trennung der Abfälle vom menschlichen Lebensraum und Schutz des Lagers vor Prozessen und Ereignissen an der Erdoberfläche im Betrachtungszeitraum (z.B. Erosion)

Diese sicherheitsrelevanten Eigenschaften werden über die nachfolgend beschriebenen Indikatoren erfasst. Diese Indikatoren werden den SGT-Kriterien *Erosion (2.2)* und *Nutzungskonflikte (2.4)* zugeordnet.

I.1.1.1 SGT-Kriterium 2.2: Erosion

- **'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf flächenhafte Erosion' –** Eine integrale Beurteilung einer allfälligen Beeinträchtigung eines Tiefenlagers durch flächenhafte Erosion erfolgt aufgrund der Tiefenlage der Obergrenze des notwendigen einschlusswirksamen Gebirgsbereichs[72] (vorliegender Indikator) sowie aufgrund der grossräumigen Erosion im Betrachtungszeitraum (vgl. Indikator 'Grossräumige Erosion im Betrachtungszeitraum'). Die Mindestanforderungen an diese beiden Indikatoren werden so festgelegt, dass am Ende des Betrachtungszeitraums die Obergrenze des notwendigen einschlusswirksamen Gebirgsbereichs im Extremfall gerade die Erdoberfläche erreicht; d.h. die Tiefenlage der Obergrenze des notwendigen einschlusswirksamen Gebirgsbereichs zum Zeitpunkt der Einlagerung, dividiert durch die Erosionsrate, entspricht dem Betrachtungszeitraum für das jeweilige Lager.
- **'Grossräumige Erosion im Betrachtungszeitraum' –** Dieser Indikator muss zusammen mit dem Indikator 'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf flächenhafte Erosion' betrachtet werden (s. oben). Es wird davon ausgegangen, dass die grossräumige Hebung und die flächenhafte Erosion über lange Zeitskalen im Gleichgewicht sind.
- ***'Tiefenlage unter Oberfläche Fels im Hinblick auf glaziale Tiefenerosion' –*** Dieser Indikator bezieht sich auf die Distanz zwischen der Obergrenze des notwendigen einschlusswirksamen Gebirgsbereichs und der Oberfläche Fels. Er dient der Beurteilung der Auswirkungen der glazialen Tiefenerosion auf die Langzeitsicherheit (Abnahme der Gesteins-Überdeckung und Freilegung des Tiefenlagers durch langfristige Hebung und glaziale Tiefenerosion).
- 'Glaziale Tiefenerosion'*[73] – durch ***'Tiefenlage unter Oberfläche Fels im Hinblick auf glaziale Tiefenerosion'*** berücksichtigt.
- 'Auswirkungen der Klimaentwicklung auf Tiefenlager'* – indirekt durch **'Grossräumige Erosion im Betrachtungszeitraum', 'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf flächenhafte Erosion'** und ***'Tiefenlage unter Oberfläche Fels im Hinblick auf glaziale Tiefenerosion'*** berücksichtigt.

I.1.1.2 SGT-Kriterium 2.4: Nutzungskonflikte

- 'Tiefenlage unter Oberfläche Fels im Hinblick auf Nutzungskonflikte'* – bei **'Rohstoffvorkommen innerhalb des Wirtgesteins'** und **'Rohstoffvorkommen unterhalb des Wirtgesteins'** berücksichtigt.

---

[72] Mit dem Begriff "Obergrenze (oder Top) notwendiger einschlusswirksamer Gebirgsbereich" (anstatt "Wirtgesteins-Obergrenze") werden Situationen erfasst, in denen zusätzlich zum Wirtgestein auch Beiträge der Rahmengesteine notwendig sind, um die Mindestanforderung bzw. die verschärfte Anforderung bzgl. der Mächtigkeit zu erfüllen.

[73] Erklärung der Bedeutung des Symbols *: Siehe S. 161.

- **'Rohstoffvorkommen innerhalb des Wirtgesteins'** – Siehe Beschreibung in Abschnitt I.2.2.1.
- **'Rohstoffvorkommen unterhalb des Wirtgesteins'** – Siehe Beschreibung in Abschnitt I.2.2.1.

I.2 Relevantes Element des Barrierensystems B2: Geologische Situation

Die *geologische Situation* wird beurteilt im Hinblick auf die *Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften (E3)* und den *Schutz vor unzulässiger Erosion (E4)* sowie die *geringe Wahrscheinlichkeit von menschlichem Eindringen dank Abwesenheit von absehbaren Nutzungskonflikten (E5)*.

I.2.1 Sicherheitsrelevante Eigenschaften E3/E4: Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften und Schutz vor unzulässiger Erosion

Diese sicherheitsrelevanten Eigenschaften werden über die nachfolgend beschriebenen Indikatoren erfasst. Diese Indikatoren werden den SGT-Kriterien *Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften (2.1)* und *Erosion (2.2)* zugeordnet.

I.2.1.1 SGT-Kriterium 2.1: Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften

Von zentraler Bedeutung für die Langzeitstabilität ist die Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften; insbesondere, dass eine bedeutende Veränderung der Barrierenwirkung des Wirtgesteins bzw. einschlusswirksamen Gebirgsbereichs innerhalb des Betrachtungszeitraums ausgeschlossen werden kann. Die in diesem Zusammenhang potenziell wichtigen Indikatoren sind:

- **'Modellvorstellungen zur Geodynamik und Neotektonik' –** Der Indikator dient der Beurteilung der Langzeitstabilität der geologischen Tiefenlager innerhalb des Betrachtungszeitraums. Dabei wird unterschieden zwischen einer möglichen Gefährdung der geologischen Stabilität aus Gründen der Geodynamik bzw. Neotektonik (betrifft die Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften) und der Zuverlässigkeit der betreffenden geologischen Aussagen (betrifft die Prognostizierbarkeit).
- **'Seismizität' –** Die Seismizität dient ebenfalls der Beurteilung der Langzeitstabilität der geologischen Tiefenlager innerhalb des Betrachtungszeitraums, da die räumliche Häufung von tektonischen Erdbebenherden ein Hinweis auf differenzielle Bewegungen im geologischen Untergrund ist (differenzielle Bewegungen erfolgen bevorzugt entlang präexistenter Störungszonen).
- **'Seltene geologische Ereignisse' –** Dieser Indikator berücksichtigt Vulkanismus; hingegen wird eine mögliche Bruchbildung im Zusammenhang mit starken Erdbeben durch die Indikatoren **'Abstand zu regionalen Störungszonen'**, 'Seismizität' und durch eine geeignete Anordnung der Lagerkammern berücksichtigt. Auf die Beurteilung von anderen seltenen Ereignissen (z.B. Meteoriteneinschläge) wird bei der Standortevaluation verzichtet, da diese Vorgänge und Ereignisse nicht zwischen verschiedenen Grossräumen der Schweiz diskriminieren.
- **'Abstand zu regionalen Störungszonen'** – Siehe Beschreibung in Abschnitt II.1.2.1.
- 'Differenzielle Bewegungen'* werden durch die Indikatoren **'Abstand zu regionalen Störungszonen'**, *'Diffus gestörte Zonen'* und *'Tektonisches Regime (konzeptionell zu meidende Zonen)'* bei der Auslegung der Lagerkammern berücksichtigt.

- *'Diffus gestörte Zonen'* – Siehe Beschreibung in Abschnitt II.1.2.1.
- *'Tektonisches Regime (konzeptionell zu meidende Zonen)'* – Siehe Beschreibung in Abschnitt II.1.2.1.
- **'**Selbstabdichtungsvermögen' – Dieser Indikator ist relevant im Hinblick auf die Begrenzung der Auswirkungen von Bewegungen des Gesteinsverbands (Zerscherung, Reaktivierung von Brüchen und Störungszonen) durch Selbstabdichtung infolge Mineraladerbildung, Einschleppung von tonigen Gesteinsanteilen in die Störungsebene und Zerreibung von Gesteinsmaterial. Bei der Selbstabdichtung von Klüften in Auflockerungszonen von Untertagebauwerken sind zeitabhängige Deformation, Quellung und Desintegration des Gesteins die massgeblichen Prozesse.
- 'Modellvorstellungen zu geochemischen Vorgängen' – Der Indikator wird nur für die Beschreibung der Grossräume verwendet; die Bewertung der dazu gehörenden Verkarstung erfolgt wirtgesteinsspezifisch unter Berücksichtigung der geologischen Situation (vgl. Indikator 'Potenzial zur Bildung neuer Wasserwegsamkeiten (Verkarstung)').
- **'Potenzial zur Bildung neuer Wasserwegsamkeiten (Verkarstung)' –** In Karbonatgesteinen (einschliesslich ihrer metamorphen Homologa) und in Evaporiten (Anhydrit, Gips, Steinsalz) kann es zur Bildung neuer Wasserwegsamkeiten durch Verkarstung oder Subrosion kommen. Verkarstung ist insbesondere in Oberflächennähe und in Regionen mit ausgeprägtem topographischem Relief bzw. mit hohen hydraulischen Gradienten zu erwarten.

I.2.1.2 SGT-Kriterium 2.2: Erosion

Für die Beschreibung der für dieses SGT-Kriterium potenziell wichtigen Indikatoren wird auf den Abschnitt I.1.1.1 verwiesen:

- **'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf flächenhafte Erosion'**
- ***'Tiefenlage unter Oberfläche Fels im Hinblick auf glaziale Tiefenerosion'***
- **'Grossräumige Erosion im Betrachtungszeitraum'**
- 'Glaziale Tiefenerosion'*
- 'Auswirkungen der Klimaentwicklung auf Tiefenlager'*

I.2.2 Sicherheitsrelevante Eigenschaften E5: Geringe Wahrscheinlichkeit von menschlichem Eindringen dank Abwesenheit von absehbaren Nutzungskonflikten

Diese sicherheitsrelevanten Eigenschaften werden über die nachfolgend beschriebenen Indikatoren erfasst. Diese Indikatoren werden dem SGT-Kriterium *Nutzungskonflikte (2.4)* zugeordnet.

I.2.2.1 SGT-Kriterium 2.4: Nutzungskonflikte

Eine Vermeidung von absehbaren Nutzungskonflikten stellt sicher, dass die Wahrscheinlichkeit eines menschlichen Eindringens in das geologische Tiefenlager (z.B. Anbohren des Lagers im Zusammenhang mit einer Explorationstätigkeit oder einer Nutzung von Ressourcen) klein gehalten wird und dass eine allfällige zukünftige Nutzung nicht verunmöglicht bzw. übermässig eingeschränkt wird. Die in diesem Zusammenhang potenziell wichtigen Indikatoren sind:

- **'Rohstoffvorkommen innerhalb des Wirtgesteins' –** Ein wirtgesteinsbezogener Nutzungskonflikt besteht, wenn das Wirtgestein selbst ein nutzungswürdiger Rohstoff ist oder wenn nutzungswürdige Rohstoffe innerhalb des Wirtgesteins vorkommen. Falls das Wirtgestein auch noch anderweitig und in geringerer Tiefe vorkommt, trägt dies dazu bei, Nutzungskonflikte zu vermeiden (geringerer Aufwand für den Abbau). Schwerwiegende Nutzungskonflikte dieses Typs werden bei der Wahl der bevorzugten Wirtgesteine nach Möglichkeit vermieden.
- **'Rohstoffvorkommen unterhalb des Wirtgesteins' –** Ein Nutzungskonflikt besteht, wenn nutzungswürdige Rohstoffe unterhalb des Wirtgesteins vorkommen. Schwerwiegende Nutzungskonflikte werden bei der Wahl der bevorzugten Bereiche nach Möglichkeit vermieden.
- 'Rohstoffvorkommen oberhalb des Wirtgesteins' – Ein Nutzungskonflikt besteht, wenn nutzungswürdige Rohstoffe oberhalb des Wirtgesteins vorkommen. Diese Nutzungskonflikte spielen vor allem im Hinblick auf die Erschliessung des Lagers eine Rolle und werden bei der Lagerauslegung berücksichtigt. Weiter besteht ein enger Zusammenhang zwischen den Indikatoren 'Rohstoffvorkommen unterhalb des Wirtgesteins' und 'Rohstoffvorkommen oberhalb des Wirtgesteins', da sie teilweise in kausalem Zusammenhang stehen: Kohlenwasserstoffvorkommen oberhalb des Wirtgesteins haben ihren Ursprung oft in tieferen Gesteinsformationen unterhalb des Wirtgesteins. Die Festlegungen bzgl. wirtgesteinsbezogener Rohstoffkonflikte werden im Rahmen des Indikators 'Rohstoffvorkommen innerhalb des Wirtgesteins' festgelegt.
- **'Mineralquellen und Thermen' –** Ein Nutzungskonflikt besteht, wenn eine hydraulisch wirksame Verbindung zwischen Lagerkomponenten (Lagerzone, Zugangsbauwerke) und Mineralquellen und Thermen vorhanden sind. Freisetzungspfade für Radionuklide hin zu Mineralquellen oder Thermen müssen unter allen Umständen verhindert werden, da sie einen schwerwiegenden Nutzungskonflikt darstellen. Auch hydraulisch wirksame Verbindungen zwischen Mineralquellen und Thermen sowie den Zugangsbauwerken müssen durch einen Sicherheitsabstand nach Möglichkeit vermieden werden.
- 'Geothermie' – Ein Nutzungskonflikt besteht, wenn eine Nutzung der Erdwärme im geologischen Untergrund die Sicherheit des Tiefenlagers beeinträchtigt oder durch das Tiefenlager verunmöglicht wird.

II Sicherheitsfunktion S3: Einschluss der Radionuklide ("Einschluss")

Diese Sicherheitsfunktion wird gewährleistet durch die Elemente des Barrierensystems *Endlagerbehälter (B3)* und *weitere technische Barrieren (B4)*.

II.1 Relevante Elemente des Barrierensystems B3/B4: Endlagerbehälter und weitere technische Barrieren

Zur Gewährleistung der Sicherheitsfunktion *Einschluss* durch die *Endlagerbehälter* und die *weiteren technischen Barrieren* sind die folgenden Eigenschaften sicherheitsrelevant: *Korrosionsbeständigkeit (E6)*, *geometrische Bedingungen (laterale Ausdehnung und Mächtigkeit bzw. Platzangebot unter Berücksichtigung der Tiefenlage und bereichsbegrenzender geologischer Elemente, E7)* und *geomechanische Bedingungen (E8)*.

II.1.1 Sicherheitsrelevante Eigenschaft E6: Korrosionsbeständigkeit

Diese sicherheitsrelevante Eigenschaft wird über die nachfolgend beschriebenen Indikatoren erfasst. Diese Indikatoren werden dem SGT-Kriterium *Geochemische Bedingungen (1.3)* zugeordnet.

II.1.1.1 SGT-Kriterium 1.3: Geochemische Bedingungen

- **'Redox-Bedingungen' –** Die Korrosionsbeständigkeit der Endlagerbehälter hängt massgeblich von den Redox-Bedingungen im Tiefenlager ab. Die Stahlkorrosion wird durch reduzierende Verhältnisse stark verlangsamt. Günstig wirken sich die Anwesenheit von Redox-puffernden Mineralen, gesättigte hydrologische Bedingungen und geringe Infiltrationsraten von O_2-haltigem Wasser aus. Daneben haben die Nahfeldmaterialien selbst auch eine ausgeprägte Redox-Pufferwirkung (Stahlbehälter und deren Korrosionsprodukte, puffernde Minerale).
- 'Salinität' – Die Korrosionsbeständigkeit der Endlagerbehälter wird durch die Salinität im Tiefengrundwasser beeinflusst: Hohe Chlorid-Gehalte können die Korrosion der Endlagerbehälter beschleunigen.
- 'pH' – Die Korrosionsbeständigkeit der Endlagerbehälter wird durch den pH-Wert im Tiefengrundwasser beeinflusst. Im HAA-Lager wirkt der Bentonit als pH-Puffer und stellt sicher, dass der pH-Wert im neutralen bis leicht alkalischen Bereich bleibt, in welchem die Stahlkorrosionsraten im Vergleich zu tiefen pH-Werten niedrig sind. Im SMA- bzw. LMA-Lager stellen die grossen Mengen an zementhaltigen Materialien sicher, dass der pH-Wert für lange Zeiten im stark alkalischen Bereich bleibt, in dem die Stahlkorrosionsraten noch niedriger sind als im neutralen bis leicht alkalischen Bereich.

II.1.2 Sicherheitsrelevante Eigenschaften E7/E8: Geometrische Bedingungen (laterale Ausdehnung und Mächtigkeit bzw. Platzangebot unter Berücksichtigung der Tiefenlage und bereichsbegrenzender geologischer Elemente) und geomechanische Bedingungen

Diese sicherheitsrelevanten Eigenschaften werden über die nachfolgend beschriebenen Indikatoren erfasst. Diese Indikatoren werden den SGT-Kriterien *Räumliche Ausdehnung (1.1), Erosion (2.2), Nutzungskonflikte (2.4)* und *Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen (4.1)* zugeordnet.

II.1.2.1 SGT-Kriterium 1.1: Räumliche Ausdehnung

- **Laterale Ausdehnung –** Die laterale Ausdehnung des Wirtgesteins bestimmt mit weiteren Faktoren (z.B. Lagergeometrie, Mächtigkeit, Orientierung des hydraulischen Gradienten etc.) einerseits die Möglichkeiten zur Anordnung der untertägigen Lagerbauten, unter Berücksichtigung der minimal erforderlichen Länge der Freisetzungspfade für Radionuklide innerhalb des Wirtgesteins, und andererseits die vorhandene Flexibilität in Bezug auf noch nicht erkennbare geologische Strukturen/Elemente, denen ausgewichen werden muss, sowie die Platzreserven für Lagererweiterungen.
- ***Mächtigkeit*** – Die Mächtigkeit des Wirtgesteins und seiner Rahmengesteine bestimmt im Wesentlichen die vertikale (in der Regel minimale) Länge der Freisetzungspfade für Radionuklide innerhalb des Wirtgesteins und seiner Rahmengesteine.

- *Platzangebot untertags* – Das Platzangebot untertags bestimmt mit weiteren Faktoren (z.B. Lagergeometrie, Mächtigkeit, Schichtneigung des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs, Orientierung des hydraulischen Gradienten etc.) einerseits die Möglichkeiten zur Anordnung der untertägigen Lagerbauten, unter Berücksichtigung der minimal erforderlichen Länge der Freisetzungspfade für Radionuklide innerhalb des Wirtgesteins, und andererseits die vorhandene Flexibilität in Bezug auf noch nicht erkennbare geologische Strukturen/Elemente, denen ausgewichen werden muss, sowie die Platzreserven für Lagererweiterungen.

Die Verbreitung der bevorzugten Wirtgesteine wird ferner eingeschränkt durch die Tiefenlage und durch bereichsbegrenzende geologische Elemente. Die in diesem Zusammenhang für das SGT-Kriterium 'Räumliche Ausdehnung' potenziell wichtigen Indikatoren sind im Folgenden aufgeführt.

Tiefenlage:

- ***'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit'*** **–** Mit diesem Indikator wird die maximale Tiefenlage der Lagerebene festgelegt. Eine prozessorientierte Beschreibung für diesen Indikator erfolgt unter II.1.2.4.
- **'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf flächenhafte Erosion',** ***'Tiefenlage unter Oberfläche Fels im Hinblick auf glaziale Tiefenerosion'*** und ***'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteins-Dekompaktion'*** – Mit diesen drei Indikatoren wird die minimale Tiefenlage der Wirtgesteins-Obergrenze (bzw. des notwendigen einschlusswirksamen Gebirgsbereichs, falls die Rahmengesteine zur Erfüllung der Anforderungen an die Mächtigkeit notwendig sind) festgelegt. Eine prozessorientierte Beschreibung für die ersten beiden Indikatoren erfolgt unter I.1.1.1 bzw. für den letzten Indikator unter IV.2.1.1.

Bereichsbegrenzende geologische Elemente:

- **'Abstand zu regionalen Störungszonen'** – Als regionale Störungszonen werden Störungen mit einer Längserstreckung im Kilometerbereich betrachtet, die aus Oberflächenkartierungen und/oder Seismikinterpretationen bekannt sind. Zu diesen als Linien kartierten Störungen wird ein Sicherheitsabstand eingehalten, um die Ausdehnung der Zone mit gestörtem Gesteinsverband und die Ungewissheiten im genauen Verlauf der Störungen sowie den Einflussbereich potenziell möglicher differenzieller Bewegungen zu berücksichtigen. Der Abstand geht von einem Richtwert von 200 m aus und wird vergrössert, wo dies durch vorhandene geologische Daten angezeigt ist.
- *'Tektonisches Regime (konzeptionell zu meidende Zonen)'* – Dieser Indikator dient der Beurteilung von Zonen, in denen eine erhöhte neotektonische Aktivität aus konzeptionellen Gründen nicht ausgeschlossen werden kann. Solche Zonen werden gemieden, da sie sich ungünstig auf die Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften und auf die Zuverlässigkeit der entsprechenden geologischen Aussagen auswirken.
- *'Diffus gestörte Zonen'* – Dieser Indikator dient der Erfassung von Zonen mit Anzeichen für erhöhte tektonische Zergliederung der Gesteine. Solche Zonen werden gemieden, da sie sich ungünstig auf die Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften (einschliesslich der geomechanischen Bedingungen) und auf die räumlichen Verhältnisse bzw. auf die Flexibilität/Reserven für die Auslegung der Lagerkammern auswirken (vermehrtes Auftreten von auslegungsbestimmenden Störungszonen).
- 'Abstand zu Fremdgesteinseinschlüssen'* wird durch die Indikatoren ***'Mächtigkeit'*** und *'Platzangebot untertags'* berücksichtigt.

II.1.2.2 SGT-Kriterium 2.2: Erosion

Für die Beschreibung der für dieses SGT-Kriterium potenziell wichtigen Indikatoren wird auf den Abschnitt I.1.1.1 verwiesen:

- **'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf flächenhafte Erosion'**
- ***'Tiefenlage unter Oberfläche Fels im Hinblick auf glaziale Tiefenerosion'***
- **'Grossräumige Erosion im Betrachtungszeitraum'**
- 'Glaziale Tiefenerosion'*

II.1.2.3 SGT-Kriterium 2.4: Nutzungskonflikte

Für die Beschreibung der für dieses SGT-Kriterium potenziell wichtigen Indikatoren wird auf den Abschnitt I.2.2.1 verwiesen:

- **'Rohstoffvorkommen innerhalb des Wirtgesteins'**
- **'Rohstoffvorkommen unterhalb des Wirtgesteins'**
- 'Rohstoffvorkommen oberhalb des Wirtgesteins'
- **'Mineralquellen und Thermen'**
- 'Geothermie'

II.1.2.4 SGT-Kriterium 4.1: Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen

- ***'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit'*** – Die Tiefenlage der Lagerebene beeinflusst die bautechnische Machbarkeit, da mit zunehmender Tiefenlage bzw. Überlagerung die *in-situ* Gebirgsspannungen zunehmen, was die Standfestigkeit und das Deformationsverhalten der ausgebrochenen Hohlräume beeinflusst.
- **'Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften'** – Neben der Tiefenlage haben die felsmechanischen Eigenschaften und Bedingungen im Wirtgestein einen massgeblichen Einfluss auf die bautechnischen Bedingungen während des Baus, Betriebs, der Überwachung und des Verschlusses des geologischen Tiefenlagers sowie im Hinblick auf eine allfällige Rückholung der Abfälle. Die geotechnischen Eigenschaften bestimmen die Art der Ausbruchsicherung und die bautechnischen Massnahmen (Ausbruchquerschnitt, Wahl der Baumethode etc.), um die Lagerkammern – unter Berücksichtigung der sicherheitstechnischen Anforderungen – zuverlässig und sicher erstellen, betreiben, verfüllen und versiegeln zu können.

III Sicherheitsfunktion S4: Verzögerte Freisetzung der Radionuklide ("verzögerte Freisetzung")

Diese Sicherheitsfunktion wird gewährleistet durch das Element des Barrierensystems *Abfallmatrix (B5)*.

III.1 Relevantes Element des Barrierensystems B5: Abfallmatrix

Zur Gewährleistung der Sicherheitsfunktion *verzögerte Freisetzung* durch die *Abfallmatrix* sind die folgenden Eigenschaften sicherheitsrelevant: *Korrosionsbeständigkeit (Eh, pH), speziell nach Behälterversagen (E9)* und *Stabilität der Abfallmatrix dank geringem Wasserfluss (E10)*.

III.1.1 Sicherheitsrelevante Eigenschaft E9: Korrosionsbeständigkeit (Eh, pH), speziell nach Behälterversagen

Diese sicherheitsrelevante Eigenschaft wird über die nachfolgend beschriebenen Indikatoren erfasst. Diese Indikatoren werden dem SGT-Kriterium *Geochemische Bedingungen (1.3)* zugeordnet.

III.1.1.1 SGT-Kriterium 1.3: Geochemische Bedingungen

- **'Redox-Bedingungen'** – Die Korrosionsbeständigkeit der Abfallmatrix – speziell nach Behälterversagen – hängt massgeblich von den Redox-Bedingungen im Tiefenlager ab. Die Korrosion der Abfallmatrix wird durch reduzierende Verhältnisse stark verlangsamt. Günstig wirken sich die Redox-Pufferung durch die Stahlbehälter und deren Korrosionsprodukte sowie die Anwesenheit von puffernden Mineralen, gesättigte hydrologische Bedingungen im Wirtgestein und geringe Infiltrationsraten von O_2-haltigem Wasser aus.
- 'Salinität' – Die Korrosionsbeständigkeit der Abfallmatrix (insbesondere Glasmatrix) kann durch die Salinität im Tiefengrundwasser beeinflusst werden: Hohe Gehalte gewisser Wasserinhaltsstoffe, wie z.B. Mg^{2+}, können die Glaskorrosion beschleunigen.
- 'pH' – Die Korrosionsbeständigkeit der Abfallmatrix (insbesondere Glasmatrix, aber auch aktivierter Stahl) kann durch den pH-Wert im Tiefengrundwasser beeinflusst werden. Die Glaskorrosion wird bei hohen pH-Werten beschleunigt. Im HAA-Lager wirkt der Bentonit als pH-Puffer und stellt sicher, dass der pH-Wert im neutralen bis leicht alkalischen Bereich bleibt, in welchem die Glas- und Stahlkorrosionsraten niedrig sind. Im SMA- bzw. LMA-Lager stellen die grossen Mengen an zementhaltigen Materialien sicher, dass der pH-Wert für lange Zeiten im stark alkalischen Bereich bleibt, in dem die Stahlkorrosionsraten noch niedriger sind als im neutralen bis leicht alkalischen Bereich.

III.1.2 Sicherheitsrelevante Eigenschaft E10: Stabilität der Abfallmatrix dank geringem Wasserfluss

Diese sicherheitsrelevante Eigenschaft wird über die nachfolgend beschriebenen Indikatoren erfasst. Diese Indikatoren werden dem SGT-Kriterium *Hydraulische Barrierenwirkung (1.2)* zugeordnet.

III.1.2.1 SGT-Kriterium 1.2: Hydraulische Barrierenwirkung

Für die Beschreibung der für dieses SGT-Kriterium potenziell wichtigen Indikatoren wird auf den Abschnitt IV.2.1.1 verwiesen:

- ***'Hydraulische Durchlässigkeit'***
- **'Tongehalt'**
- ***'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteins-Dekompaktion'***

IV Sicherheitsfunktionen S5/S6: Radionuklidrückhaltung im Nahfeld und in der Geosphäre ("Rückhaltung") und kleine Freisetzungsraten

Diese Sicherheitsfunktionen werden gewährleistet durch die Elemente des Barrierensystems *Endlagerbehälter (B3), Verfüllung (B6), Verfüllung & Versiegelung (B7)* und *Wirtgestein bzw. einschlusswirksamer Gebirgsbereich (B8).*

IV.1 Relevantes Element des Barrierensystems B3: Endlagerbehälter

Zur Gewährleistung der Sicherheitsfunktionen 'Radionuklidrückhaltung im Nahfeld und in der Geosphäre ("Rückhaltung")' und 'Kleine Freisetzungsraten' durch die *Endlagerbehälter* ist die folgende Eigenschaft sicherheitsrelevant: *Rückhaltung durch degradierten Behälter (Korrosionsprodukte, E11).*

IV.1.1 Sicherheitsrelevante Eigenschaft E11: Rückhaltung durch degradierten Behälter (Korrosionsprodukte)

Diese sicherheitsrelevante Eigenschaft wird über die nachfolgend beschriebenen Indikatoren erfasst. Diese Indikatoren werden dem SGT-Kriterium *Geochemische Bedingungen (1.3)* zugeordnet.

IV.1.1.1 SGT-Kriterium 1.3: Geochemische Bedingungen

Für die Beschreibung der für dieses SGT-Kriterium potenziell wichtigen Indikatoren wird auf die Abschnitte II.1.1.1 und IV.2.1.2 verwiesen:

- **'Redox-Bedingungen'**
- 'Salinität'
- 'pH'

IV.2 Relevante Elemente des Barrierensystems B6/B7: Verfüllung, Verfüllung & Versiegelung

Zur Gewährleistung der Sicherheitsfunktionen 'Radionuklidrückhaltung im Nahfeld und in der Geosphäre ("Rückhaltung")' und 'Kleine Freisetzungsraten' durch die *Verfüllung* und durch *Verfüllung & Versiegelung* sind die folgenden Eigenschaften sicherheitsrelevant: *Stabilität der Verfüll- und Versiegelungsmaterialien (geringe Wasserführung im Wirtgestein, geochemische Bedingungen, E12)* und *Rückhaltung dank günstigen Transporteigenschaften (geringe Wasserführung im Wirtgestein, Löslichkeitslimitierung, Sorption, Diffusion, Kolloidfilter, E13).*

IV.2.1 Sicherheitsrelevante Eigenschaft E12/E13: Stabilität der Verfüll- und Versiegelungsmaterialien (geringe Wasserführung im Wirtgestein, geochemische Bedingungen) und Rückhaltung dank günstigen Transporteigenschaften (geringe Wasserführung im Wirtgestein, Löslichkeitslimitierung, Sorption, Diffusion, Kolloidfilter)

Diese sicherheitsrelevanten Eigenschaften werden über die nachfolgend beschriebenen Indikatoren erfasst. Diese Indikatoren werden den SGT-Kriterien *Hydraulische Barrierenwirkung (1.2)* und *Geochemische Bedingungen (1.3)* zugeordnet.

IV.2.1.1 SGT-Kriterium 1.2: Hydraulische Barrierenwirkung

- ***'Hydraulische Durchlässigkeit'*** **–** Die hydraulische Durchlässigkeit bestimmt (zusammen mit dem hydraulischen Gradienten) den Wasserfluss im Nahfeld und in der Geosphäre und hat dadurch einen massgeblichen Einfluss auf die zeitliche Entwicklung der technischen Barrieren, auf die Radionuklidrückhaltung in den verschiedenen Barrieren und auf die Radionuklidfreisetzung aus dem geologischen Tiefenlager.
- **'Tongehalt' –** Der Tongehalt hat vor allem für Sedimentgesteine einen massgeblichen Einfluss auf die hydraulische Durchlässigkeit und auf die Transmissivität präferenzieller Freisetzungspfade – und damit auf den Wasserfluss im Wirtgestein. Der mittlere Tongehalt wird als Ersatz zur Beurteilung des Wasserflusses im Wirtgestein herangezogen, falls keine Erfahrungswerte für die hydraulische Durchlässigkeit und für die Transmissivität vorliegen.
- ***'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteins-Dekompaktion'*** **–** Dieser Indikator dient der Beurteilung der Auswirkungen von Gesteins-Dekompaktionseffekten auf die Langzeitsicherheit (Dekompaktionseffekte können eine Erhöhung der hydraulischen Durchlässigkeit im Wirtgestein bewirken und damit die Wasserflussraten und Radionuklid-Freisetzungsraten aus den technischen und geologischen Barrieren erhöhen).

IV.2.1.2 SGT-Kriterium 1.3: Geochemische Bedingungen

- **'Redox-Bedingungen' –** Die Redox-Bedingungen beeinflussen die Rückhaltung und die Transporteigenschaften der Radionuklide in den technischen Barrieren (insbesondere Löslichkeit und Sorption der Radionuklide).
- 'Salinität' – Die Salinität hat einen massgeblichen Einfluss auf die Stabilität der Verfüll- und Versiegelungsmaterialen (Quellen, Stabilität und Durchlässigkeit von Bentonit und Bentonit/Sand-Gemischen) sowie auf die Rückhaltung und die Transporteigenschaften der Radionuklide in den technischen Barrieren (insbesondere Sorption der Radionuklide durch Kationenaustausch).
- 'pH' – Der pH-Wert hat einen massgeblichen Einfluss auf die Rückhaltung und die Transporteigenschaften der Radionuklide in den technischen Barrieren (insbesondere Sorption der Radionuklide durch Oberflächenkomplexierung).

IV.3 Relevantes Element des Barrierensystems B8: Wirtgestein bzw. einschlusswirksamer Gebirgsbereich

Zur Gewährleistung der Sicherheitsfunktionen 'Radionuklidrückhaltung im Nahfeld und in der Geosphäre ("Rückhaltung")' und 'Kleine Freisetzungsraten' durch das *Wirtgestein bzw. durch den einschlusswirksamen Gebirgsbereich* sind die folgenden Eigenschaften sicherheitsrelevant: *Rückhaltung (Sorption, beeinflusst durch Mineralogie, Eh, pH, Salinität, mikrobielle Prozesse,*

Einfluss Kolloide, E14), Transporteigenschaften (geringe Wasserführung, vorherrschende Transportprozesse (Advektion, Diffusion), Art und Länge der Freisetzungspfade, E15), Räumliche Ausdehnung Wirtgestein bzw. einschlusswirksamer Gebirgsbereich (E16) und *Geringe lagerbedingte Einflüsse (keine Kurzschlüsse, geringe Beeinträchtigung der Barrierenwirkung des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs, E17).*

IV.3.1 Sicherheitsrelevante Eigenschaft E14: Rückhaltung (Sorption, beeinflusst durch Mineralogie, Eh, pH, Salinität, mikrobielle Prozesse; Einfluss Kolloide)

Diese sicherheitsrelevante Eigenschaft wird über die nachfolgend beschriebenen Indikatoren erfasst. Diese Indikatoren werden dem SGT-Kriterium *Geochemische Bedingungen (1.3)* zugeordnet.

IV.3.1.1 SGT-Kriterium 1.3: Geochemische Bedingungen

- 'Mineralogie' – Die Mineralogie des Wirtgesteins beeinflusst die Rückhaltung der Radionuklide durch Sorption in den geologischen Barrieren. Bei den Sorptionsprozessen unterscheidet man zwischen Kationenaustausch und Oberflächenkomplexierung. Beide Prozesse sind stark abhängig von der (für Radionuklide zugänglichen) Mineralogie des Wirtgesteins.
- 'pH' – Der pH-Wert beeinflusst die Rückhaltung und die Transporteigenschaften der Radionuklide in den geologischen Barrieren (Sorption). Von den beiden oben erwähnten Sorptionsprozessen ist die Oberflächenkomplexierung stark abhängig vom pH-Wert, der Kationenaustausch hingegen nicht.
- **'Redox-Bedingungen' –** Die Redox-Bedingungen beeinflussen die Rückhaltung und die Transporteigenschaften gewisser Radionuklide in den geologischen Barrieren. Dazu gehören die redox-sensitiven Radioelemente U, Pu, Np, Tc und Se. Generell sind diese in ihren tiefsten erreichbaren Oxidationsstufen am wenigsten mobil, reduzierende Bedingungen sind also von Vorteil.
- 'Salinität' – Die Salinität beeinflusst die Rückhaltung und die Transporteigenschaften der Radionuklide in den geologischen Barrieren. Der Kationenaustausch ist charakterisiert durch seine starke Abhängigkeit von der Art der Ionen im Porenwasser und generell von der Ionenstärke, wobei die Sorption von Radionukliden, welche mittels Kationenaustausch sorbieren, mit zunehmender Ionenstärke sinkt. In kompaktierten quellfähigen Tonen wird eine Abnahme der effektiven Diffusivität von Kationen mit zunehmender Ionenstärke beobachtet (Glaus et al. 2008). Im Gegenzug nehmen die effektiven Diffusionskoeffizienten von Anionen mit steigender Ionenstärke zu (Van Loon et al. 2007).
- 'Mikrobielle Prozesse' – Mikrobielle Prozesse können die Rückhaltung und die Transporteigenschaften der Radionuklide in den geologischen Barrieren beeinflussen. Einerseits nimmt man an, dass die für die Rückhaltung günstigen reduzierenden Bedingungen, welche in der Regel im Wirtgestein herrschen, durch mikrobiologische Aktivität gewährleistet werden. Andererseits können sich in Gesteinen mit grösseren Poren und Klüften in seltenen Fällen Biofilme bilden, welche die Sorption und Präzipitation von Radionukliden beeinflussen können.
- 'Kolloide' – Kolloide können Radionuklide transportieren und so deren Mobilität erhöhen. Kolloide spielen in geklüfteten Gesteinen mit advektivem Transport eine viel grössere Rolle als in Gesteinen mit diffusionskontrolliertem Transport und mit günstigen Kolloid- Filtrationseigenschaften.

IV.3.2 Sicherheitsrelevante Eigenschaft E15: Transporteigenschaften (geringe Wasserführung, vorherrschende Transportprozesse (Advektion, Diffusion), Art und Länge der Freisetzungspfade)

Diese sicherheitsrelevante Eigenschaft wird über die nachfolgend beschriebenen Indikatoren erfasst. Diese Indikatoren werden den SGT-Kriterien *Hydraulische Barrierenwirkung (1.2)* und *Freisetzungspfade (1.4)* zugeordnet.

IV.3.2.1 SGT-Kriterium 1.2: Hydraulische Barrierenwirkung

- ***'Hydraulische Durchlässigkeit'*** **–** Siehe Beschreibung in Abschnitt IV.2.1.1.
- **'Tongehalt' –** Siehe Beschreibung in Abschnitt IV.2.1.1.
- ***'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteins-Dekompaktion'*** **–** Siehe Beschreibung in Abschnitt IV.2.1.1.
- 'Grundwasserstockwerke' – Der Grundwasserstockwerkbau liefert einen unabhängigen Hinweis auf die hydraulische Barrierenwirkung des Wirtgesteins bzw. einschlusswirksamen Gebirgsbereichs sowie auf die vorherrschenden Transportprozesse und damit indirekt auch auf die Radionuklidfreisetzungsraten aus dem geologischen Tiefenlager.
- 'Unabhängige Evidenzen der Langzeitisolation' – Unabhängige Evidenzen für das Langzeitisolationsvermögen des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs bestätigen deren hydraulische Barrierenwirkung und tragen wesentlich zur Belastbarkeit der entsprechenden geologischen Aussagen bei (heutige Verhältnisse und Prognostizierbarkeit der zeitlichen Entwicklung).

IV.3.2.2 SGT-Kriterium 1.4: Freisetzungspfade

- 'Art der Transportpfade und Ausbildung des Porenraums' – Die Art der Transportpfade und Ausbildung des Porenraums beeinflusst das Transportverhalten von Radionukliden im Wirtgestein bzw. im einschlusswirksamen Gebirgsbereich. Von besonderer Bedeutung für die Langzeitsicherheit sind Kluftnetzwerke (mit oder ohne 'Channels'), die präferenzielle Freisetzungspfade für Radionuklide bilden können.
- *'Homogenität des Gesteinsaufbaus'* – Der Indikator 'Homogenität des Gesteinsaufbaus' bezieht sich auf allfällig vorhandene Elemente im Wirtgestein bzw. einschlusswirksamen Gebirgsbereich, die eine Mächtigkeit von einigen Metern und eine laterale Ausdehnung von Hunderten von Metern mit signifikant reduzierter Barrierenwirkung aufweisen. Solche Elemente schränken die Möglichkeiten zur vertikalen Platzierung der Lagerebene ein und wirken sich ungünstig auf die Länge der barrierenwirksamen Freisetzungspfade aus.
- 'Länge der Freisetzungspfade' – Die Länge des barrierenwirksamen Transportpfades hat einen massgeblichen Einfluss auf die Radionuklid-Freisetzung aus dem Tiefenlager, da ein grosser Teil der Radionuklide während ihres Transports durch das Wirtgestein und durch allenfalls vorhandene Rahmengesteine zerfällt. Ausserdem ist die Dispersion bei einer pulsförmigen Freisetzung aus dem Nahfeld[74] umso wirksamer, je länger der Freisetzungspfad ist.

---

[74] Verbreiterung mit zugehöriger Reduktion des Maximums bei einer pulsförmigen Freisetzung aus dem Nahfeld in Funktion des Abstands vom Ort der Freisetzung. Dies ist ein wichtiger Mechanismus z.B. für das sicherheitsrelevante Nuklid I-129 bei dessen Freisetzung aus einem BE-Behälter (Nagra 2002c).

- **'Transmissivität präferenzieller Freisetzungspfade' –** Die Transmissivität bestimmt – zusammen mit dem hydraulischen Gradienten – den Wasserfluss entlang präferenzieller Freisetzungspfade. Die Transmissivität hat dadurch einen massgeblichen Einfluss auf die Radionuklidfreisetzung aus dem geologischen Tiefenlager.
- **'Tongehalt' –** Siehe Beschreibung in Abschnitt IV.2.1.1.
- 'Selbstabdichtungsvermögen' – Das Selbstabdichtungsvermögen ist wichtig im Zusammenhang mit der Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften, weil es die Auswirkungen allenfalls entstehender Klüfte (auf die hydraulische Durchlässigkeit) und Störungszonen (auf die Transmissivität) im Hinblick auf die Wasserführung im Wirtgestein begrenzt.

IV.3.3 Sicherheitsrelevante Eigenschaft E16: Räumliche Ausdehnung Wirtgestein bzw. einschlusswirksamer Gebirgsbereich

Diese sicherheitsrelevante Eigenschaft wird über die nachfolgend beschriebenen Indikatoren erfasst. Diese Indikatoren werden dem SGT-Kriterium *Räumliche Ausdehnung (1.1)* zugeordnet.

IV.3.3.1 SGT-Kriterium 1.1: Räumliche Ausdehnung

Für die Beschreibung der für dieses SGT-Kriterium potenziell wichtigen Indikatoren wird auf den Abschnitt II.1.2.1 verwiesen:

- **'Laterale Ausdehnung'**
- ***'Mächtigkeit'***
- *'Platzangebot untertags'*

IV.3.4 Sicherheitsrelevante Eigenschaft E17: Geringe lagerbedingte Einflüsse (keine Kurzschlüsse, geringe Beeinträchtigung der Barrierenwirkung des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs)

Diese sicherheitsrelevante Eigenschaft wird über die nachfolgend beschriebenen Indikatoren erfasst. Diese Indikatoren werden dem SGT-Kriterium *Lagerbedingte Einflüsse (2.3)* zugeordnet.

IV.3.4.1 SGT-Kriterium 2.3: Lagerbedingte Einflüsse

- 'Auflockerungszone im Nahbereich der Untertagebauten' – Die Ausbildung der Auflockerungszone (EDZ[75]) beeinflusst das Transportverhalten der Radionuklide im Nahfeld. Relevant für die Langzeitsicherheit des HAA-Lagers ist die Bildung bzw. das Langzeitverhalten einer EDZ primär im Bereich der Lagerstollen, während die EDZ im Falle des SMA- bzw. LMA-Lagers nur im Bereich der Versiegelungszonen wichtig ist, wo deren Auswirkung auch durch bautechnische Massnahmen minimiert werden kann.
- 'Chemische Wechselwirkungen' – Chemische Wechselwirkungen zwischen den Abfällen und technischen Barrieren einerseits und dem Wirtgestein andererseits haben Einfluss auf

[75] EDZ: Excavation-disturbed zone.

die Langzeitstabilität der Gesteinseigenschaften und auf die *in-situ* Bedingungen und damit auf das langfristige Transportverhalten der Radionuklide im Nahfeld und in der Geosphäre.

- 'Verhalten des Wirtgesteins bzgl. Gas' – Die Freisetzung von im Lager produzierten Gasen kann einen Einfluss auf die Langzeitstabilität der Gesteinseigenschaften und damit auf das langfristige Transportverhalten der Radionuklide im Nahfeld und in der Geosphäre haben. Wichtige Einflussgrössen sind die Gasproduktionsraten, das Gastransport- und Gasspeichervermögen des Wirtgesteins sowie die Möglichkeiten für bauliche Massnahmen zur Speicherung und Ableitung der im Lager produzierten Gase.
- 'Verhalten des Wirtgesteins bzgl. Temperatur' – Die durch radioaktiven Zerfall verursachte Wärmeproduktion im Tiefenlager kann einen Einfluss auf die Langzeitstabilität der Gesteinseigenschaften und damit auf das langfristige Transportverhalten der Radionuklide im Nahfeld und in der Geosphäre haben.
- 'Selbstabdichtungsvermögen' – Das Selbstabdichtungsvermögen ist wichtig im Zusammenhang mit der Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften, weil es die Auswirkungen allenfalls entstehender Klüfte (auf die hydraulische Durchlässigkeit) und Störungszonen (auf die Transmissivität) im Hinblick auf die Wasserführung im Wirtgestein begrenzt (relevant im Zusammenhang mit den Indikatoren 'Auflockerungszone im Nahbereich der Untertagebauten' und 'Verhalten des Wirtgesteins bzgl. Gas').

V Prinzip P1: Zuverlässige Erstellung der geologischen Tiefenlager

Dieses Prinzip wird umgesetzt durch die Elemente des Barrierensystems *Wirtgestein bzw. einschlusswirksamer Gebirgsbereich (B8), Verfüllung und Versiegelung (B7)* und *Geologische Situation (B2).*

V.1 Relevante Elemente des Barrierensystems B8: Wirtgestein bzw. einschlusswirksamer Gebirgsbereich und B7: Verfüllung & Versiegelung

Zur Umsetzung des Prinzips 'Zuverlässige Erstellung der geologischen Tiefenlager' durch das *Wirtgestein bzw. den einschlusswirksamen Gebirgsbereich* und durch die *Verfüllung und Versiegelung* sind die folgenden Eigenschaften sicherheitsrelevant: *Flexibilität/Reserven (räumliche Ausdehnung unter Berücksichtigung der Ungewissheiten in den bereichsbegrenzenden geologischen Elementen und den auslegungsbestimmenden Störungszonen, E18), Geotechnische Eigenschaften (E19).*

V.1.1 Sicherheitsrelevante Eigenschaft E18: Flexibilität/Reserven (räumliche Ausdehnung unter Berücksichtigung der Ungewissheiten in den bereichsbegrenzenden geologischen Elementen und den auslegungsbestimmenden Störungszonen)

Diese sicherheitsrelevante Eigenschaft wird über die nachfolgend beschriebenen Indikatoren erfasst. Diese Indikatoren werden dem SGT-Kriterium *Räumliche Ausdehnung (1.1)* zugeordnet.

V.1.1.1 SGT-Kriterium 1.1: Räumliche Ausdehnung

Für die Beschreibung der für dieses SGT-Kriterium potenziell wichtigen Indikatoren wird auf den Abschnitt II.1.2.1 verwiesen:

- **'Laterale Ausdehnung'**
- ***'Mächtigkeit'***
- *'Platzangebot untertags'*

V.1.2 Sicherheitsrelevante Eigenschaft E19: Geotechnische Eigenschaften

Diese sicherheitsrelevante Eigenschaft wird über die nachfolgend beschriebenen Indikatoren erfasst. Diese Indikatoren werden dem SGT-Kriterium *Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen (4.1)* zugeordnet.

V.1.2.1 SGT-Kriterium 4.1: Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen

- ***'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit'*** – Siehe Beschreibung in Abschnitt II.1.2.4.
- **'Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften'** – Siehe Beschreibung in Abschnitt II.1.2.4.
- 'Aufwand für allfällige Rückholung der Abfälle'* – Berücksichtigt durch die Indikatoren ***'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit'*** und **'Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften'**.

V.2 Relevantes Element des Barrierensystems B2: Geologische Situation

Zur Umsetzung des Prinzips 'Zuverlässige Erstellung der geologischen Tiefenlager' durch die *Geologische Situation* ist die folgende Eigenschaft sicherheitsrelevant: *Geotechnische und hydrogeologische Verhältnisse (E20).*

V.2.1 Sicherheitsrelevante Eigenschaft E20: Geotechnische und hydrogeologische Verhältnisse

Diese sicherheitsrelevante Eigenschaft wird über die nachfolgend beschriebenen Indikatoren erfasst. Diese Indikatoren werden dem SGT-Kriterium *Untertägige Erschliessung und Wasserhaltung (4.2)* zugeordnet.

V.2.1.1 SGT-Kriterium 4.2: Untertägige Erschliessung und Wasserhaltung

- 'Geotechnische und hydrogeologische Verhältnisse in überlagernden Gesteinsformationen' – Beurteilt werden die geotechnischen und hydrogeologischen Verhältnisse in den überlagernden Gesteinsformationen im Hinblick auf die bautechnische Machbarkeit der Zugangsbauwerke zum geologischen Tiefenlager. Diese Verhältnisse bestimmen die bautechnischen Möglichkeiten (Ausbruchquerschnitt, Sicherungsmittel, Wahl der Baumethode etc.), um die erforderlichen Zugangsbauwerke zuverlässig erstellen, betreiben und wieder verfüllen zu können.

- 'Grundwasserleiter'* – Berücksichtigt durch den Indikator 'Geotechnische und hydrogeologische Verhältnisse in überlagernden Gesteinsformationen'.
- **'Natürliche Gasführung (im Wirtgestein)' –** Erdgaseintritte (v.a. Methan) während des Baus, Betriebs und des Verschlusses des Tiefenlagers und die damit verbundene Explosionsgefahr stellen eine Gefährdung der Sicherheit dar und können die zuverlässige Erstellung des Tiefenlagers in Frage stellen.

VI Prinzip P2: Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen

Dieses Prinzip wird umgesetzt durch die Elemente des Barrierensystems *Wirtgestein bzw. einschlusswirksamer Gebirgsbereich (B8)* und *Geologische Situation (B2).*

VI.1 Relevante Elemente des Barrierensystems B8: Wirtgestein bzw. einschlusswirksamer Gebirgsbereich und B2: Geologische Situation

Zur Umsetzung des Prinzips 'Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen' durch das *Wirtgestein bzw. den einschlusswirksamen Gebirgsbereich* und durch die *Geologische Situation* sind die folgenden Eigenschaften sicherheitsrelevant: *Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen (Gesteinseigenschaften, E21), Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen (räumliche Aspekte, E22), Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen (zeitliche Aspekte, E23).*

VI.1.1 Sicherheitsrelevante Eigenschaft E21: Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen (Gesteinseigenschaften)

Diese sicherheitsrelevante Eigenschaft wird über die nachfolgend beschriebenen Indikatoren erfasst. Diese Indikatoren werden dem SGT-Kriterium *Charakterisierbarkeit der Gesteine (3.1)* zugeordnet.

VI.1.1.1 SGT-Kriterium 3.1: Charakterisierbarkeit der Gesteine

- *'Variabilität der Gesteinseigenschaften im Hinblick auf ihre Charakterisierbarkeit'* – Die Variabilität der Gesteinseigenschaften und die Möglichkeiten für ihre zuverlässige Erfassung (Charakterisierbarkeit) haben einen entscheidenden Einfluss auf die Belastbarkeit des Langzeitsicherheitsnachweises. Mit diesem Indikator wird beurteilt, inwiefern die Variabilität in den Gesteinseigenschaften eine zuverlässige Charakterisierung des Wirtgesteins erschwert und damit die Zuverlässigkeit der sicherheitsbezogenen Aussagen beeinträchtigt. Dies betrifft insbesondere höher durchlässige bevorzugte Fliesspfade und deren zuverlässige Lokalisierung und Charakterisierung. Mit geeigneten Anforderungen wird sichergestellt, dass keine Wirtgesteine bevorzugt werden, deren Barrierenwirkung durch präferenzielle Fliesspfade mit ungünstigen Radionuklid-Rückhalteeigenschaften beeinträchtigt sein könnte und die schwierig zu identifizieren und zu charakterisieren sind.
- 'Erfahrungen' – Die bestehenden Erfahrungen im In- und Ausland mit dem zu beurteilenden Wirtgestein oder lithologisch vergleichbaren Gesteinen tragen massgeblich zur Zuverlässigkeit von geologischen Aussagen bei und erhöhen damit die Belastbarkeit des Langzeitsicherheitsnachweises. Beurteilt werden nationale und internationale Erfahrungen mit dem zu beurteilenden Wirtgestein und mit vergleichbaren Gesteinen, namentlich Erfahrungen, die im Zusammenhang mit der Entsorgung radioaktiver Abfälle gesammelt wurden.
- *'Diffus gestörte Zonen'* – Siehe Beschreibung in Abschnitt II.1.2.1.

VI.1.2 Sicherheitsrelevante Eigenschaft E22: Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen (räumliche Aspekte)

Diese sicherheitsrelevante Eigenschaft wird über die nachfolgend beschriebenen Indikatoren erfasst. Diese Indikatoren werden dem SGT-Kriterium *Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse (3.2)* zugeordnet.

VI.1.2.1 SGT-Kriterium 3.2: Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse

- **'Regionales Störungsmuster und Lagerungsverhältnisse'** – Das regionale Störungsmuster und die Lagerungsverhältnisse können die Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen beeinflussen. Mit zunehmender geologisch-tektonischer Komplexität und kleinräumiger Zergliederung des ursprünglichen Gesteinsverbands nimmt die Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse ab.
- 'Kontinuität der interessierenden Schichten' – Die Kontinuität der interessierenden Schichten bezieht sich auf die laterale Kontinuität der Schichten innerhalb wenig zergliederter Bereiche, in denen die Lagerkammern angeordnet werden können. Mit abnehmender Kontinuität der interessierenden Schichten wird die Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse schwieriger.
- 'Explorationsverhältnisse im geologischen Untergrund' – Die Explorationsverhältnisse im geologischen Untergrund haben entscheidenden Einfluss auf die Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen. Dieser Indikator dient der Beurteilung der Wirtgesteine im Hinblick auf die Explorierbarkeit ihrer Geometrie.
- **'Explorationsbedingungen an Oberfläche'** – Die Explorationsbedingungen an der Oberfläche haben einen massgeblichen Einfluss auf die Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen. Die Beurteilung erfolgt anhand der Parameter Topografie, Tiefenlage des verwendbaren seismischen Markerhorizonts, Oberflächennutzung und Ankopplungsbedingungen.

VI.1.3 Sicherheitsrelevante Eigenschaft E23: Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen (zeitliche Aspekte)

Diese sicherheitsrelevante Eigenschaft wird über die nachfolgend beschriebenen Indikatoren erfasst. Diese Indikatoren werden dem SGT-Kriterium *Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen (3.3)* zugeordnet.

VI.1.3.1 SGT-Kriterium 3.3: Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen

- **'Modellvorstellungen zur Geodynamik und Neotektonik'** – Siehe Beschreibung in Abschnitt I.2.1.1.
- 'Seismizität' – Siehe Beschreibung in Abschnitt I.2.1.1.
- *'Tektonisches Regime (konzeptionell zu meidende Zonen)'* – Siehe Beschreibung in Abschnitt II.1.2.1.
- 'Unabhängige Evidenzen der Langzeitisolation' – Siehe Beschreibung in Abschnitt IV.3.2.1.

Tab. 5.3-1: Zusammenhang zwischen den potenziell wichtigen Indikatoren und den Sicherheitsfunktionen bzw. übergeordneten Prinzipien.

Fett markierte Indikatoren repräsentieren Merkmale, welche für die Langzeitsicherheit eines geologischen Tiefenlagers unabdingbar sind; an diese werden deshalb Mindestanforderungen gestellt.

Kursiv markierte Indikatoren repräsentieren Merkmale, die einen sehr ausgeprägten Einfluss auf die Sicherheit haben; an diese werden unter Berücksichtigung potenziell vorhandener grösserer Ungewissheiten verschärfte Anforderungen gestellt.

Indikatoren in Normalschrift repräsentieren Merkmale, die zwar für die Langzeitsicherheit nicht unabdingbar, aber für die Charakterisierung und Bewertung der Varianten wichtig sind und deshalb über die Bewertung (Bewertungsskalen) in die Einengung einfliessen.

Mit * markierte Indikatoren werden durch andere Indikatoren berücksichtigt. Diese Indikatoren werden deshalb im Einengungsverfahren der Etappe 1 nicht explizit verwendet.

Diese Tabelle entspricht Tab. 2.4-1 in Nagra (2008b), enthält aber zusätzlich eine Nummerierung der Sicherheitsfunktionen, Prinzipien, relevanten Elemente des Barrierensystems und sicherheitsrelevanten Eigenschaften.

Sicherheitsfunktion (S), Prinzip (P)	**Relevante Elemente des Barrieren-systems (B)**	**Sicherheits-relevante Eigenschaften (E)**	**Zugeordnete Kriterien gemäss SGT**	**Potenziell wichtige Indikatoren**
I S1 Physische Trennung der Abfälle vom menschlichen Lebensraum ("Isolation") S2 Gewährleistung der erforderlichen Langzeitstabilität des Barrierensystems	B1 Anordnung der Lager-kammern tief im Untergrund	E1 Physische Trennung der Abfälle vom menschlichen Lebensraum E2 Schutz des Lagers vor Pro-zessen und Ereig-nissen an der Erdoberfläche im Betrachtungszeit-raum (z.B. Ero-sion)	2.2 Erosion	**'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf flächenhafte Erosion'** ***'Tiefenlage unter Oberfläche Fels im Hinblick auf glaziale Tiefenerosion'*** **'Grossräumige Erosion im Betrachtungszeitraum'** 'Glaziale Tiefenerosion'* durch ***'Tiefenlage unter Oberfläche Fels im Hinblick auf glaziale Tiefenerosion'*** berücksichtigt. 'Auswirkungen der Klimaentwicklung auf Tiefenlager'* indirekt durch **'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf flächenhafte Erosion'** und ***'Tiefenlage unter Oberfläche Fels im Hinblick auf glaziale Tiefenerosion'*** berücksichtigt [1)].
			2.4 Nutzungs-konflikte	'Tiefenlage unter Oberfläche Fels im Hinblick auf Nutzungs-konflikte'* wird bei **'Rohstoffvorkommen innerhalb des Wirtgesteins'** und **'Rohstoffvorkommen unterhalb des Wirtgesteins'** berücksichtigt.

[1)] Streng genommen ist hier auch der Indikator 'Grossräumige Erosion im Betrachtungszeitraum' relevant; diese Verknüpfung wird bei der Festlegung der Anforderungen an die 'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf flächenhafte Erosion' und 'Tiefenlage unter Oberfläche Fels im Hinblick auf glaziale Tiefenerosion' berücksichtigt (vgl. Kap. 5).

Tab. 5.3-1: (Fortsetzung)

Sicherheitsfunktion (S), Prinzip (P)	**Relevante Elemente des Barrieren-systems (B)**	**Sicherheits-relevante Eigenschaften (E)**	**Zugeordnete Kriterien gemäss SGT**	**Potenziell wichtige Indikatoren**
I S1 Physische Trennung der Abfälle vom menschlichen Lebensraum ("Isolation") S2 Gewährleistung der erforderlichen Langzeitstabilität des Barrierensystems	B2 Geologische Situation	E3 Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigen-schaften E4 Schutz vor unzulässiger Erosion	2.1 Bestän-digkeit der Standort- und Gesteins-eigenschaften	**'Modellvorstellungen zur Geodynamik und Neotektonik'** 'Seismizität' **'Seltene geologische Ereignisse'** [2], berücksichtigt Vulkanismus; hingegen wird die Bruchbildung infolge grosser Erdbeben durch **'Abstand zu regionalen Störungszonen'**, 'Seismizität' und durch eine geeignete Anordnung der Lagerkammern berücksichtigt. Auf die Beurteilung von anderen seltenen Ereignissen (Meteoriteneinschläge) wird bei der Standortevaluation verzichtet, da diese Vorgänge und Ereignisse nicht zwischen verschiedenen Grossräumen der Schweiz diskriminieren. 'Differenzielle Bewegungen'* durch ausreichenden **'Abstand zu regionalen Störungszonen'**, *'Diffus gestörte Zonen'* und *'Tektonisches Regime (konzeptionell zu meidende Zonen)'* bei der Auslegung der Lagerkammern berücksichtigt. 'Selbstabdichtungsvermögen', relevant im Hinblick auf die Begrenzung der Auswirkungen von Bewegungen des Gesteinsverbands (Zerscherung, Reaktivierung von Brüchen und Störungszonen) 'Modellvorstellungen zu geochemischen Vorgängen' **'Potenzial zur Bildung neuer Wasserwegsamkeiten (Verkarstung)'**

[2] Dieser Indikator wird aus den erwähnten Gründen in den nachfolgenden Tabellen 'Seltene geologische Ereignisse (Vulkanismus)' genannt.

Tab. 5.3-1: (Fortsetzung)

Sicherheitsfunktion (S), Prinzip (P)	**Relevante Elemente des Barrieren-systems (B)**	**Sicherheits-relevante Eigenschaften (E)**	**Zugeordnete Kriterien gemäss SGT**	**Potenziell wichtige Indikatoren**
I S1 Physische Trennung der Abfälle vom menschlichen Lebensraum ("Isolation") S2 Gewährleistung der erforderlichen Langzeitstabilität des Barrierensystems	B2 Geologische Situation	E3 Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigen-schaften E4 Schutz vor unzulässiger Erosion	2.2 Erosion	**'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf flächenhafte Erosion'** ***'Tiefenlage unter Oberfläche Fels im Hinblick auf glaziale Tiefenerosion'*** **'Grossräumige Erosion im Betrachtungszeitraum'** 'Glaziale Tiefenerosion'* durch ***'Tiefenlage unter Oberfläche Fels im Hinblick auf glaziale Tiefenerosion'*** berücksichtigt. 'Auswirkungen der Klimaentwicklung auf Tiefenlager'* indirekt durch **'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf flächenhafte Erosion'** und ***'Tiefenlage unter Oberfläche Fels im Hinblick auf glaziale Tiefenerosion'*** berücksichtigt [3)].
		E5 Geringe Wahr-scheinlichkeit von menschlichem Eindringen dank Abwesenheit von absehbaren Nutzungs-konflikten	2.4 Nutzungs-konflikte	**'Rohstoffvorkommen innerhalb des Wirtgesteins'** **'Rohstoffvorkommen unterhalb des Wirtgesteins'** 'Rohstoffvorkommen oberhalb des Wirtgesteins' **'Mineralquellen und Thermen'** 'Geothermie'
II S3 Einschluss der Radionuklide ("Einschluss")	B3 Endlager-behälter B4 Weitere tech-nische Barrieren	E6 Korrosions-beständigkeit	1.3 Geo-chemische Bedingungen	**'Redox-Bedingungen'** 'Salinität' 'pH'

[3)] Streng genommen ist hier auch der Indikator 'Grossräumige Erosion im Betrachtungszeitraum' relevant; diese Verknüpfung wird bei der Festlegung der Anforderungen an die 'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf flächenhafte Erosion' und 'Tiefenlage unter Oberfläche Fels im Hinblick auf glaziale Tiefenerosion' berücksichtigt (vgl. Kap. 5).

Tab. 5.3-1: (Fortsetzung)

Sicherheitsfunktion (S), Prinzip (P)	**Relevante Elemente des Barrieren-systems (B)**	**Sicherheits-relevante Eigenschaften (E)**	**Zugeordnete Kriterien gemäss SGT**	**Potenziell wichtige Indikatoren**
II S3 Einschluss der Radionuklide ("Einschluss")	B3 Endlager-behälter B4 Weitere technische Barrieren	E7 Geometrische Bedingungen (laterale Ausdeh-nung und Mäch-tigkeit bzw. Platz-angebot unter Berücksichtigung der Tiefenlage und bereichs-begrenzender geologischer Elemente) E8 Geomechani-sche Bedingungen	1.1 Räumliche Ausdehnung	**'Laterale Ausdehnung'** ***'Mächtigkeit'*** *'Platzangebot untertags'* Verbreitung eingeschränkt durch: (i) Tiefenlage: ***'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit'***, **'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf flächenhafte Erosion'**, ***'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteins-Dekompaktion'***, ***'Tiefenlage unter Oberfläche Fels im Hinblick auf glaziale Tiefenerosion'*** (ii) Bereichsbegrenzende geologische Elemente: **'Abstand zu regionalen Störungszonen'**, *'Tektonisches Regime (konzeptionell zu meidende Zonen)'*, *'Diffus gestörte Zonen'*, 'Abstand zu Fremd-gesteinseinschlüssen'* durch ausreichende ***'Mächtigkeit'*** und *'Platzangebot untertags'* berücksichtigt.
			2.2 Erosion	**'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf flächenhafte Erosion'** ***'Tiefenlage unter Oberfläche Fels im Hinblick auf glaziale Tiefenerosion'*** **'Grossräumige Erosion im Betrachtungszeitraum'** 'Glaziale Tiefenerosion'* durch ***'Tiefenlage unter Oberfläche Fels im Hinblick auf glaziale Tiefenerosion'*** berücksichtigt.
			2.4 Nutzungs-konflikte	**'Rohstoffvorkommen innerhalb des Wirtgesteins'** **'Rohstoffvorkommen unterhalb des Wirtgesteins'** 'Rohstoffvorkommen oberhalb des Wirtgesteins' **'Mineralquellen und Thermen'** 'Geothermie'

Tab. 5.3-1: (Fortsetzung)

Sicherheitsfunktion (S), Prinzip (P)	**Relevante Elemente des Barrieren-systems (B)**	**Sicherheits-relevante Eigenschaften (E)**	**Zugeordnete Kriterien gemäss SGT**	**Potenziell wichtige Indikatoren**
II S3 Einschluss der Radionuklide ("Einschluss")	B3 Endlager-behälter B4 Weitere technische Barrieren	E7 Geometrische Bedingungen (laterale Ausdeh-nung und Mäch-tigkeit bzw. Platz-angebot unter Berücksichtigung der Tiefenlage und bereichs-begrenzender geologischer Elemente) E8 Geomechani-sche Bedingungen	4.1 Fels-mechanische Eigenschaften und Bedingun-gen	***'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit'*** **'Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften'**
III S4 Verzögerte Freisetzung der Radionuklide ("verzögerte Freisetzung")	B5 Abfallmatrix	E9 Korrosionsbe-ständigkeit (Eh, pH), speziell nach Behälterversagen	1.3 Geo-chemische Bedingungen	**'Redox-Bedingungen'** 'Salinität' 'pH'
		E10 Stabilität der Abfallmatrix dank geringem Wasserfluss	1.2 Hydrau-lische Barrieren-wirkung	***'Hydraulische Durchlässigkeit'*** **'Tongehalt'** ***'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteins-Dekompaktion'***

Tab. 5.3-1: (Fortsetzung)

Sicherheitsfunktion (S), Prinzip (P)	**Relevante Elemente des Barrieren-systems (B)**	**Sicherheits-relevante Eigenschaften (E)**	**Zugeordnete Kriterien gemäss SGT**	**Potenziell wichtige Indikatoren**
IV S5 Radionuklidrück-haltung im Nahfeld und in der Geosphäre ("Rückhaltung") S6 Kleine Freisetzungsraten	B3 Endlager-behälter	E11 Rückhaltung durch degradier-ten Behälter (Kor-rosionsprodukte)	1.3 Geo-chemische Bedingungen	**'Redox-Bedingungen'** 'Salinität' 'pH'
	B6 Verfüllung B7 Verfüllung & Versiegelung	E12 Stabilität der Verfüll- und Versiegelungs-materialien (geringe Wasser-führung im Wirt-gestein, geoche-mische Bedingun-gen) E13 Rückhaltung dank günstigen Transporteigen-schaften (geringe Wasserführung im Wirtgestein, Lös-lichkeitslimitie-rung, Sorption, Diffusion, Kolloidfilter)	1.2 Hydrau-lische Barrie-renwirkung	***'Hydraulische Durchlässigkeit'*** **'Tongehalt'** ***'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteins-Dekompaktion'***
			1.3 Geo-chemische Bedingungen	**'Redox-Bedingungen'** 'Salinität' 'pH'
	B8 Wirtgestein bzw. einschluss-wirksamer Gebirgsbereich	E14 Rückhaltung (Sorption, beein-flusst durch Mine-ralogie, Eh, pH, Salinität, mikro-bielle Prozesse; Einfluss Kolloide)	1.3 Geo-chemische Bedingungen	'Mineralogie' 'pH' **'Redox-Bedingungen'** 'Salinität' 'Mikrobielle Prozesse' 'Kolloide'

Tab. 5.3-1: (Fortsetzung)

Sicherheitsfunktion (S), Prinzip (P)	**Relevante Elemente des Barrieren-systems (B)**	**Sicherheits-relevante Eigenschaften (E)**	**Zugeordnete Kriterien gemäss SGT**	**Potenziell wichtige Indikatoren**
IV S5 Radionuklidrück-haltung im Nahfeld und in der Geosphäre ("Rückhaltung") S6 Kleine Freisetzungsraten	B8 Wirtgestein bzw. einschluss-wirksamer Gebirgsbereich	E15 Transport-eigenschaften (geringe Wasser-führung, vorherr-schende Trans-portprozesse (Advektion, Diffusion), Art und Länge der Freisetzungs-pfade)	1.2 Hydrau-lische Barrie-renwirkung	***'Hydraulische Durchlässigkeit'*** **'Tongehalt'** ***'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteins-Dekompaktion'*** 'Grundwasserstockwerke' 'Unabhängige Evidenzen der Langzeitisolation'
			1.4 Frei-setzungspfade	'Art der Transportpfade und Ausbildung des Porenraums' *'Homogenität des Gesteinsaufbaus'* 'Länge der Freisetzungspfade' **'Transmissivität präferenzieller Freisetzungspfade'** **'Tongehalt'** 'Selbstabdichtungsvermögen'
		E16 Räumliche Ausdehnung Wirtgestein bzw. einschlusswirk-samer Gebirgs-bereich	1.1 Räumliche Ausdehnung	**'Laterale Ausdehnung'** ***'Mächtigkeit'*** *'Platzangebot untertags'* Platzangebot eingeschränkt durch: (i) Tiefenlage: ***'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit'***, **'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf flächenhafte Erosion'**, ***'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteins-Dekompaktion'***, ***'Tiefenlage unter Oberfläche Fels im Hinblick auf glaziale Tiefenerosion'*** (ii) Bereichsbegrenzende geologische Elemente: **'Abstand zu regionalen Störungszonen'**, *'Tektonisches Regime (konzeptionell zu meidende Zonen)'*, *'Diffus gestörte Zonen'*, 'Abstand zu Fremd-gesteinseinschlüssen'* durch ausreichende ***'Mächtigkeit'*** und *'Platzangebot untertags'* berücksichtigt.

Tab. 5.3-1: (Fortsetzung)

Sicherheitsfunktion (S), Prinzip (P)	**Relevante Elemente des Barrieren-systems (B)**	**Sicherheits-relevante Eigenschaften (E)**	**Zugeordnete Kriterien gemäss SGT**	**Potenziell wichtige Indikatoren**
IV S5 Radionuklidrück-haltung im Nahfeld und in der Geosphäre ("Rückhaltung") S6 Kleine Freisetzungsraten	B8 Wirtgestein bzw. einschluss-wirksamer Gebirgsbereich	E17 Geringe lagerbedingte Einflüsse (keine Kurzschlüsse, geringe Beein-trächtigung der Barrierenwirkung des Wirtgesteins bzw. des ein-schlusswirksamen Gebirgsbereichs)	2.3 Lager-bedingte Einflüsse	'Auflockerungszone im Nahbereich der Untertagebauten' 'Chemische Wechselwirkungen' 'Verhalten des Wirtgesteins bzgl. Gas' 'Verhalten des Wirtgesteins bzgl. Temperatur' 'Selbstabdichtungsvermögen' Die potenziellen Auswirkungen lagerbedingter Einflüsse werden durch angemessene bauliche und betriebliche Massnahmen begrenzt.
V P1 Zuverlässige Erstellung der geo-logischen Tiefenlager: Zuverlässigkeit der Implementierung Zuverlässigkeit des Lagerverschlusses Sicherheit während des Betriebs	B8 Wirtgestein bzw. einschluss-wirksamer Gebirgsbereich	E18 Flexibilität / Reserven (räum-liche Ausdehnung unter Berücksich-tigung der Unge-wissheiten in den bereichsbegrenzen den geologischen Elementen und den auslegungs-bestimmenden Störungszonen)	1.1 Räumliche Ausdehnung	**'Laterale Ausdehnung'** ***'Mächtigkeit'*** *'Platzangebot untertags'* Platzangebot eingeschränkt durch: (i) Tiefenlage: ***'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit'***, **'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf flächenhafte Erosion'**, ***'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteins-Dekompaktion'***, ***'Tiefenlage unter Oberfläche Fels im Hinblick auf glaziale Tiefenerosion'*** (ii) Bereichsbegrenzende geologische Elemente: **'Abstand zu regionalen Störungszonen'**, *'Tektonisches Regime (konzep-tionell zu meidende Zonen)'*, *'Diffus gestörte Zonen'*, 'Abstand zu Fremdgesteinseinschlüssen'* durch ausreichende ***'Mächtigkeit'*** und *'Platzangebot untertags'* berücksichtigt.

Tab. 5.3-1: (Fortsetzung)

Sicherheitsfunktion (S), Prinzip (P)	**Relevante Elemente des Barrierensystems (B)**	**Sicherheitsrelevante Eigenschaften (E)**	**Zugeordnete Kriterien gemäss SGT**	**Potenziell wichtige Indikatoren**
V P1 Zuverlässige Erstellung der geologischen Tiefenlager: Zuverlässigkeit der Implementierung	B8 Wirtgestein bzw. einschlusswirksamer Gebirgsbereich B7 Verfüllung & Versiegelung	E19 Geotechnische Eigenschaften	4.1 Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen	***'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit'*** **'Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften'** 'Aufwand für allfällige Rückholung der Abfälle'* durch ***'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit'*** und **'Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften'** berücksichtigt.
Zuverlässigkeit des Lagerverschlusses Sicherheit während des Betriebs	B2 Geologische Situation	E20 Geotechnische und hydrogeologische Verhältnisse	4.2 Untertägige Erschliessung und Wasserhaltung	'Geotechnische und hydrogeologische Verhältnisse in überlagernden Gesteinsformationen' 'Grundwasserleiter'* durch 'Geotechnische und hydrogeologische Verhältnisse in überlagernden Gesteinsformationen' berücksichtigt. **'Natürliche Gasführung (im Wirtgestein)'**
VI P2 Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen: Charakterisierbarkeit	B8 Wirtgestein bzw. einschlusswirksamer Gebirgsbereich	E21 Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen (Gesteinseigenschaften)	3.1 Charakterisierbarkeit der Gesteine	*'Variabilität der Gesteinseigenschaften im Hinblick auf ihre Charakterisierbarkeit'* 'Erfahrungen' *'Diffus gestörte Zonen'*
Explorierbarkeit Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen	B2 Geologische Situation	E22 Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen (räumliche Aspekte)	3.2 Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse	**'Regionales Störungsmuster und Lagerungsverhältnisse'** 'Kontinuität der interessierenden Schichten' 'Explorationsverhältnisse im geologischen Untergrund' **'Explorationsbedingungen an Oberfläche'**
	B2 Geologische Situation B8 Wirtgestein bzw. einschlusswirksamer Gebirgsbereich	E23 Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen (zeitliche Aspekte)	3.3 Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen	**'Modellvorstellungen zur Geodynamik und Neotektonik'** 'Seismizität' *'Tektonisches Regime (konzeptionell zu meidende Zonen)'* 'Unabhängige Evidenzen der Langzeitisolation'

5.3.3 Festlegung der im Einengungsverfahren verwendeten Indikatoren und Erläuterung im Kontext der Vorgaben aus dem SGT, Anhang I

Die in Tab. 5.3-1 mit dem Symbol * speziell markierten Indikatoren sowie der Indikator 'Seltene geologische Ereignisse' (mit Ausnahme des Vulkanismus) werden im Einengungsverfahren nicht explizit berücksichtigt. In Tab. 5.3-2 wird für diese Indikatoren aufgezeigt, weshalb sie nicht berücksichtigt werden bzw. durch welche anderen Indikatoren sie abgedeckt sind.

Tab. 5.3-2: Liste der im Einengungsverfahren nicht explizit berücksichtigen Indikatoren und Begründung für ihre Nichtberücksichtigung.

Nicht explizit berücksichtigte Indikatoren	**Gründe für Nichtberücksichtigung**
Tiefenlage unter Oberfläche Fels im Hinblick auf Nutzungskonflikte	Dieser Indikator wird indirekt berücksichtigt durch die Indikatoren 'Rohstoffvorkommen innerhalb des Wirtgesteins' und 'Rohstoffvorkommen unterhalb des Wirtgesteins'. Die Beurteilung der Beeinträchtigung des Lagers durch Nutzungskonflikte durch allenfalls im Wirtgestein oder in darunter liegenden Gesteinsformationen vorkommende Rohstoffe hängt ab von der Tiefenlage der betreffenden Gesteinsformationen. Wenn die gleiche Gesteinsformation bzw. der gleiche Rohstoff in verschiedenen Tiefenlagen vorkommt, ist es wirtschaftlicher, das Vorkommen mit der geringeren Tiefenlage auszubeuten; in diesem Sinn bietet eine grössere Tiefenlage einen besseren Schutz vor unabsichtlichem menschlichen Eindringen. Dies wird bei den oben genannten Indikatoren berücksichtigt.
Glaziale Tiefenerosion	Die Beurteilung der Beeinträchtigung eines Tiefenlagers durch glaziale Erosion (Bildung von übertieften Felsrinnen) erfolgt primär anhand der Tiefenlage unter Felsoberfläche, d.h. in der Form einer quantitativen Anforderung an die Gesteinsüberdeckung. Da sich eine zukünftige glaziale Tiefenerosion nicht zwingend auf die bestehenden übertieften Felsrinnen beschränkt, werden auch Anforderungen an die Gesteinsüberdeckung ausserhalb der übertieften Felsrinnen gestellt. Ferner wird bei der Bewertung der Bereiche berücksichtigt, ob sie ausserhalb der Haupttäler liegen.
Seltene geologische Ereignisse	Unter seltenen geologischen Ereignissen werden Vulkanismus sowie eine mögliche Bruchbildung im Zusammenhang mit starken Erdbeben verstanden; andere seltene Ereignisse (z.B. Meteoriteneinschläge) werden ebenfalls unter diesem Titel aufgeführt. Vulkanismus wird im Einengungsverfahren explizit berücksichtigt. Die Bruchbildung infolge früherer starker Erdbeben wird unter dem Indikator 'Abstand zu regionalen Störungszonen' erfasst. Zukünftige (seltene) starke Erdbeben werden unter dem Indikator 'Seismizität' diskutiert. Auf die Beurteilung von anderen seltenen Ereignissen (z.B. Meteoriteneinschläge) wird bei der Standortevaluation verzichtet, da diese Vorgänge und Ereignisse nicht zwischen verschiedenen Grossräumen der Schweiz diskriminieren bzw. in Übereinstimmung mit HSK & KSA (1993) und HSK (2008a) in Sicherheitsanalysen nicht zu betrachten sind.

Tab. 5.3-2: (Fortsetzung)

Nicht explizit berücksichtigte Indikatoren	**Gründe für Nichtberücksichtigung**
Auswirkungen der Klimaentwicklung auf Tiefenlager	Allfällige Auswirkungen von zukünftigen Klimaentwicklungen auf das Tiefenlager sind im Zusammenhang mit langfristigen Erosionsprozessen (z.B. lokale Einebnung) zu erwarten. Diese werden aufgrund der 'Grossräumigen Erosion im Betrachtungszeitraum', 'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf flächenhafte Erosion' und der 'Tiefenlage unter Oberfläche Fels im Hinblick auf glaziale Tiefenerosion' beurteilt.
Differenzielle Bewegungen	Allfällige Auswirkungen differenzieller Bewegungen auf das Tiefenlager werden vermieden durch (i) die Anforderung, dass es innerhalb des Betrachtungszeitraums zu keiner schwerwiegenden grossräumigen Gefährdung der geologischen Stabilität aus Gründen der Geodynamik bzw. Neotektonik kommen darf und durch die Anforderungen an die Hebungs- bzw. Erosionsraten (grossräumig), sowie (ii) durch einen ausreichenden Abstand zu regionalen Störungszonen, konzeptionell zu meidenden Zonen und diffus gestörten Zonen (kleinräumig).
Abstand zu Fremdgesteins-einschlüssen	Für das HAA-Lager kommen nur Wirtgesteine in Betracht, die in ihrer Barrierenwirkung auf grösserem Massstab homogen sind, d.h. die keine Fremdgesteinseinschlüsse enthalten (vgl. Anforderungen für den Indikator 'Homogenität des Gesteinsaufbaus'); dies entspricht auch den internationalen Gepflogenheiten für ein HAA-Lager. Im Falle des SMA-Lagers wird einerseits mittels einer ausreichenden Mächtigkeit des Wirtgesteins sichergestellt, dass allenfalls vorhandenen, flächenhaften Fremdgesteinseinschlüssen (z.B. mehrere Meter mächtige Sandstein-lagen oder Kalkbänke) bei der Platzierung des Lagers ausgewichen werden kann. Andererseits werden bei lokalen Wirtgesteinsvorkommen (tektonische Akkumulationen) ausreichende Reserven für das Platzangebot untertags vorgesehen, damit Fremdgesteinseinschlüssen ausgewichen werden kann.
Aufwand für allfällige Rückholung der Abfälle	Der Aufwand für eine allfällige Rückholung der Abfälle, der zu einem gewissen Mass von der geologischen Situation und dem Wirtgestein abhängt, wird durch die Indikatoren 'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit' und 'Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften' berücksichtigt.
Grundwasserleiter	Die Beurteilung von oberflächennahen Grundwasserleitern (inkl. Quartär) wird unter 'Geotechnische und hydrogeologische Verhältnisse in überlagernden Gesteinsformationen' vorgenommen. Eine vertiefte Beurteilung erfolgt in Etappe 2.

Nach Eliminierung dieser Indikatoren ergibt sich eine Liste von Indikatoren, die in der Umsetzung des Einengungsverfahrens in Etappe 1 verwendet werden. Tab. 5.3-3 fasst diese in der Einengungsprozedur verwendeten Indikatoren zusammen und zeigt die Art der Verwendung der Indikatoren (Mindestanforderung, verschärfte Anforderung, Bewertungsskala), die sich aus Tab. 5.3-1 ergibt.

Mit wenigen Ausnahmen werden alle aufgeführten Indikatoren auch explizit in die Beurteilung mittels Bewertungsskalen einbezogen. Die Ausnahmen betreffen diejenigen Indikatoren, die in der Beurteilung stellvertretend durch andere Indikatoren berücksichtigt werden, nämlich den

Indikator 'Tongehalt', der durch den Indikator 'Selbstabdichtungsvermögen' abgedeckt wird, und die Indikatoren 'Abstand zu regionalen Störungszonen', 'Tektonisches Regime (konzeptionell zu meidende Zonen)' und 'Diffus gestörte Zonen', die bei der Bereichsabgrenzung ('Laterale Ausdehnung', 'Platzangebot untertags)' eine wichtige Rolle spielen und für die sich eine Bewertung erübrigt.

In Tab. 5.3-4 werden die verwendeten Indikatoren im Kontext der Vorgaben aus dem SGT erläutert, d.h. unter Angabe der dadurch berücksichtigten Aspekte und Indikatoren aus dem SGT, Anhang I. Die Zuordnung der verwendeten Indikatoren zu den SGT-Kriterien entspricht derjenigen in Tab. 5.3-1. Die Erläuterungen in Tab. 5.3-4 zeigen im Detail auf, wie die im SGT vorgegebenen Kriterien durch die verwendeten Indikatoren abgedeckt werden und wie die im SGT aufgeführten zu beurteilenden Aspekte sowie die Hinweise auf Indikatoren gemäss SGT (Tabelle 1 bzw. Tabellen A1-1 bis A1-14 im SGT) in das Einengungsverfahren eingeflossen sind. Die Tabelle vertieft auch die Zusammenhänge zwischen den verwendeten Indikatoren. Die Analyse zeigt, dass die im SGT vorgegebenen Kriterien (inkl. der zu beurteilenden Aspekte) durch die verwendete Einengungsprozedur (Indikatoren und ihre Anwendung) adäquat abgebildet werden.

Tab. 5.3-3: Liste der im Einengungsverfahren verwendeten Indikatoren.

Die Reihenfolge der Indikatoren folgt der Liste der Kriterien gemäss SGT (vgl. Kriterien-Nummern in erster Spalte). Jeder Indikator wird nur einmal aufgeführt, auch wenn er in der Einengungsprozedur mehrmals (für verschiedene Kriterien) verwendet wird. Diese Tabelle ist identisch mit Tab. 2.4-2 in Nagra (2008b).

Fett markierte Indikatoren repräsentieren Merkmale, welche für die Langzeitsicherheit eines geologischen Tiefenlagers unabdingbar sind; an diese werden deshalb Mindestanforderungen (MA) gestellt.

Kursiv markierte Indikatoren repräsentieren Merkmale, die einen sehr ausgeprägten Einfluss auf die Sicherheit haben; an diese werden unter Berücksichtigung potenziell vorhandener grösserer Ungewissheiten verschärfte Anforderungen (VA) gestellt.

Indikatoren in Normalschrift repräsentieren Merkmale, die zwar für die Langzeitsicherheit nicht unabdingbar, aber für die Charakterisierung und Bewertung der Varianten wichtig sind und deshalb über die Bewertung (Bewertungsskalen, BS) in die Einengung einfliessen. Mit wenigen Ausnahmen werden alle Indikatoren in die Bewertung einbezogen.

(×): Anwendung nur für HAA-Lager

SGT-Kriterien	**Verwendete Indikatoren**	**MA**	**VA**	**BS**
1.1 Räumliche Ausdehnung	***Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit***	×	×	×
	Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteins-Dekompaktion	×	×	×
	Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf flächenhafte Erosion	×		×
	Tiefenlage unter Oberfläche Fels im Hinblick auf glaziale Tiefenerosion	×	×	×
	Mächtigkeit	×	×	×
	Abstand zu regionalen Störungszonen	×		
	Laterale Ausdehnung	×		×
	Platzangebot untertags		×	×
1.2 Hydraulische Barrierenwirkung	***Hydraulische Durchlässigkeit***	×	×	×
	Grundwasserstockwerke			×
1.3 Geochemische Bedingungen	Mineralogie			×
	pH			×
	Redox-Bedingungen	×		×
	Salinität			×
	Mikrobielle Prozesse			×
	Kolloide			×
1.4 Freisetzungspfade	Art der Transportpfade und Ausbildung des Porenraums			×
	Homogenität des Gesteinsaufbaus		(×)	×
	Länge der Freisetzungspfade			×
	Transmissivität präferenzieller Freisetzungspfade	×		×
	Tongehalt	×		
	Selbstabdichtungsvermögen			×

Tab. 5.3-3: (Fortsetzung)

SGT-Kriterien	Verwendete Indikatoren	MA	VA	BS
2.1 Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften	**Modellvorstellungen zur Geodynamik und Neotektonik**	×		×
	Seismizität			×
	Modellvorstellungen zu geochemischen Vorgängen [1)]			×
	Seltene geologische Ereignisse (Vulkanismus)	×		×
	Potenzial zur Bildung neuer Wasserwegsamkeiten (Verkarstung)	×		×
2.2 Erosion	**Grossräumige Erosion im Betrachtungszeitraum**	×		×
2.3 Lagerbedingte Einflüsse	Auflockerungszone im Nahbereich der Untertagebauten			×
	Chemische Wechselwirkungen			×
	Verhalten des Wirtgesteins bzgl. Gas			×
	Verhalten des Wirtgesteins bzgl. Temperatur			(×)
2.4 Nutzungskonflikte	**Rohstoffvorkommen innerhalb des Wirtgesteins**	×		×
	Rohstoffvorkommen unterhalb des Wirtgesteins	×		×
	Rohstoffvorkommen oberhalb des Wirtgesteins			×
	Mineralquellen und Thermen	×		×
	Geothermie			×
3.1 Charakterisierbarkeit der Gesteine	*Diffus gestörte Zonen*		×	
	Variabilität der Gesteinseigenschaften im Hinblick auf ihre Charakterisierbarkeit		×	×
	Erfahrungen			×
3.2 Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse	**Regionales Störungsmuster und Lagerungsverhältnisse**	×		×
	Kontinuität der interessierenden Schichten			×
	Explorationsverhältnisse im geologischen Untergrund			×
	Explorationsbedingungen an Oberfläche	×		×
3.3 Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen	*Tektonisches Regime (konzeptionell zu meidende Zonen)*		×	
	Unabhängige Evidenzen der Langzeitisolation			×
4.1 Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen	**Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften**	×		×
4.2 Untertägige Erschliessung und Wasserhaltung	Geotechnische und hydrogeologische Verhältnisse in überlagernden Gesteinsformationen			×
	Natürliche Gasführung (im Wirtgestein)	×		×

[1)] Nur für Beschreibung verwendet.

Tab. 5.3-4: Erläuterung der im Einengungsverfahren verwendeten Indikatoren im Kontext der Vorgaben aus dem SGT, Anhang I.

Die Zuordnung der verwendeten Indikatoren zu den SGT-Kriterien entspricht derjenigen in Tab. 5.3-1. Die Erläuterung der verwendeten Indikatoren erfolgt anhand der zu beurteilenden Aspekte und Indikatoren aus dem SGT, Anhang I.

Fett markierte Indikatoren repräsentieren Merkmale, welche für die Langzeitsicherheit eines geologischen Tiefenlagers unabdingbar sind; an diese werden deshalb Mindestanforderungen (MA) gestellt.

Kursiv markierte Indikatoren repräsentieren Merkmale, die einen sehr ausgeprägten Einfluss auf die Sicherheit haben; an diese werden unter Berücksichtigung potenziell vorhandener grösserer Ungewissheiten verschärfte Anforderungen (VA) gestellt.

Indikatoren in Normalschrift repräsentieren Merkmale, die zwar für die Langzeitsicherheit nicht unabdingbar, aber für die Charakterisierung und Bewertung der Varianten wichtig sind und deshalb über die Bewertung (Bewertungsskalen) in die Einengung einfliessen.

Diese Tabelle ist identisch mit Tab. B-1 in Nagra (2008b)

Erklärung der Bedeutung des Symbols *: Am Ende der Tabelle (S. 199).

Nr.	**SGT-Kriterium**	**Verwendete Indikatoren**	**Erläuterung der verwendeten Indikatoren** Hinweise auf Indikatoren (**fett**) bzw. zu beurteilende Aspekte (*kursiv*) aus dem SGT, Anhang I
1.1	Räumliche Ausdehnung	***Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit***	Das *räumliche Eignungspotenzial* bzw. das ***Platzangebot*** des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs wird mit den Indikatoren ***Mächtigkeit*** und ***laterale Ausdehnung*** in geeigneter ***Tiefenlage*** erfasst, unter Berücksichtigung (ausreichender Abstand) der bereichsbegrenzenden Elemente (*potenziell aktive oder reaktivierbare Störungen* (***regionale Störungszonen***), konzeptionell zu meidende Zonen, diffus gestörte Zonen). ***Glazial übertiefte Talrinnen***, welche die ***laterale Ausdehnung*** ebenfalls beschränken können, werden stellvertretend durch den Indikator ***Tiefenlage*** *unter Oberfläche Fels* erfasst. ***Fremdgesteinseinschlüsse*** werden durch Reserven bzgl. ***Mächtigkeit*** und ***Platzangebot*** berücksichtigt. Ein Vergleich zwischen dem *Platzbedarf* für ein Tiefenlager und dem ***Platzangebot*** gibt Aufschluss über die vorhandenen ***Reserven*** und die ***Flexibilität*** bei der Platzierung des Tiefenlagers.
		Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteins-Dekompaktion	
		Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf flächenhafte Erosion	
		Tiefenlage unter Oberfläche Fels im Hinblick auf glaziale Tiefenerosion	
		Mächtigkeit	
		Abstand zu regionalen Störungszonen *	
		Laterale Ausdehnung	
		Tektonisches Regime (konzeptionell zu meidende Zonen) *	
		Diffus gestörte Zonen *	
		Platzangebot untertags	

Tab. 5.3-4: (Fortsetzung)

Nr.	SGT-Kriterium	Verwendete Indikatoren	Erläuterung der verwendeten Indikatoren Hinweise auf Indikatoren (**fett**) bzw. zu beurteilende Aspekte (*kursiv*) aus dem SGT, Anhang I
1.2	Hydraulische Barrieren-wirkung	***Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteins-Dekompaktion***	Die ***Tiefenlage*** unter Terrain gibt Aufschluss über die Gesteins-Dekompaktion, welche eine Erhöhung der ***hydraulischen Durch-lässigkeit*** bewirken könnte.
		Hydraulische Durchlässigkeit **Tongehalt ***	Die hydraulische Barrierenwirkung ergibt sich aus den Eigenschaften des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs bezüglich *Wasserführung* und *Stofftransport*. Die Wasserflussrate ergibt sich aus dem Produkt der ***hydraulischen Durchlässigkeit*** und dem ***hydraulischen Gradienten***. Der *Stofftransport* wird durch die ***vorherrschenden Transportprozesse*** bestimmt (***Diffusion*** in sehr dichten Gesteinen, ***Advektion***/Dispersion in durch-lässigeren Gesteinen). Ist die ***hydraulische Durchlässigkeit*** nicht bekannt, so wird bei Sedimentgesteinen (ausser Evaporiten) stellvertretend der ***Tongehalt*** als Indikator herangezogen. Der ***Tongehalt*** des Gesteins ist ebenfalls relevant für das ***Selbstabdichtungsvermögen.***
		Unabhängige Evidenzen der Langzeitisolation Grundwasserstockwerke	***Unabhängige Evidenzen der Langzeit-isolation*** untermauern die Aussagen zum Isolationsvermögen des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs. Dazu gehören u.a. die *hydrochemische Gliederung* (Einschluss *alter Porenwässer*, ***Verweilzeiten der Tiefenwässer***, Existenz von natürlichen *Tracerprofilen*) und die hydraulische Gliederung (Existenz von ***Grundwasserstockwerken***).
1.3	Geochemische Bedingungen	Mineralogie pH **Redox-Bedingungen** Salinität Mikrobielle Prozesse Kolloide	Die Geochemie bzw. die *geochemischen Bedingungen* prägen das Langzeitverhalten der technischen Barrieren und die Radio-nuklidrückhaltung/-retardation im gesamten Barrierensystem (Mobilisierung, *begrenzte Löslichkeit*, ***Sorptionsvermögen***, Einfluss Kolloide): ***Mineralogie, pH***, ***Redox-Bedingungen*** (Redox-Pufferkapazität, Eh), ***Salinität***, ***mikrobielle Prozesse***.

Tab. 5.3-4: (Fortsetzung)

Nr.	SGT-Kriterium	Verwendete Indikatoren	Erläuterung der verwendeten Indikatoren Hinweise auf Indikatoren (**fett**) bzw. zu beurteilende Aspekte (*kursiv*) aus dem SGT, Anhang I
1.4	Freisetzungs-pfade	Art der Transportpfade und Ausbildung des Porenraums	Die *präferenziellen Transportpfade und ihre Eigenschaften* bestimmen die Verzögerung der *Radionuklid-Ausbreitung* im Wirtgestein bzw. im einschlusswirksamen Gebirgsbereich. Wichtige Eigenschaften betreffen die Beschaffenheit der Transportpfade (***Kluftnetzwerk vs. poröses Medium***, ***Homogenität der Gesteinseigenschaften***, ***Ausbildung des Porenraums***, Existenz von *Channels,* Zugänglichkeit für Matrixdiffusion), die ***Länge der präferenziellen Freisetzungspfade*** und ihre ***Transmissivität*** unter Berücksichtigung des ***Selbstabdichtungsvermögens***, welches insbesondere durch den ***Tongehalt*** des Gesteins geprägt wird.
		Homogenität des Gesteinsaufbaus	
		Länge der Freisetzungspfade	
		Transmissivität präferenzieller Freisetzungspfade	
		Tongehalt *	
		Selbstabdichtungsvermögen	
2.1	Beständigkeit der Standort- und Gesteins-eigenschaften	**Modellvorstellungen zur Geodynamik und Neotektonik**	Für die *geologische Langzeitstabilität* des Barrierensystems sind die *neotektonische Aktivität* und das *Gesteinsverhalten über lange Zeiträume* wichtig. Diese werden erfasst durch die Indikatoren ***Modellvorstellungen zu Geodynamik und Neotektonik sowie Seismizität. Differenzielle Bewegungen*** des Gesteinsverbands (*Zerscherung*, *Reaktivierung von Brüchen und Störungszonen)* werden vermieden, indem ein ausreichender *Abstand zu potenziell aktiven oder reaktivierbaren* (regionalen) *Störungen* eingehalten wird. In diesem Zusammenhang ist auch das ***Selbstabdichtungsvermögen*** relevant. Ebenfalls wichtig für die *geologische Langzeitstabilität* des Barrierensystems sind die ***Modellvorstellungen zu geochemischen Vorgängen*** sowie das **Potenzial zur *Bildung neuer Wasserwegsamkeiten*** durch Subrosion*Verkarstung.*
		Seismizität	
		Modellvorstellungen zu geochemischen Vorgängen *	
		Potenzial zur Bildung neuer Wasserwegsamkeiten (Verkarstung)	
		Selbstabdichtungsvermögen	
		Seltene geologische Ereignisse (Vulkanismus)	Von den ***seltenen geologischen Ereignissen*** wird nur der *Vulkanismus* explizit berücksichtigt. Er hat in der Schweiz innerhalb des Betrachtungszeitraums eine sehr kleine Eintretenswahrscheinlichkeit. Auf die Beurteilung von anderen seltenen Ereignissen (Meteoriteneinschläge) wird bei der Standortevaluation verzichtet, da diese Vorgänge und Ereignisse nicht zwischen verschiedenen Grossräumen der Schweiz diskriminieren.
		Abstand zu regionalen Störungszonen *	Berücksichtigt die Möglichkeit der *Bruchbildung*, z.B. in Zusammenhang mit *starken Erdbeben*.

Tab. 5.3-4: (Fortsetzung)

Nr.	SGT-Kriterium	Verwendete Indikatoren	Erläuterung der verwendeten Indikatoren Hinweise auf Indikatoren (**fett**) bzw. zu beurteilende Aspekte (*kursiv*) aus dem SGT, Anhang I
2.2	Erosion	**Grossräumige Erosion im Betrachtungszeitraum** **Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf flächenhafte Erosion** ***Tiefenlage unter Oberfläche Fels im Hinblick auf glaziale Tiefenerosion***	Die Langzeitstabilität des Barrierensystems wird auch durch die langfristige Hebung und durch den *Einfluss der Erosion* geprägt. Die ***Hebungsrate*** und die *Klimaentwicklung* beeinflussen die ***Erosionsraten*** und damit die ***grossräumige Erosion im Betrachtungszeitraum***. Die ***Tiefenlage*** wird als Indikator für die *erosive Freilegung infolge flächenhafter Erosion* verwendet und für die ***glaziale Tiefenerosion*** (***übertiefte*** **Felsrinnen** ***mit rinnenförmigen Quartärfüllungen***).
2.3	Lagerbedingte Einflüsse	Auflockerungszone im Nahbereich der Untertagebauten Chemische Wechselwirkungen Verhalten des Wirtgesteins bzgl. Gas Verhalten des Wirtgesteins bzgl. Temperatur Selbstabdichtungsvermögen	*Lagerbedingte Einflüsse* können die Wirkung der geologischen Barrieren und die Beständigkeit der Verfüllung der untertägigen Lagerkammern bzw. der Verfüllung und Versiegelung der untertägigen Bauwerke beeinträchtigen. Von besonderer Bedeutung ist die Bildung einer ***Auflockerungszone im Nahbereich der Untertagebauten*** bzw. die *Reversibilität* der damit verbundenen Änderungen in den Gesteinseigenschaften durch das ***Selbstabdichtungsvermögen*** des Wirtgesteins. *Lagerbedingte Einflüsse* werden mit baulichen und betrieblichen Massnahmen möglichst vermieden bzw. begrenzt, insbesondere durch eine geeignete Wahl von Materialien und durch eine zweckmässige Auslegung der technischen Barrieren. Dies wird bei der Evaluation berücksichtigt und gilt insbesondere für das Verhalten des Wirtgesteins bzgl. ***chemischer Wechselwirkungen*** (z.B. Vermeidung/Minimierung einer pH-Fahne durch eine geeignete Wahl von Materialien), bzgl. ***Gasentwicklung/Gastransport*** (z.B. gasdurchlässige Versiegelungsbauwerke [1)]) und bzgl. ***Wärmeeintrag/-leitfähigkeit*** (z.B. Einlagerungsdichte).

Tab. 5.3-4: (Fortsetzung)

Nr.	SGT-Kriterium	Verwendete Indikatoren	Erläuterung der verwendeten Indikatoren Hinweise auf Indikatoren (**fett**) bzw. zu beurteilende Aspekte (*kursiv*) aus dem SGT, Anhang I
2.4	Nutzungs-konflikte	**Rohstoffvorkommen innerhalb des Wirtgesteins** **Rohstoffvorkommen unterhalb des Wirtgesteins** Rohstoffvorkommen oberhalb des Wirtgesteins **Mineralquellen und Thermen** Geothermie	Die Existenz natürlicher *Rohstoffe* in den Standortgebieten kann zu *Nutzungskonflikten* führen. Einerseits kann die Langzeitstabilität des Barrierensystems beeinträchtigt werden, sei es durch *Schichtverletzungen* oder durch *direkte Treffer* infolge Bohrungen. Andererseits kann durch ein geologisches Tiefenlager die zukünftige Nutzung von *Rohstoffen* eingeschränkt werden. Von Bedeutung sind *nutzungswürdige* ***Rohstoffvorkommen*** im, unterhalb oder oberhalb des Wirtgesteins (Erdöl, Erdgas, Kohle, Salz, Erze), ***Geothermie*** (geothermische Nutzung tiefer Gesteinsschichten), ***Mineralquellen und Thermen*** (hydraulische Verbindungen zwischen Tiefenlager inkl. Zugangsbauwerken und Mineralquellen und Thermen).
3.1	Charakterisier-barkeit der Gesteine	*Diffus gestörte Zonen* * *Variabilität der Gesteinseigenschaften im Hinblick auf ihre Charakterisierbarkeit* Erfahrungen	Die *Charakterisierbarkeit* des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs wird anhand der Indikatoren ***Variabilität der Gesteinseigenschaften*** und *Erfahrungen* erfasst. Über diffus gestörte Zonen werden auch tektonisch verursachte ***kleinräumige Störungen*** bzw. die erwartete ***Häufigkeit von Klüften und Störungen*** und damit die tektonische *Komplexität* erfasst. Der Indikator ***Variabilität der Gesteinseigenschaften*** betrifft die zuverlässige Lokalisierung und *Charakterisierbarkeit* von Fliesspfaden mit ungünstigen Eigenschaften. Mit dem Indikator ***Erfahrungen*** soll geprüft werden, ob international und national relevante Erfahrungen und Kenntnisse mit dem gleichen Wirtgestein oder mit vergleichbaren Gesteinen vorhanden sind.

Tab. 5.3-4: (Fortsetzung)

Nr.	SGT-Kriterium	Verwendete Indikatoren	Erläuterung der verwendeten Indikatoren Hinweise auf Indikatoren (**fett**) bzw. zu beurteilende Aspekte (*kursiv*) aus dem SGT, Anhang I
3.2	Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse	**Regionales Störungsmuster und Lagerungsverhältnisse** Kontinuität der interessierenden Schichten	Die *geologisch-tektonische Komplexität und Explorierbarkeit* der räumlichen Verhältnisse wird anhand der Indikatoren **regionales Störungsmuster** und ***Lagerungsverhältnisse*** (kleinräumige Zergliederung) und **Kontinuität der interessierenden Schichten** erfasst.
		Explorationsbedingungen an Oberfläche Explorationsverhältnisse im geologischen Untergrund	Die Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse wird zusätzlich anhand der Indikatoren Explorationsbedingungen an der Oberfläche (***Möglichkeiten für 3D-Seismik und Bohrungen*** an der Oberfläche: *Quartärbedeckung*, *Topographie*, *Besiedlung*, *Bewaldung*) und ***Explorationsverhältnisse*** im geologischen Untergrund beurteilt (*Wirtgesteinsgrenzen*, *Existenz von Markerhorizonten*, *Kleinräumigkeit*, *Lage von Störungszonen*).
3.3	Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen	**Modellvorstellungen zur Geodynamik und Neotektonik** Seismizität *Tektonisches Regime (konzeptionell zu meidende Zonen)* *	Die *Prognostizierbarkeit möglicher geologischer Langzeitveränderungen* wird anhand der Indikatoren *Modellvorstellungen zur Geodynamik und Neotektonik*, ***Seismizität*** und Tektonisches Regime (konzeptionell zu meidende Zonen) erfasst.
		Unabhängige Evidenzen der Langzeitisolation	Zusätzlich wird die *Prognostizierbarkeit möglicher geologischer Langzeitveränderungen* der Barrierenwirkung anhand ***unabhängiger Evidenzen der Langzeitisolation*** beurteilt. Dazu gehören u.a. die *hydrochemische Gliederung* (*Einschluss alter Porenwässer*, ***Verweilzeiten der Tiefenwässer***, Existenz von natürlichen *Tracerprofilen*) und die hydraulische Gliederung (Existenz von ***Grundwasserstockwerken***).
4.1	Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen	***Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit*** **Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften**	Für die bautechnische Machbarkeit des Tiefenlagers relevant sind die *felsmechanischen Eigenschaften* des Wirtgesteins (***Gesteinsfestigkeiten***, ***Verformungseigenschaften/-verhalten***), die felsmechanischen In-situ-*Bedingungen* für die zugrunde gelegte Lagerkonfiguration (***Tiefenlage***, ***Gebirgsspannungen***, ***Gebirgsfestigkeit***, *Stabilität der Hohlräume*) sowie die In-situ-Temperatur (***Tiefenlage***).

Tab. 5.3-4: (Fortsetzung)

Nr.	SGT-Kriterium	Verwendete Indikatoren	Erläuterung der verwendeten Indikatoren Hinweise auf Indikatoren (**fett**) bzw. zu beurteilende Aspekte (*kursiv*) aus dem SGT, Anhang I
4.2	Untertägige Erschliessung und Wasserhaltung	Geotechnische und hydrogeologische Verhältnisse in überlagernden Gesteinsformationen	Relevant für die untertägige Erschliessung der Lagerkavernen und -stollen sind einerseits die bautechnischen Eigenschaften der überlagernden Gesteinsformationen (**geotechnische und hydrogeologische Verhältnisse**, **natürliche Gasführung**, **Karst**) und andererseits die Bedingungen nahe der Oberfläche (**Grundwasserleiter**).
		Natürliche Gasführung (im Wirtgestein)	

* Mit wenigen Ausnahmen werden alle aufgeführten Indikatoren explizit in die Bewertung mittels Bewertungsskalen einbezogen; die Ausnahmen betreffen die mit einem * gekennzeichneten Indikatoren, welche durch andere Indikatoren berücksichtigt werden. Dabei handelt es sich um die folgenden Indikatoren:

(i) 'Tongehalt', abgedeckt durch den Indikator 'Selbstabdichtungsvermögen';
(ii) 'Modellvorstellungen zu geochemischen Vorgängen', abgedeckt durch den Indikator 'Potenzial zur Bildung neuer Wasserwegsamkeiten (Verkarstung)';
(iii) 'Abstand zu regionalen Störungszonen', 'Tektonisches Regime (konzeptionell zu meidende Zonen)' und 'Diffus gestörte Zonen', abgedeckt durch den Indikator 'Platzangebot untertags'.

[1)] Die baulichen Massnahmen zur Verringerung der Auswirkungen von im Tiefenlager produziertem Gas werden für die weiter betrachteten Wirtgesteine in zwei separaten Studien bewertet (Nagra 2004a und 2008h).

5.4 Festlegung der Anforderungen an die im Einengungsverfahren verwendeten Indikatoren für das SMA- und das HAA-Lager

5.4.1 Einleitung

Ziel des vorliegenden Kapitels ist, die quantitativen und qualitativen Anforderungen und Vorgaben für die im Einengungsverfahren verwendeten Indikatoren festzulegen. Dabei wird das in Kap. 5.2 beschriebene Vorgehen angewendet.

Die Mindestanforderungen, verschärften Anforderungen und Bewertungsskalen werden im Anhang 1 für jeden Indikator individuell festgelegt und detailliert erläutert. In Tab. 5.4-1 sind alle Indikatoren mit ihren Mindestanforderungen, verschärften Anforderungen und Bewertungsskalen jeweils für das SMA- und das HAA-Lager systematisch zusammengestellt. Dabei wird für jeden Indikator aufgezeigt, in welchem Einengungsschritt (vgl. auch Tab. A1-14 im SGT, BFE 2008) er mit welchen Anforderungen angewendet wird.

5.4.2 Zusammenstellung der Anforderungen und Bewertungsskalen für die im Einengungsverfahren verwendeten Indikatoren

Bei der Festlegung der Anforderungen (Mindestanforderungen, verschärfte Anforderungen) und Bewertungsskalen werden die folgenden Arten von Grundlagen verwendet:

- **Radionuklid-Freisetzungsrechnungen[76] (Dosis-Berechnungen)** – Modellrechnungen zur Radionuklid-Freisetzung kommen für Indikatoren zur Anwendung, welche für die Barrierenwirkung des Gesamtsystems von Bedeutung sind. Bei diesen Modellrechnungen handelt es sich einerseits um Resultate aus Sicherheitsanalysen für die verschiedenen Projektmeilensteine (vgl. Projekte Wellenberg, Kristallin-I, Entsorgungsnachweis) sowie um orientierende sicherheitstechnische Rechnungen. Die entsprechenden orientierenden sicherheitstechnischen Rechnungen sind im Anhang 5 dokumentiert. Die Resultate der Rechnungen kommen insbesondere zur Anwendung für die Indikatoren 'Mächtigkeit', 'Länge der Freisetzungspfade', 'Hydraulische Durchlässigkeit', 'Transmissivität präferenzieller Freisetzungspfade', 'Art der Transportpfade und Ausbildung des Porenraums' und 'Variabilität der Gesteinseigenschaften im Hinblick auf ihre Charakterisierbarkeit'. Im Anhang 1 wird bei den betreffenden Indikatoren auf die entsprechenden Resultate verwiesen.
- **Quantitative Modellvorstellungen zum Verhalten einzelner Barrieren oder Prozesse (Modellrechnungen zum Systemverhalten) –** Solche Modellrechnungen kommen zum Einsatz, wenn das Verhalten einzelner Barrieren oder spezifische Prozesse im Vordergrund stehen. Dazu gehören insbesondere Indikatoren, die wichtig sind im Hinblick auf geometrische Aspekte (vereinfachte Abschätzungen für 'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf flächenhafte Erosion', 'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit', 'Laterale Ausdehnung', 'Platzangebot untertags') oder auf geochemische Aspekte (Modellvorstellungen zur Sorption: Einfluss der Indikatoren 'Mineralogie', 'pH', 'Redox-Bedingungen', 'Salinität') sowie weitere Indikatoren (insbesondere 'Chemische Wechselwirkungen', 'Verhalten des Wirtgesteins bezüglich Gas', 'Verhalten des Wirtgesteins bezüglich Temperatur'). Auf die entsprechenden Modellvorstellungen wird im Anhang 1 hingewiesen; vertiefende Informationen sind in den technischen Berichten der Nagra sowie in der Literatur enthalten.
- **Beobachtungen und Erfahrungen (teilweise gestützt auf quantitative und qualitative Modellvorstellungen) –** Eine weitere Grundlage bilden Beobachtungen und Erfahrungen (Messwerte, Beobachtungen und Erfahrungswerte, teilweise ergänzt durch quantitative und qualitative Modellvorstellungen), welche in den technischen Berichten der Nagra (z.B. im Zusammenhang mit den verschiedenen Projektmeilensteine, vgl. Projekte Wellenberg, Kristallin-I, Entsorgungsnachweis) sowie in der Literatur dokumentiert sind. Die Messwerte, Beobachtungen und Erfahrungswerte werden insbesondere für Indikatoren verwendet, die wichtig sind im Hinblick auf Nutzungskonflikte im Untergrund ('Rohstoffvorkommen innerhalb des Wirtgesteins', 'Rohstoffvorkommen unterhalb des Wirtgesteins', 'Rohstoffvorkommen oberhalb des Wirtgesteins', 'Mineralquellen und Thermen', 'Geothermie') oder im Hinblick auf die Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen ('Variabilität der Gesteinseigenschaften im Hinblick auf ihre Charakterisierbarkeit', 'Erfahrungen', 'Explorationsverhältnisse im geologischen Untergrund', 'Unabhängige Evidenzen der Langzeitisolation') sowie für zahlreiche weitere Indikatoren (insbesondere 'Tongehalt', 'Selbstabdichtungsvermögen', 'Potenzial zur Bildung neuer Wasserwegsamkeiten (Verkarstung)', 'Abstand zu regionalen Störungszonen', 'Seismizität', 'Grossräumige Erosion im Betrachtungszeitraum'). Auf die entsprechenden Beobachtungen, Erfahrungen und Modellvorstellungen wird im Anhang 1 hingewiesen.

Für mehrere der Indikatoren werden verschiedene Arten der Grundlagen bei der Festlegung der Anforderungen und Bewertungsskalen verwendet, und in vielen Fällen werden auch Expertenbeurteilungen in die Erwägungen miteinbezogen.

---

[76] Diese Berechnungen basieren auf dem Abfallinventar aus den bestehenden KKW bei einer angenommenen Betriebsdauer von 50 Jahren und einer Sammelperiode für die Abfälle aus Medizin, Industrie und Forschung bis 2050. Die Resultate sind auch für das umhüllende Abfallinventar repräsentativ.

Tab. 5.4-1: Vorgaben zur Anwendung der Indikatoren im Einengungsverfahren.

Vorgaben zur Anwendung der Indikatoren für die Evaluation der geologisch-tektonischen Grossräume, der Wirtgesteine bzw. einschlusswirksamen Gebirgsbereiche und der Konfigurationen für das SMA- bzw. HAA-Lager

Legende: MA – Mindestanforderung, VA – verschärfte Anforderung (wird teilweise auch in der Definition der Bewertungsskalen verwendet), BS – Bewertungsskala, (×) – Anwendung nur für HAA-Lager.

Die Reihenfolge der Indikatoren folgt der Tabelle A1-14 im SGT (BFE 2008). In den verschiedenen Schritten werden z.T. zusätzliche Kriterien und Indikatoren berücksichtigt. Präzisierungen zu den Indikatoren stehen in eckigen Klammern.

Diese Tabelle entspricht Tab. 2.5-2 in Nagra (2008b).

SGT-Kriterium	**Indikator**	**MA**	**VA**	**BS**	**Anforderungen für das SMA-Lager**	**Anforderungen für HAA-Lager**
Evaluation der geologisch-tektonischen Grossräume (SCHRITT 3)						
2.2 Erosion	Grossräumige Erosion im Betrachtungszeitraum [Betrachtung der Hebungsrate und bei ausgeprägter grossräumiger Topographie, Betrachtung des Potenzials für lokale Erosion]	×			≤ 2 mm/a	≤ 0.4 mm/a
				×	*Sehr günstig*: ≤ 0.4 mm/a (inkl. negative Werte) *Günstig*: 0.4 – 1 mm/a *Ungünstig bis bedingt günstig* (graduelle Abstufung): 1 – 2 mm/a Zusätzlich für Alpen und Faltenjura, bei der Bewertung Berücksichtigung des Potenzials für lokale Erosion.	*Günstig bis sehr günstig* (graduelle Abstufung): ≤ 0.4 mm/a (inkl. negative Werte) *Ungünstig bis bedingt günstig*: – Potenzial für lokale Erosion durch Ausschluss von Grossräumen (Alpen, Faltenjura) durch andere Indikatoren berücksichtigt.
2.1 Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften	Modellvorstellungen zur Geodynamik und Neotektonik	×			Innerhalb des Betrachtungszeitraums von 100'000 Jahren keine schwerwiegende grossräumige Gefährdung der geologischen Stabilität aus Gründen der Geodynamik bzw. Neotektonik.	Innerhalb des Betrachtungszeitraums von 1 Mio. Jahren keine schwerwiegende grossräumige Gefährdung der geologischen Stabilität aus Gründen der Geodynamik bzw. Neotektonik.
				×	*Günstig bis sehr günstig* (graduelle Abstufung): innerhalb des Betrachtungszeitraums von 100'000 Jahren keine grossräumige Gefährdung der geologischen Stabilität zu erwarten *Ungünstig bis bedingt günstig* (graduelle Abstufung): innerhalb des Betrachtungszeitraums von 100'000 Jahren kann eine gewisse grossräumige Gefährdung der geologischen Stabilität nicht ausgeschlossen werden	*Günstig bis sehr günstig* (graduelle Abstufung): innerhalb des Betrachtungszeitraums von 1 Mio. Jahren keine grossräumige Gefährdung der geologischen Stabilität zu erwarten *Ungünstig bis bedingt günstig* (graduelle Abstufung): innerhalb des Betrachtungszeitraums von 1 Mio. Jahren kann eine gewisse grossräumige Gefährdung der geologischen Stabilität nicht ausgeschlossen werden

Tab. 5.4-1: (Fortsetzung)

SGT-Kriterium	Indikator	MA	VA	BS	Anforderungen für SMA-Lager	Anforderungen für HAA-Lager
Evaluation der geologisch-tektonischen Grossräume (SCHRITT 3)						
2.1 Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften	Seismizität			×	Dieser Indikator wird nur zur Beschreibung der Grossräume verwendet; eine konfigurationsspezifische Bewertung erfolgt in Schritt 5 / Kriterium 2.1.	
	Modellvorstellungen zu geochemischen Vorgängen			×	Dieser Indikator wird nur bei der Beschreibung der Grossräume, nicht aber bei der Bewertung verwendet.	
	Seltene geologische Ereignisse (Vulkanismus)	×			Innerhalb des Betrachtungszeitraums von 100'000 Jahren wird keine vulkanische Aktivität erwartet.	Innerhalb des Betrachtungszeitraums von 1 Mio. Jahren wird keine vulkanische Aktivität erwartet.
				×	Identische Bewertungsskala für SMA und HAA: *Sehr günstig:* MA erfüllt (aufgrund der strengen MA entfallen die Bewertungsstufen *günstig, bedingt günstig* und *ungünstig*)	
3.3 Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen	Modellvorstellungen zur Geodynamik und Neotektonik	×			Für den Betrachtungszeitraum von 100'000 Jahren ist eine Beurteilung der geologischen Stabilität möglich.	Für den Betrachtungszeitraum von 1 Mio. Jahren ist eine Beurteilung der geologischen Stabilität möglich.
				×	*Günstig bis sehr günstig* (graduelle Abstufung): innerhalb des Betrachtungszeitraums von 100'000 Jahren sind zuverlässige Aussagen zur geologischen Stabilität möglich *Ungünstig bis bedingt günstig* (graduelle Abstufung): innerhalb des Betrachtungszeitraums von 100'000 Jahren sind zuverlässige Aussagen zur geologischen Stabilität nur bedingt möglich	*Günstig bis sehr günstig* (graduelle Abstufung): innerhalb des Betrachtungszeitraums von 1 Mio. Jahren sind zuverlässige Aussagen zur geologischen Stabilität möglich *Ungünstig bis bedingt günstig* (graduelle Abstufung): innerhalb des Betrachtungszeitraums von 1 Mio. Jahren sind zuverlässige Aussagen zur geologischen Stabilität nur bedingt möglich
1.1 Räumliche Ausdehnung	Laterale Ausdehnung [Potenzial [1)]]	×			Räumliches Potenzial vorhanden für wenig zergliederte Bereiche, in denen die Lagerkammern angeordnet werden können (≥ 2 km^2 bei einer nutzbaren Breite von ≥ 1 km).	Räumliches Potenzial vorhanden für wenig zergliederte Bereiche, in denen die Lagerkammern angeordnet werden können (≥ 4 km^2 bei einer nutzbaren Breite von ≥ 1.5 km).

Tab. 5.4-1: (Fortsetzung)

SGT-Kriterium	Indikator	MA	VA	BS	Anforderungen für SMA-Lager	Anforderungen für HAA-Lager
Evaluation der geologisch-tektonischen Grossräume (SCHRITT 3)						
1.1 Räumliche Ausdehnung	Laterale Ausdehnung [Potenzial [1)]]			×	Räumliches Potenzial vorhanden für wenig zergliederte Bereiche, in denen die Lagerkammern angeordnet werden können: Mehrere, teilweise auch grössere Bereiche wahrscheinlich (*sehr günstig*), einige Bereiche wahrscheinlich (*günstig*), wenige Bereiche wahrscheinlich (*ungünstig bis bedingt günstig*, graduelle Abstufung).	Wie SMA, aber grössere unzergliederte Bereiche notwendig.
3.2 Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse	Regionales Störungsmuster und Lagerungsverhältnisse [Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse für Anordnung der Lagerkammern]	×			Potenzial vorhanden zum Auffinden und zuverlässigen Explorieren von wenig zergliederten Bereichen, in denen die Lagerkammern angeordnet werden können.	Wie SMA, aber grössere unzergliederte Bereiche notwendig.
				×	Potenzial vorhanden zum Auffinden und zuverlässigen Explorieren von wenig zergliederten Bereichen, in denen die Lagerkammern angeordnet werden können: Mehrere, teilweise auch grössere Bereiche wahrscheinlich (*sehr günstig*), einige Bereiche wahrscheinlich (*günstig*), wenige Bereiche wahrscheinlich (*ungünstig bis bedingt günstig*, graduelle Abstufung).	Wie SMA, aber grössere unzergliederte Bereiche notwendig.
	Kontinuität der interessierenden Schichten			×	Potenzial vorhanden für Kontinuität der Schichten innerhalb von wenig zergliederten Bereichen, in denen die Lagerkammern angeordnet werden können: Hoher Grad an Kontinuität (*sehr günstig*), mittlerer Grad an Kontinuität (*günstig*), geringer Grad an Kontinuität (*ungünstig bis bedingt günstig*, graduelle Abstufung).	Wie SMA, aber grössere unzergliederte Bereiche notwendig.

Tab. 5.4-1: (Fortsetzung)

SGT-Kriterium	Indikator	MA	VA	BS	Anforderungen für SMA-Lager	Anforderungen für HAA-Lager
Evaluation der Wirtgesteine bzw. einschlusswirksamen Gebirgsbereiche (SCHRITT 4)						
1.1 Räumliche Ausdehnung	Mächtigkeit [Potenzial [2)]]	×			Identische Anforderungen für SMA und HAA: ≥ 100 m (Sedimentgesteine) bzw. ≥ 50 m (Sedimentgesteine mit Akkumulationspotenzial) ≥ 200 m (Kristallingesteine)	
	Laterale Ausdehnung [Potenzial [2)]]	×			≥ 2 km^2 bei einer nutzbaren Breite von ≥ 1 km	≥ 4 km^2 bei einer nutzbaren Breite von ≥ 1.5 km
	Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit [Potenzial [2)] für Verbreitung in geeigneter Tiefenlage]	×			≤ 800 m u.T. (Sedimentgesteine) ≤ 1200 m u.T. (Kristallingesteine)	≤ 900 m u.T. (Sedimentgesteine) ≤ 1200 m u.T. (Kristallingesteine)
	Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf flächenhafte Erosion [Potenzial [2)] für Verbreitung in geeigneter Tiefenlage]	×			≥ 200 m u.T.	≥ 400 m u.T.
1.2 Hydraulische Barrierenwirkung	Hydraulische Durchlässigkeit [unter Berücksichtigung der zu erwartenden hydraulischen Gradienten; bestimmt vorherrschenden Transportprozess]	×			$K_v \leq 10^{-9}$ m/s (AZ: Alternative Abfallzuteilung); $K_v \leq 10^{-10}$ m/s (RZ: Referenz-Abfallzuteilung) Wenn keine Erfahrungswerte für die hydraulische Durchlässigkeit vorliegen: mittlerer Tongehalt ≥ 25 % (bei Sedimentgesteinen, ausser Evaporiten) oder geologische Beschreibung der Gesteinseinheiten und generelle Erfahrungen.	$K_v \leq 10^{-10}$ m/s Wenn keine Erfahrungswerte für die hydraulische Durchlässigkeit vorliegen: mittlerer Tongehalt ≥ 25 % (bei Sedimentgesteinen, ausser Evaporiten) oder geologische Beschreibung der Gesteinseinheiten und generelle Erfahrungen.

Tab. 5.4-1: (Fortsetzung)

SGT-Kriterium	Indikator	MA	VA	BS	Anforderungen für SMA-Lager	Anforderungen für HAA-Lager
Evaluation der Wirtgesteine bzw. einschlusswirksamen Gebirgsbereiche (SCHRITT 4)						
1.2 Hydraulische Barrierenwirkung	Hydraulische Durchlässigkeit [unter Berücksichtigung der zu erwartenden hydraulischen Gradienten; bestimmt vorherrschenden Transportprozess]		×		$K_h \leq 10^{-9}$ m/s (AZ) $K_h \leq 10^{-10}$ m/s (RZ)	$K_h \leq 10^{-10}$ m/s
				×	*Sehr günstig*: $K_v \leq 10^{-11}$ m/s (RZ) *Günstig*: $10^{-11} < K_v \leq 10^{-10}$ m/s (RZ) *Ungünstig bis bedingt günstig*: – Bei der Bewertung, Berücksichtigung der Ungewissheiten und der tektonischen Überprägung.	*Sehr günstig*: $K_v \leq 10^{-12}$ m/s *Günstig*: $10^{-12} < K_v \leq 10^{-11}$ m/s *Ungünstig bis bedingt günstig* (graduelle Abstufung): $10^{-11} < K_v \leq 10^{-10}$ m/s Bei der Bewertung, Berücksichtigung der Ungewissheiten und der tektonischen Überprägung.
	Tongehalt	×			Identische Anforderungen für SMA und HAA: Wenn keine Erfahrungswerte für die hydraulische Durchlässigkeit (Indikator 'Hydraulische Durchlässigkeit') vorliegen: mittlerer Tongehalt ≥ 25 % (bei Sedimentgesteinen ausser Evaporiten) oder geologische Beschreibung der Gesteinseinheiten und generelle Erfahrungen.	
	Unabhängige Evidenzen der Langzeitisolation [Verweilzeiten der Tiefenwässer, Isotopensignaturen, etc.]			×	Bewertung erfolgt in Schritt 4 / Kriterium 3.3.	
1.3 Geochemische Bedingungen	Mineralogie			×	Identische Bewertungsskalen für SMA und HAA: *Sehr günstig*: > 40 % Tonminerale, Glimmer, Zeolithe *Günstig*: 4 – 40 % Tonminerale, Glimmer, Zeolithe *Bedingt günstig*: < 4 % Tonminerale, Glimmer, Zeolithe *Ungünstig*: keine der obigen Minerale	
	pH			×	Identische Bewertungsskalen für SMA und HAA: *Sehr günstig*: pH 7 – 9 *Günstig*: pH 6 – 7 *Bedingt günstig*: – *Ungünstig*: pH > 9 oder < 6	

Tab. 5.4-1: (Fortsetzung)

SGT-Kriterium	Indikator	MA	VA	BS	Anforderungen für SMA-Lager	Anforderungen für HAA-Lager
Evaluation der Wirtgesteine bzw. einschlusswirksamen Gebirgsbereiche (SCHRITT 4)						
1.3 Geochemische Bedingungen	Redox-Bedingungen			×	Identische Bewertungsskalen für SMA und HAA: *Sehr günstig*: reduzierende Bedingungen gepuffert durch Minerale (z.B. Pyrit, Siderit) *Günstig*: – *Bedingt günstig*: reduzierende Bedingungen, aber keine puffernden Minerale *Ungünstig*: Nitrat > 1 g/L	
	Salinität			×	Identische Bewertungsskalen für SMA und HAA: *Sehr günstig*: Ionenstärke 0.005 – 0.01 Mol/L *Günstig*: Ionenstärke 0.01 – 0.7 Mol/L *Bedingt günstig*: – *Ungünstig*: Ionenstärke < 0.005 oder > 0.7 Mol/L	
	Mikrobielle Prozesse			×	Identische Bewertungsskalen für SMA und HAA: *Günstig bis sehr günstig* (graduelle Abstufung): ungünstige Bedingungen für hohe mikrobiologische Aktivität, d.h. Poren wesentlich kleiner als 1 µm, keine offenen Klüfte und ein knappes Nährstoffangebot *Bedingt günstig*: grössere Poren (µm bis mm) oder Klüfte und hohes Nährstoffangebot inkl. Elektronenakzeptor (z.B. Sulfat) *Ungünstig*: –	
	Kolloide			×	Identische Bewertungsskalen für SMA und HAA: *Sehr günstig*: Kolloide sind immobil (Filtration) und Ionenstärke > 0.005 Mol/L (geringe Kolloidstabilität) *Günstig*: graduelle Abstufung zwischen *sehr günstig* und *bedingt günstig* *Bedingt günstig*: schlechte Kolloidfiltration und kleine Huminstoffkonzentrationen im Porenwasser (10^{-6} – 10^{-4} g/L) *Ungünstig*: schlechte Kolloidfiltration und Ionenstärke < 0.005 Mol/L (hohe Kolloidstabilität), Huminstoffe im Porenwasser > 10^{-4} g/L	

Tab. 5.4-1: (Fortsetzung)

SGT-Kriterium	Indikator	MA	VA	BS	Anforderungen für SMA-Lager	Anforderungen für HAA-Lager
Evaluation der Wirtgesteine bzw. einschlusswirksamen Gebirgsbereiche (SCHRITT 4)						
1.4 Freisetzungspfade	Art der Transportpfade und Ausbildung des Porenraums			×	Identische Bewertungsskala für SMA und HAA: *Sehr günstig*: (äquivalent) poröses Medium *Günstig*: Wasserführung in Diskontinuitäten mit beschränktem Channeling und günstigen Bedingungen für Matrixdiffusion *Bedingt günstig*: Wasserführung in Diskontinuitäten mit ausgeprägtem Channeling und mässigen Bedingungen für Matrixdiffusion *Ungünstig*: Wasserführung in Diskontinuitäten mit ausgeprägtem Channeling und ungünstigen Bedingungen für Matrixdiffusion	
	Transmissivität präferenzieller Freisetzungspfade	×			$T \leq 10^{-8}$ m^2/s Wenn keine Erfahrungswerte für die Transmissivität vorliegen: mittlerer Tongehalt ≥ 25 % (bei Sedimentgesteinen, ausser Evaporiten) oder geologische Beschreibung der Gesteinseinheiten und generelle Erfahrungen.	$T \leq 10^{-9}$ m^2/s Wenn keine Erfahrungswerte für die Transmissivität vorliegen: mittlerer Tongehalt ≥ 25 % (bei Sedimentgesteinen, ausser Evaporiten) oder geologische Beschreibung der Gesteinseinheiten und generelle Erfahrungen.
				×	*Sehr günstig*: $T \leq 10^{-10}$ m^2/s *Günstig*: $10^{-10} < T \leq 10^{-9}$ m^2/s *Ungünstig bis bedingt günstig* (graduelle Abstufung): $10^{-9} < T \leq 10^{-8}$ m^2/s Bei der Bewertung, Berücksichtigung der Ungewissheiten und der tektonischen Überprägung.	*Sehr günstig*: $T \leq 10^{-11}$ m^2/s *Günstig*: $10^{-11} < T \leq 10^{-10}$ m^2/s *Ungünstig bis bedingt günstig* (graduelle Abstufung): $10^{-10} < T \leq 10^{-9}$ m^2/s Bei der Bewertung, Berücksichtigung der Ungewissheiten und der tektonischen Überprägung.
	Tongehalt	×			Identische Anforderungen für SMA und HAA: Wenn keine Erfahrungswerte für die Transmissivität vorliegen (Indikator 'Transmissivität präferenzieller Freisetzungspfade'): mittlerer Tongehalt ≥ 25 % (bei Sedimentgesteinen, ausser Evaporiten) oder geologische Beschreibung der Gesteinseinheiten und generelle Erfahrungen.	

Tab. 5.4-1: (Fortsetzung)

SGT-Kriterium	Indikator	MA	VA	BS	Anforderungen für SMA-Lager	Anforderungen für HAA-Lager
Evaluation der Wirtgesteine bzw. einschlusswirksamen Gebirgsbereiche (SCHRITT 4)						
1.4 Freisetzungspfade	Selbstabdichtungsvermögen			×	Identische Bewertungsskala für SMA und HAA: Selbstabdichtungsvermögen unter Berücksichtigung der unter In-Situ-Bedingungen des untertägigen Lagerbereichs zu erwartenden Prozesse (Schliessen von Klüften / Diskontinuitäten durch elastische / plastische Deformationen und Quellen bzw. Desintegration der Gesteinsmatrix): *Sehr günstig:* ausgeprägtes Selbstabdichtungsvermögen *Günstig:* signifikantes Selbstabdichtungsvermögen *Ungünstig bis bedingt günstig* (graduelle Abstufung): kein oder nur geringes Selbstabdichtungsvermögen	
	Homogenität des Gesteinsaufbaus		(×)		–	Homogener Aufbau des WG; WG enthält keine mehrere Meter mächtige und über hunderte von Metern ausgedehnte Elemente mit gegenüber dem restlichen Gestein klar reduzierten Barriereneigenschaften.
				×	*Günstig bis sehr günstig* (graduelle Abstufung): VA für HAA erfüllt *Ungünstig bis bedingt günstig* (graduelle Abstufung): VA für HAA nicht erfüllt	*Günstig bis sehr günstig:* graduelle Abstufung bezogen auf VA *Ungünstig bis bedingt günstig:* –
2.1 Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften	Potenzial zur Bildung neuer Wasserwegsamkeiten (Verkarstung)	×			Identische Anforderungen für SMA und HAA: Kein erhebliches Potenzial zur Bildung neuer Wasserwegsamkeiten durch Verkarstung.	
				×	Identische Bewertungsskala für SMA und HAA: *Sehr günstig:* Verkarstung ist nicht möglich *Günstig:* Verkarstung ist unter speziellen Bedingungen nicht vollständig auszuschliessen *Ungünstig bis bedingt günstig* (graduelle Abstufung): gewisses Verkarstungspotenzial vorhanden	
	Selbstabdichtungsvermögen			×	Bewertung erfolgt in Schritt 4 / Kriterium 1.4.	

Tab. 5.4-1: (Fortsetzung)

SGT-Kriterium	Indikator	MA	VA	BS	Anforderungen für SMA-Lager	Anforderungen für HAA-Lager
Evaluation der Wirtgesteine bzw. einschlusswirksamen Gebirgsbereiche (SCHRITT 4)						
2.3 Lagerbedingte Einflüsse	Auflockerungszone im Nahbereich der Untertagebauten			×	Identische Bewertungsskala für SMA und HAA: Transporteigenschaften im Nahbereich infolge Auflockerungszone für Langzeitsicherheit unter Berücksichtigung der Ausdehnung und des Selbstabdichtungsvermögens der Auflockerungszone sowie der Erfolgsaussichten für baulichen Massnahmen zum Ausräumen / Unterbruch der Auflockerungszone in Schlüsselzonen. *Sehr günstig:* sehr kleine Auflockerungszone oder hohes Selbstabdichtungspotenzial, keine durchgehende hydraulische Verbindung entlang der Lagerstollen oder der Versiegelungsstrecken, kein hydraulischer Kurzschluss zwischen hydraulisch wirksamen Störungszonen *Günstig bis bedingt günstig* (graduelle Abstufung): Auflockerungszone wenig bis teilweise relevant oder weitgehend ohne Einfluss bzw. nicht dominant für den Radionuklidtransport (abhängig von den oben angegebenen Eigenschaften wie Selbstabdichtungsvermögen, mögliche bauliche Massnahmen etc.) *Ungünstig*: Auflockerungszone relevant oder massgebend für den Radionuklidtransport	
	Chemische Wechselwirkungen			×	Identische Anforderungen für SMA und HAA: *Sehr günstig*: Ausdehnung der pH-Fahne auf direkte Umgebung der Lagerkammern begrenzt, keine signifikante Mineralumwandlung durch O_2-Oxidation *Günstig*: Ausdehnung der pH-Fahne auf nähere Umgebung der Lagerkammern begrenzt, aber erhöhte Ungewissheit bezüglich Ausdehnung; keine signifikante Mineralumwandlung durch O_2-Oxidation *Ungünstig bis bedingt günstig* (graduelle Abstufung): weitläufige Ausdehnung der pH-Fahne entlang von Fliesspfaden; signifikante Mineralumwandlung durch O_2-Oxidation	

Tab. 5.4-1: (Fortsetzung)

SGT-Kriterium	Indikator	MA	VA	BS	Anforderungen für SMA-Lager	Anforderungen für HAA-Lager
Evaluation der Wirtgesteine bzw. einschlusswirksamen Gebirgsbereiche (SCHRITT 4)						
2.3 Lagerbedingte Einflüsse	Verhalten des Wirtgesteins bzgl. Gas			×	Identische Bewertungsskala für SMA und HAA: *Sehr günstig:* Gas kann ohne Beeinträchtigung der Barriereneigenschaften durch das Wirtgestein entweichen; bauliche Massnahmen zur Speicherung oder Ableitung der im Lager produzierten Gase sind nicht notwendig *Günstig*: Gas kann ohne Beeinträchtigung der Barriereneigenschaften durch das Wirtgestein entweichen; zusätzlich sind aber voraussichtlich bauliche Massnahmen zur untertägigen Speicherung eines Teils der im Lager produzierten Gase notwendig *Ungünstig bis bedingt günstig* (graduelle Abstufung): es ist ungewiss, ob Gas ohne Beeinträchtigung der Barriereneigenschaften durch das Wirtgestein entweichen kann, es sind deshalb bauliche Massnahmen zur Ableitung der im Lager produzierten Gase entlang der Zugangsbauwerke notwendig (graduelle Abstufung nach Gasspeicher- und Gastransportkapazität des Wirtgesteins)	
	Verhalten des Wirtgesteins bzgl. Temperatur			(×)	– (nicht relevant)	*Günstig bis sehr günstig* (graduelle Abstufung): Temperatur stellt kein Problem dar oder kann durch geringfügige bauliche oder betriebliche Massnahmen (z.B. durch Einlagerungsdichte) kontrolliert werden *Ungünstig bis bedingt günstig* (graduelle Abstufung): Temperatur kann durch bauliche oder betriebliche Massnahmen mit erheblichem Aufwand kontrolliert werden
	Selbstabdichtungsvermögen			×	Bewertung erfolgt in Schritt 4 / Kriterium 1.4.	
2.4 Nutzungskonflikte	Rohstoffvorkommen innerhalb des Wirtgesteins [unter Berücksichtigung der Tiefenlage]	×			Identische Anforderungen für SMA und HAA: In absehbarer Zeit keine schwerwiegenden Konflikte im Zusammenhang mit der Nutzung von Rohstoffen innerhalb des Wirtgesteins. Kein Potenzial zur Verhinderung der Nutzung von Rohstoffen grosser Bedeutung (Interessensabwägung).	

Tab. 5.4-1: (Fortsetzung)

SGT-Kriterium	Indikator	MA	VA	BS	Anforderungen für SMA-Lager	Anforderungen für HAA-Lager
Evaluation der Wirtgesteine bzw. einschlusswirksamen Gebirgsbereiche (SCHRITT 4)						
2.4 Nutzungskonflikte	Rohstoffvorkommen innerhalb des Wirtgesteins [unter Berücksichtigung der Tiefenlage]			×	Identische Bewertungsskala für SMA und HAA: *Sehr günstig*: kein identifiziertes Nutzungspotenzial (keine Rohstoffe vorhanden, oder Rohstoffe sind zwar vorhanden, aber anderweitig viel einfacher und in praktisch unbeschränkter Menge erhältlich bzw. abbaubar) *Günstig*: mögliche Rohstoffvorkommen mit ungeklärtem aber wahrscheinlich geringem oder fraglichem Nutzungspotenzial *Bedingt günstig*: nachgewiesene Rohstoffvorkommen mit möglichem Nutzungspotenzial, ohne derzeitige Nutzung, Rohstoffexploration im Gange oder geplant *Ungünstig*: hohes Rohstoffpotenzial mit aktiver Förderung	
4.1 Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen	Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften	×			Identische Anforderungen für SMA und HAA: Kein kohäsionsloses, praktisch unkonsolidiertes Gestein, keine extrem geringe Festigkeit, keine extrem hohe Zerklüftung (sehr engständig und kleine Festigkeiten in den Trennflächen).	
				×	Identische Bewertungsskala für SMA und HAA: Graduelle Abstufung gemäss nachfolgenden Festigkeiten (einaxiale Druckfestigkeit) mit Abzügen bei starker Anisotropie (infolge Schichtung und Schieferung), Heterogenität und Wasserzutritt (in Anlehnung an SIA-Klassifikation): *Sehr günstig*: hohe Festigkeiten (> 100 MPa) *Günstig*: mittlere bis hohe Festigkeiten (20 – 100 MPa) *Ungünstig bis bedingt günstig*: kleine bis mittlere Festigkeiten (5 – 20 MPa)	
	Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit [Potenzial [2)] für Verbreitung in geeigneter Tiefenlage im Hinblick auf die zu erwartenden Gebirgsspannungen]	×			Einengung erfolgt in Schritt 4 / Kriterium 1.1.	

Tab. 5.4-1: (Fortsetzung)

SGT-Kriterium	Indikator	MA	VA	BS	Anforderungen für SMA-Lager	Anforderungen für HAA-Lager
Evaluation der Wirtgesteine bzw. einschlusswirksamen Gebirgsbereiche (SCHRITT 4)						
3.1 Charakterisierbarkeit der Gesteine	Variabilität der Gesteinseigenschaften im Hinblick auf ihre Charakterisierbarkeit [inkl. Architekturelemente]		×		Identische Anforderungen für SMA und HAA: Keine bevorzugten Fliesspfade, welche ungünstige Radionuklid-Rückhalteeigenschaften haben (Diskontinuitäten, sedimentäre Architekturelemente) und die nicht zuverlässig lokalisierbar und charakterisierbar sind.	
				×	Identische Bewertungsskala für SMA und HAA: *Sehr günstig*: keine Diskontinuitäten und sedimentären Architekturelemente von Relevanz für den Radionuklidtransport *Günstig*: alle anderen Fälle (die VA erfüllen) *Ungünstig bis bedingt günstig*: –	
	Erfahrungen			×	Identische Bewertungsskala für SMA und HAA: *Sehr günstig*: es gibt Erfahrungen aus langjährigen, fortgeschrittenen Lagerprojekten in gleichen bzw. in sehr ähnlichen Gesteinformationen und in ähnlicher geologischer Konfiguration (gute Übertragbarkeit) im In- und/oder Ausland *Günstig*: es gibt Erfahrungen in ähnlichen Gesteinsformationen, die geologische Konfiguration ist aber verschieden (teilweise eingeschränkte Übertragbarkeit) im In- und/oder Ausland *Bedingt günstig*: es gibt zwar relevante Erfahrungen für die geologische Tiefenlagerung, die Unterschiede betreffend Wirtgestein und geologische Konfiguration sind aber signifikant (mässige Übertragbarkeit) *Ungünstig*: es gibt keine relevanten Erfahrungen für die geologische Tiefenlagerung in derartigen Gesteinsformationen	
3.2 Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse	Explorationsverhältnisse im geologischen Untergrund			×	Identische Bewertungsskala für SMA und HAA: *Sehr günstig*: gut kartierbarer seismischer Markerhorizont an einer Wirtgesteins-Grenzfläche oder in der Nähe (bis ca. 100 m) und ein schwächerer aber weitgehend erkennbarer, räumlich begrenzter Reflektor an bzw. in der Nähe der anderen Grenzfläche; laterale Korrelationslängen relevanter geologischer Elemente > 10 km *Günstig/bedingt günstig*: graduelle Abstufung *Ungünstig*: kein geeigneter seismischer Reflektor an den Wirtgesteins-Grenzflächen oder in der Nähe einer der Grenzflächen; laterale Korrelationslängen relevanter geologischer Elemente < 0.5 km	

Tab. 5.4-1: (Fortsetzung)

SGT-Kriterium	Indikator	MA	VA	BS	Anforderungen für SMA-Lager	Anforderungen für HAA-Lager
Evaluation der Wirtgesteine bzw. einschlusswirksamen Gebirgsbereiche (SCHRITT 4)						
3.3 Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen	Unabhängige Evidenzen der Langzeitisolation [Verweilzeiten der Tiefenwässer, Isotopensignaturen, etc.]			×	Identische Bewertungsskala für SMA und HAA: *Sehr günstig*: mehrere klare unabhängige Evidenzen für Langzeitisolationsvermögen *Günstig*: mindestens eine klare unabhängige Evidenz für Langzeitisolationsvermögen *Bedingt günstig*: es gibt gewisse Hinweise, die als unabhängige Evidenz für das Langzeitisolationsvermögen gedeutet werden können *Ungünstig*: es sind keine unabhängigen Evidenzen bekannt	
Evaluation der Konfigurationen (SCHRITT 5)						
1.1 Räumliche Ausdehnung	Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit [Verbreitung in geeigneter Tiefenlage]	×			Lagerebene (Mitte notwendiger einschlusswirksamer Gebirgsbereich [3]) ≤ 800 m u.T. (Sedimentgesteine), ≤ 1200 m u.T. (Kristallingesteine).	Lagerebene (Mitte notwendiger einschlusswirksamer Gebirgsbereich [3]) ≤ 900 m u.T. (Sedimentgesteine), ≤ 1200 m u.T. (Kristallingesteine).
			×		Opalinuston und Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger': keine Verschärfung für Tafeljura s.str. und Vorfaltenzone notwendig (VA = MA); Lagerebene (Mitte notwendiger einschlusswirksamer Gebirgsbereich) ≤ 700 m u.T. für östliche Subjurassische Zone [4]. Effinger Schichten und Mergel: keine Verschärfung notwendig (VA = MA).	Für Opalinuston keine Verschärfung für Tafeljura s.str. und Vorfaltenzone notwendig (VA = MA); Lagerebene (Mitte notwendiger einschlusswirksamer Gebirgsbereich) ≤ 800 m u.T. für östliche Subjurassische Zone.
				×	Bewertung erfolgt in Schritt 5 / Kriterium 4.1.	
	Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf flächenhafte Erosion	×			Top notwendiger einschlusswirksamer Gebirgsbereich ≥ 200 m u.T.	Top notwendiger einschlusswirksamer Gebirgsbereich ≥ 400 m u.T.
				×	Bewertung erfolgt in Schritt 5 / Kriterium 2.2.	
	Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteins-Dekompaktion	×			Top notwendiger einschlusswirksamer Gebirgsbereich ≥ 200 m u.T.	Top notwendiger einschlusswirksamer Gebirgsbereich ≥ 400 m u.T.

Tab. 5.4-1: (Fortsetzung)

SGT-Kriterium	Indikator	MA	VA	BS	Anforderungen für SMA-Lager	Anforderungen für HAA-Lager
Evaluation der Konfigurationen (SCHRITT 5)						
1.1 Räumliche Ausdehnung	Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteins-Dekompaktion		×		Opalinuston: Top notwendiger [5)] einschluss-wirksamer Gebirgsbereich ≥ 200 m u.T., wo obere Rahmengesteine nicht notwendig; ≥ 300 m u.T., wo obere Rahmengesteine notwendig. Effinger Schichten und Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger': Top notwendiger einschluss-wirksamer Gebirgsbereich ≥ 300 m u.T. Mergel-Formationen des Helvetikums: Top notwendiger einschlusswirksamer Gebirgsbereich ≥ 400 m u.T.	Opalinuston: Top notwendiger [5)] einschluss-wirksamer Gebirgsbereich ≥ 400 m u.T., wo obere Rahmengesteine nicht notwendig; ≥ 500 m u.T., wo obere Rahmengesteine notwendig.
				×	Bewertung erfolgt in Schritt 5 / Kriterium 1.2.	
	Tiefenlage unter Oberfläche Fels im Hinblick auf glaziale Tiefenerosion	×			Top notwendiger einschlusswirksamer Gebirgsbereich ≥ 200 m unter Felsoberfläche im Bereich von übertieften Felsrinnen [6)].	Top notwendiger einschlusswirksamer Gebirgsbereich ≥ 400 m unter Felsoberfläche im Bereich von übertieften Felsrinnen [6)].
			×		Top notwendiger einschlusswirksamer Gebirgsbereich ≥ 300 m unter Felsoberfläche im Bereich von übertieften Felsrinnen, ≥ 200 m unter Felsoberfläche ausserhalb übertiefter Felsrinnen [6)].	Top notwendiger einschlusswirksamer Gebirgsbereich ≥ 500 m unter Felsoberfläche im Bereich von übertieften Felsrinnen; ≥ 400 m unter Felsoberfläche ausserhalb von übertieften Felsrinnen [6)].
				×	Bewertung erfolgt in Schritt 5 / Kriterium 2.2.	
	Mächtigkeit	×			Nutzbare [7)] Mächtigkeit ≥ 100 m. Mindestabstand der Lagerebene zu Top und Basis des Wirtgesteins: Opalinuston: je ≥ 20 m; Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger': kein Mindestabstand; Effinger Schichten und Mergel-Formationen des Helvetikums: je ≥ 50 m.	Nutzbare [7)] Mächtigkeit ≥ 100 m. Mindestabstand der Lagerebene zu Top und Basis Opalinuston: je ≥ 20 m.

Tab. 5.4-1: (Fortsetzung)

SGT-Kriterium	Indikator	MA	VA	BS	Anforderungen für SMA-Lager	Anforderungen für HAA-Lager
Evaluation der Konfigurationen (SCHRITT 5)						
1.1 Räumliche Ausdehnung	Mächtigkeit		×		Nutzbare [8] Mächtigkeit ≥ 100 m für Opalinuston mit Rahmengesteinen, mit Abzug von 30 % auf die Mächtigkeit von Rahmengesteinen, wo diese zum Erreichen der notwendigen Mächtigkeit benötigt werden. Nutzbare Mächtigkeit ≥ 150 m für Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger' mit Rahmengesteinen (davon ≥ 75 m innerhalb 'Brauner Dogger'). Nutzbare Mächtigkeit ≥ 200 m für Effinger Schichten und Mergel-Formationen des Helvetikums (bei beiden sind keine Rahmengesteine vorhanden).	Nutzbare [8] Mächtigkeit ≥ 100 m für Opalinuston mit Rahmengesteinen, mit Abzug von 30 % auf die Mächtigkeit von Rahmengesteinen, wo diese zum Erreichen der notwendigen Mächtigkeit benötigt werden. Abstand der Lagerebene zu Top und Basis Opalinuston je ≥ 40 m.
				×	*Sehr günstig:* Opalinuston: nutzbare Mächtigkeit Opalinuston ≥ 100 m und obere und untere Rahmengesteine je ≥ 25 m, wobei als untere Rahmengesteine nur die Zone bis Top Arietenkalk betrachtet wird Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger': nutzbare Mächtigkeit 'Brauner Dogger' mit oberen und unteren Rahmengesteinen ≥ 200 m und Mächtigkeit 'Brauner Dogger' mit oberen Rahmengesteinen ≥ 100 m Effinger Schichten und Mergel-Formationen des Helvetikums: nutzbare Mächtigkeit ≥ 250 m *Günstig:* alle anderen Fälle (die VA erfüllen) *Ungünstig bis bedingt günstig:* –	*Sehr günstig:* Opalinuston: nutzbare Mächtigkeit Opalinuston ≥ 100 m und obere und untere Rahmengesteine je ≥ 25 m, wobei als untere Rahmengesteine nur die Zone bis Top Arietenkalk betrachtet wird *Günstig:* alle anderen Fälle (die VA erfüllen) *Ungünstig bis bedingt günstig:* –

Tab. 5.4-1: (Fortsetzung)

SGT-Kriterium	Indikator	MA	VA	BS	Anforderungen für SMA-Lager	Anforderungen für HAA-Lager
Evaluation der Konfigurationen (SCHRITT 5)						
1.1 Räumliche Ausdehnung	Abstand zu regionalen Störungszonen	×			Identische Anforderungen für SMA und HAA: Abstand geht von einem Richtwert von 200 m aus und wird vergrössert, wo dies durch vorhandene geologische Daten (z.B. kartierte Sekundärbrüche, verdickte oder gestörte Bereiche in seismischen Profilen, erhöhte Neigung auf Isohypsenkarten) angezeigt ist.	
	Tektonisches Regime (konzeptionell zu meidende Zonen)		×		Identische Anforderungen für SMA und HAA: Randzone Hegau-Bodensee-Graben wird gemieden.	
	Diffus gestörte Zonen [mit Anzeichen für kleinräumige tektonische Zergliederung]		×		Identische Anforderungen für SMA und HAA: Diffus gestörte Zonen werden gemieden.	
	Laterale Ausdehnung [vereinfachte Prüfung unter Berücksichtigung aller bereichsbegrenzenden Elemente; mehrmalige Anwendung in Schritt 5]	×			≥ 3 km^2 bei einer nutzbaren Breite von ≥ 1 km (Form der Bereiche wird so festgelegt, dass die Bedingung der nutzbaren Breite innerhalb des Bereichs überall erfüllt ist)	≥ 6 km^2 bei einer nutzbaren Breite von ≥ 1.5 km (Form der Bereiche wird so festgelegt, dass die Bedingung der nutzbaren Breite innerhalb des Bereichs überall erfüllt ist)
	Platzangebot untertags [inkl. Fremdgesteinseinschlüssen und Flexibilität / Reserven]		×		Anforderungen für SMA und HAA: Platzangebot [9)] ausreichend für umhüllendes Abfallinventar (Volumina der in Lagerbehälter verpackten Abfälle: SMA: 200'000 m^3, BE/HAA: 20'000 m^3, LMA: 7500 m^3) unter Berücksichtigung geologischer Ungewissheiten (maximale und minimale Tiefenlage; Lage der bereichsbegrenzenden geologischen Elemente; mögliche kleinräumige Elemente; Architekturelemente und Fremdgesteinseinschlüsse; Mächtigkeit, Schichtneigung und Welligkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs) und bei günstiger Lageranordnung.	

Tab. 5.4-1: (Fortsetzung)

SGT-Kriterium	Indikator	MA	VA	BS	Anforderungen für SMA-Lager	Anforderungen für HAA-Lager
Evaluation der Konfigurationen (SCHRITT 5)						
1.1 Räumliche Ausdehnung	Platzangebot untertags [inkl. Fremdgesteinseinschlüssen und Flexibilität / Reserven]			×	Bewertungsskala für SMA und HAA: *Sehr günstig*: potenzielles Platzangebot ausreichend für ≥ 4-faches umhüllendes Abfallinventar und Platzangebot ausreichend für ≥ 2-faches umhüllendes Abfallinventar unter Berücksichtigung geologischer Ungewissheiten und bei günstiger Lageranordnung *Günstig*: potenzielles Platzangebot ausreichend für ≥ 2-faches umhüllendes Abfallinventar und Platzangebot ausreichend für umhüllendes Abfallinventar unter Berücksichtigung geologischer Ungewissheiten und bei günstiger Lageranordnung *Ungünstig bis bedingt günstig*: – [9]	
1.2 Hydraulische Barrierenwirkung	Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteins-Dekompaktion	×			Einengung erfolgt in Schritt 5 / Kriterium 1.1.	
			×		Einengung erfolgt in Schritt 5 / Kriterium 1.1.	
				×	*Sehr günstig*: Top notwendiger einschlusswirksamer Gebirgsbereich ≥ VA + 100 m *Günstig*: VA bis VA + 100 m *Ungünstig bis bedingt günstig*: –	*Sehr günstig*: Top notwendiger einschlusswirksamer Gebirgsbereich ≥ VA + 200 m *Günstig*: VA bis VA + 200 m *Ungünstig bis bedingt günstig*: –
	Hydraulische Durchlässigkeit [unter Berücksichtigung der zu erwartenden hydraulischen Gradienten; bestimmt vorherrschenden Transportprozess]			×	Bewertungsstufen wie in Schritt 4 / Kriterium 1.2, zusätzlich unter Berücksichtigung der tektonischen Überprägung.	
	Grundwasserstockwerke			×	Identische Bewertungsskala für SMA und HAA: *Günstig bis sehr günstig* (graduelle Abstufung): ausgeprägter Grundwasserstockwerkbau; Aquifere ober- und unterhalb des WG / EG bilden voneinander unabhängige Fliesssysteme; Grundwasserstockwerkbau im Bereich / Region nachgewiesen (*sehr günstig*), aufgrund der stratigraphischen Verhältnisse erwartet (*günstig*) *Ungünstig bis bedingt günstig* (graduelle Abstufung): es gibt Anzeichen (hydraulisch oder hydrochemisch), dass die Aquifere ober- und unterhalb des WG/EG hydraulisch miteinander verbunden sind	

Tab. 5.4-1: (Fortsetzung)

SGT-Kriterium	Indikator	MA	VA	BS	Anforderungen für SMA-Lager	Anforderungen für HAA-Lager
Evaluation der Konfigurationen (SCHRITT 5)						
1.3 Geochemische Bedingungen	Mineralogie			×	Bewertungsstufen wie in Schritt 4 / Kriterium 1.3.	
	pH			×	Bewertungsstufen wie in Schritt 4 / Kriterium 1.3.	
	Redox-Bedingungen	×			Identische Anforderungen für SMA und HAA: Keine ungesättigten (oxidierenden) Bedingungen, basierend auf Wirtgesteinseigenschaften bzw. hydrogeologischer Situation.	
				×	Bewertungsstufen wie in Schritt 4 / Kriterium 1.3.	
	Salinität			×	Bewertungsstufen wie in Schritt 4 / Kriterium 1.3.	
	Mikrobielle Prozesse			×	Bewertungsstufen wie in Schritt 4 / Kriterium 1.3.	
	Kolloide			×	Bewertungsstufen wie in Schritt 4 / Kriterium 1.3.	
1.4 Freisetzungspfade	Art der Transportpfade und Ausbildung des Porenraums			×	Bewertungsstufen wie in Schritt 4 / Kriterium 1.4.	

Tab. 5.4-1: (Fortsetzung)

SGT-Kriterium	Indikator	MA	VA	BS	Anforderungen für SMA-Lager	Anforderungen für HAA-Lager
Evaluation der Konfigurationen (SCHRITT 5)						
1.4 Freisetzungspfade	Länge der Freisetzungspfade			×	Beurteilung primär des vertikalen Transportpfads durch das Wirtgestein (WG) und die Rahmengesteine (RG; zusammen einschlusswirksamer Gebirgsbereich, EG), unter vereinfachter Berücksichtigung der vertikalen Ausdehnung der SMA-Lagerkammern (inkl. Auflockerungszone) von 20 m. Bei allenfalls existierenden, horizontalen Fliesspfaden, welche die vertikale Transportdistanz reduzieren, wird deren Beitrag bewertet: Bei horizontalen Migrationsdistanzen im km-Bereich erfolgt kein Abzug, bei signifikant kleineren Migrationsdistanzen: Abzug. *Sehr günstig*: Opalinuston: ≥ 50 m im nutzbaren EG (WG + RG) Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger': ≥ 75 m im nutzbaren EG (WG + RG) Effinger Schichten und Mergel: ≥ 100 m im nutzbaren WG *Günstig*: Opalinuston: ≥ 40 m im nutzbaren EG (WG+RG) Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger': ≥ 50 m im nutzbaren EG (WG + RG) Effinger Schichten und Mergel: ≥ 75 m im nutzbaren WG *Ungünstig bis bedingt günstig* (graduelle Abstufung): Opalinuston: < 40 m im nutzbaren EG (WG + RG) Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger': < 50 m im nutzbaren EG (WG + RG) Effinger Schichten und Mergel: < 75 m im nutzbaren WG	Wie bei Opalinuston für SMA, aber unter vereinfachter Berücksichtigung der vertikalen Ausdehnung der HAA-Lagerstollen (inkl. Auflockerungszone) von 5 m.

Tab. 5.4-1: (Fortsetzung)

SGT-Kriterium	Indikator	MA	VA	BS	Anforderungen für SMA-Lager	Anforderungen für HAA-Lager
Evaluation der Konfigurationen (SCHRITT 5)						
1.4 Freisetzungspfade	Transmissivität präferenzieller Freisetzungspfade			×	Bewertungsstufen wie in Schritt 4 / Kriterium 1.4.	
	Selbstabdichtungsvermögen [bzgl. Klüfte und Störungszonen]			×	Bewertungsstufen wie in Schritt 4 / Kriterium 1.4 (unter Berücksichtigung der relevanten In-situ-Bedingungen).	
	Homogenität des Gesteinsaufbaus			×	Bewertungsstufen wie in Schritt 4 / Kriterium 1.4.	
2.2 Erosion	Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf flächenhafte Erosion	×			Einengung erfolgt in Schritt 5 / Kriterium 1.1.	
				×	Beurteilung der Überdeckung nach Ablauf des Betrachtungszeitraums von 100'000 Jahren für SMA: *Sehr günstig*: Top notwendiger einschlusswirksamer Gebirgsbereich noch nicht von Dekompaktion betroffen *Günstig*: Wirtgestein mehrheitlich noch nicht von Dekompaktion betroffen *Ungünstig bis bedingt günstig* (graduelle Abstufung): Lager knapp unter der Terrainoberfläche	Beurteilung der Überdeckung nach Ablauf des Betrachtungszeitraums von 1 Mio. Jahren für HAA: Bewertungsstufen wie bei SMA.
	Tiefenlage unter Oberfläche Fels im Hinblick auf glaziale Tiefenerosion [übertiefte Felsrinnen, Topographie]	×			Einengung erfolgt in Schritt 5 / Kriterium 1.1.	
			×		Einengung erfolgt in Schritt 5 / Kriterium 1.1.	
				×	Identische Bewertungsskala für SMA und HAA: *Sehr günstig*: Top notwendiger einschlusswirksamer Gebirgsbereich > VA + 100 m oder Lage des Bereichs ausserhalb der Haupttäler *Günstig*: Top notwendiger einschlusswirksamer Gebirgsbereich: VA bis VA + 100 m *Ungünstig bis bedingt günstig*: –	

Tab. 5.4-1: (Fortsetzung)

SGT-Kriterium	Indikator	MA	VA	BS	Anforderungen für SMA-Lager	Anforderungen für HAA-Lager
Evaluation der Konfigurationen (SCHRITT 5)						
2.2 Erosion	Grossräumige Erosion im Betrachtungszeitraum [Betrachtung der Hebungsrate; in Bereichen mit starkem topographischen Relief, zusätzlich Berücksichtigung der lokalen Erosion]			×	Bewertungsstufen wie in Schritt 3 / Kriterium 2.2. Bei der Bewertung von Bereichen mit starkem topographischen Relief, zusätzlich Berücksichtigung der lokalen Erosion.	
2.3 Lagerbedingte Einflüsse	Auflockerungszone im Nahbereich der Untertagebauten			×	Bewertungsstufen wie in Schritt 4 / Kriterium 2.3.	
	Chemische Wechselwirkungen			×	Bewertungsstufen wie in Schritt 4 / Kriterium 2.3.	
	Verhalten des Wirtgesteins bzgl. Gas			×	Bewertungsstufen wie in Schritt 4 / Kriterium 2.3.	
	Verhalten des Wirtgesteins bzgl. Temperatur			(×)	– (nicht relevant)	Bewertungsstufen wie in Schritt 4 / Kriterium 2.3.
2.4 Nutzungskonflikte	Rohstoffvorkommen innerhalb des Wirtgesteins			×	Bewertungsstufen wie in Schritt 4 / Kriterium 2.4.	
	Rohstoffvorkommen unterhalb des Wirtgesteins	×			Identische Anforderungen für SMA und HAA: In absehbarer Zeit keine schwerwiegenden Konflikte mit Potenzial zur Beeinträchtigung des Barrierensystems durch Nutzung von Rohstoffen unterhalb des Wirtgesteins. Kein Potenzial zur Verhinderung der Nutzung von Rohstoffen grosser Bedeutung (Interessensabwägung).	

Tab. 5.4-1: (Fortsetzung)

SGT-Kriterium	Indikator	MA	VA	BS	Anforderungen für SMA-Lager	Anforderungen für HAA-Lager
Evaluation der Konfigurationen (SCHRITT 5)						
2.4 Nutzungskonflikte	Rohstoffvorkommen unterhalb des Wirtgesteins			×	Identische Bewertungsskala für SMA und HAA: Gemäss Fig. 5.1-3: Kohlenwasserstoff-Ressourcen [10] (KW-Ressourcen). *Sehr günstig:* Gebiete, in denen keine KW-Ressourcen erwartet werden, und ohne Steinsalzvorkommen oder Top des Salzvorkommens liegt tiefer als 600 m u.T. *Günstig:* Gebiete mit möglichen KW-Ressourcen (auch in Zukunft kaum wirtschaftliche Bedeutung) und/oder Gebiete, in denen das Top des Salzvorkommens zwischen 500 und 600 m u.T. liegt *Ungünstig bis bedingt günstig* (graduelle Abstufung): Gebiete mit KW-Ressourcen (in Zukunft wirtschaftliche Bedeutung möglich, heute Explorationstätigkeit) und/oder Gebiete, in denen das Top des Salzvorkommens zwischen 400 und 500 m u.T. bzw. darüber liegt (graduelle Abstufung)	
	Rohstoffvorkommen oberhalb des Wirtgesteins [wird in Zusammenhang mit dem Indikator 'Rohstoffvorkommen unterhalb des Wirtgesteins' beurteilt]			×	Identische Anforderungen für SMA und HAA: Modifikation der Bewertung des Indikators 'Rohstoffvorkommen unterhalb des Wirtgesteins': Bei bzgl. Rohstoffnutzung signifikanten Öl- oder Gasanzeichen in Gesteinen oberhalb des Wirtgesteins werden Bewertungen im Bereich *günstig bis sehr günstig* auf *günstig* reduziert; bei tieferen Bewertungen erfolgt kein zusätzlicher Abzug. Für Bereiche ohne Öl- oder Gasanzeichen in Gesteinen oberhalb des Wirtgesteins erfolgt ebenfalls kein Abzug.	
	Mineralquellen und Thermen	×			Identische Anforderungen für SMA und HAA: Lagerzone: bei möglicher hydraulisch wirksamer Verbindung zwischen Tiefenlager und Mineralquelle oder Therme: Entfernung ≥ 5 km. Untertägige Erschliessung: bei möglicher hydraulisch wirksamer Verbindung zwischen Erschliessung (Zugangstunnel, Schacht) und Mineralquelle oder Therme: Entfernung ≥ 1 km.	

Tab. 5.4-1: (Fortsetzung)

SGT-Kriterium	Indikator	MA	VA	BS	Anforderungen für SMA-Lager	Anforderungen für HAA-Lager
Evaluation der Konfigurationen (SCHRITT 5)						
2.4 Nutzungskonflikte	Mineralquellen und Thermen			×	Identische Bewertungsskala für SMA und HAA: *Sehr günstig*: Lagerzone: keine hydraulisch wirksame Verbindung zwischen Tiefenlager und Mineralquelle oder Therme; untertägige Erschliessung: keine hydraulisch wirksame Verbindung zwischen Erschliessung und Mineralquelle oder Therme oder Entferung ≥ 10 km *Güinstig*: Lagerzone: keine Differenzierung bzgl. *sehr günstig*; untertägige Erschliessung: bei möglicher hydraulischer Verbindung: Entfernung ≥ 5 km *Bedingt günstig*: Lagerzone: mögliche hydraulische Verbindung zwischen Tiefenlager und Mineralquelle oder Therme (aber MA erfüllt); untertägige Erschliessung: bei möglicher hydraulischer Verbindung: Entfernung ≥ 2 km *Ungünstig*: Lagerzone: keine Differenzierung bzgl. *bedingt günstig*; untertägige Erschliessung: bei möglicher hydraulischer Verbindung: Entfernung zwischen 1 und 2 km	
	Geothermie			×	Identische Bewertungsskala für SMA und HAA: *Sehr günstig*: nicht identifiziertes Ressourcenpotential (normierte geothermische Produktivität Pn < 0.004 MW/m) *Günstig*: mögliches Ressourcenpotential (0.004 < Pn < 0.008 MW/m) *Bedingt günstig*: erhöhtes Ressourcenpotential (0.008 < Pn < 0.012 MW/m) *Ungünstig*: hohes Ressourcenpotential (Pn > 0.012 MW/m)	
4.1 Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen	Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit [Verbreitung in geeigneter Tiefenlage im Hinblick auf die zu erwartenden Gebirgsspannungen]	×			Einengung erfolgt in Schritt 5 / Kriterium 1.1.	
			×		Einengung erfolgt in Schritt 5 / Kriterium 1.1.	

Tab. 5.4-1: (Fortsetzung)

SGT-Kriterium	Indikator	MA	VA	BS	Anforderungen für SMA-Lager	Anforderungen für HAA-Lager
Evaluation der Konfigurationen (SCHRITT 5)						
4.1 Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen	Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit [Verbreitung in geeigneter Tiefenlage im Hinblick auf die zu erwartenden Gebirgsspannungen]			×	*Sehr günstig*: Opalinuston und Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger': Lagerebene (Mitte Wirtgestein) < VA – 500 m Effinger Schichten und Mergel-Formationen des Helvetikums: Lagerebene (Mitte Wirtgestein) < VA – 350 m *Günstig*: Opalinuston und Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger': Lagerebene (Mitte Wirtgestein) zwischen VA – 500 m und VA – 200 m Effinger Schichten und Mergel-Formationen des Helvetikums: Lagerebene (Mitte Wirtgestein) zwischen VA – 350 m und VA *Bedingt günstig*: Opalinuston und Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger': Lagerebene (Mitte Wirtgestein) zwischen VA – 200 m und VA *Ungünstig*: –	*Sehr günstig*: Lagerebene (Mitte Wirtgestein) < VA – 600 m *Günstig*: Lagerebene (Mitte Wirtgestein) zwischen VA – 600 m und VA – 300 m *Bedingt günstig*: Lagerebene (Mitte Wirtgestein) zwischen VA – 300 m und VA *Ungünstig*: –
	Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften			×	Identische Bewertungsskala für SMA und HAA: Bewertungsskala wie in Schritt 4 / Kriterium 4.1 mit weiteren Abzügen unter Berücksichtigung der tektonischen Überprägung und des erwarteten Trennflächengefüges (Klüftung, Scherhorizonte); Schichtung und Schieferung in Bewertung aus Schritt 4 / Kriterium 4.1 bereits berücksichtigt: *Kein Abzug*: bei weitgehend fehlenden Trennflächen oder für weitständige Trennflächenabstände mit mittleren Festigkeiten in Trennflächen oder Trennflächen geringer linearer Erstreckung (entspricht tektonischem Regime: "Tafeljura s.str.") *Abzug um halben Skalenschritt*: für mittlere Trennflächenabstände mit mittleren oder kleinen Festigkeiten in Trennflächen (entspricht tektonischem Regime: "Vorfaltenzone") *Abzug um ganzen Skalenschritt*: für engständige Trennflächenabstände und kleine Festigkeiten in Trennflächen (entspricht tektonischem Regime: "östliche Subjurassische Zone")		

Tab. 5.4-1: (Fortsetzung)

SGT-Kriterium	Indikator	MA	VA	BS	Anforderungen für SMA-Lager	Anforderungen für HAA-Lager
Evaluation der Konfigurationen (SCHRITT 5)						
4.2 Untertägige Erschliessung und Wasserhaltung	Geotechnische und hydrogeologische Verhältnisse in überlagernden Gesteinsformationen [inkl. Grundwasserleiter, Karst und natürliche Gasführung; im Hinblick auf Zugänglichkeit der Untertagebauten]			×	Identische Bewertungsskala für SMA und HAA: *Sehr günstig*: nur lokale, wenig ausgedehnte grundwasserführende Quartärschichten, Festgesteine über dem Wirtgestein sind standfest und erfordern einen kleinen bautechnischen Aufwand (hohe Gesteinsfestigkeit, keine oder nur weitständiges Trennflächengefüge); keine Karstbildung, kein erhöhtes Wassereinbruchrisiko erwartet, Erdgas Gefahrenstufe 0 oder 1 (nach SUVA 2002) *Günstig/bedingt günstig*: graduelle Abstufung *Ungünstig*: ausgedehnte, grundwasserführende Quartärschichten; grosse Abschnittslängen durch problematische Gesteinsformationen, welche einen grossen bautechnischen Aufwand erfordern (schwimmendes, quellendes und drückendes Gebirge); grosses Karst- und Wassereinbruchsrisiko, Erdgas Gefahrenstufe 4 (nach SUVA 2002)	
	Natürliche Gasführung (im Wirtgestein)	×			Identische Anforderungen für SMA und HAA: Keine nachgewiesenen Erdgaslagerstätten im Wirtgestein (entsprechend Gefahrenstufe 4 nach SUVA 2002: Gas möglich oder sicher, mit Gas-Überflutungsgefahr, Ausgasen während langer Zeit).	
				×	Identische Bewertungsskala für SMA und HAA: *Sehr günstig*: keine Erdgasanzeichen bekannt (Gefahrenstufe 0 nach SUVA 2002) *Günstig*: kleinere Erdgas-Indikationen (Gefahrenstufe 1 nach SUVA 2002, Gas möglich oder sicher, ohne Gas-Überflutungsgefahr, Ausgasen während kurzer Zeit) *Bedingt günstig*: mässige Erdgasführung (Gefahrenstufe 2 nach SUVA 2002, Gas möglich oder sicher, ohne Gas-Überflutungsgefahr, Ausgasen während langer Zeit) *Ungünstig*: signifikante Erdgasführung (Gefahrenstufe 3 nach SUVA 2002, Gas möglich oder sicher, mit Gas-Überflutungsgefahr, Ausgasen während kurzer Zeit)	

Tab. 5.4-1: (Fortsetzung)

SGT-Kriterium	Indikator	MA	VA	BS	Anforderungen für SMA-Lager	Anforderungen für HAA-Lager
Evaluation der Konfigurationen (SCHRITT 5)						
2.1 Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften	Modellvorstellungen zur Geodynamik und Neotektonik [inkl. Hinweise auf differenzielle Bewegungen]			×	*Günstig bis sehr günstig* (graduelle Abstufung): innerhalb des Betrachtungszeitraums von 100'000 Jahren keine generelle Gefährdung der geologischen Stabilität im bevorzugten Bereich zu erwarten *Ungünstig bis bedingt günstig* (graduelle Abstufung): innerhalb des Betrachtungszeitraums von 100'000 Jahren kann eine generelle Gefährdung der geologischen Stabilität im bevorzugten Bereich nicht ausgeschlossen werden	*Günstig bis sehr günstig*: innerhalb des Betrachtungszeitraums von 1 Mio. Jahren keine generelle Gefährdung der geologischen Stabilität im bevorzugten Bereich zu erwarten (geringe Beanspruchung durch Fernschub; entspricht geologischem Regime: "Tafeljura s.str.") *Günstig*: innerhalb des Betrachtungszeitraums von 1 Mio. Jahren keine generelle Gefährdung der geologischen Stabilität im bevorzugten Bereich zu erwarten (mässige Beanspruchung durch Fernschub; entspricht geologischem Regime: "Vorfaltenzone") *Ungünstig bis bedingt günstig* (graduelle Abstufung): innerhalb des Betrachtungszeitraums von 1 Mio. Jahren kann eine generelle Gefährdung der geologischen Stabilität im bevorzugten Bereich nicht ausgeschlossen werden (erhebliche bis starke Beanspruchung durch Fernschub)
	Seismizität			×	Beurteilung anhand der Karte mit historischen und instrumentell erfassten Erdbeben sowie konzeptionellen Überlegungen (Abgrenzung von Zonen (Herdregionen)): *Günstig bis sehr günstig* (graduelle Abstufung): keine erhöhte Seismizität *Bedingt günstig bis günstig*: leicht erhöhte Seismizität (Teile des Alpennordrands und Graubündens) *Ungünstig*: deutlich erhöhte Seismizität (Teile des Wallis, Region Basel)	Beurteilung anhand der Karte mit historischen und instrumentell erfassten Erdbeben sowie konzeptionellen Überlegungen (Abgrenzung von Zonen (Herdregionen)): *Günstig bis sehr günstig* (graduelle Abstufung): keine erhöhte Seismizität *Bedingt günstig*: leicht erhöhte Seismizität (Teile des Alpennordrands und Graubündens) *Ungünstig*: deutlich erhöhte Seismizität (Teile des Wallis, Region Basel)

Tab. 5.4-1: (Fortsetzung)

SGT-Kriterium	Indikator	MA	VA	BS	Anforderungen für SMA-Lager	Anforderungen für HAA-Lager
Evaluation der Konfigurationen (SCHRITT 5)						
2.1 Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften	Seltene geologische Ereignisse (Vulkanismus)			×	Bewertungsstufen wie in Schritt 3 / Kriterium 2.1.	
	Abstand zu regionalen Störungszonen [zur Vermeidung potenziell aktiver oder reaktivierbarer Störungen]	×			Einengung erfolgt in Schritt 5 / Kriterium 1.1.	
	Tektonisches Regime (konzeptionell zu meidende Zonen)		×		Einengung erfolgt in Schritt 5 / Kriterium 1.1.	
	Potenzial zur Bildung neuer Wasserwegsamkeiten (Verkarstung)	×			Identische Anforderungen für SMA und HAA: Keine Bereiche mit erheblichem Potenzial zur Bildung neuer Wasserwegsamkeiten im WG/EG durch Verkarstung, unter Berücksichtigung der hydrogeologischen Situation (Tiefenlage, Topographie).	
				×	Identische Bewertungsskala für SMA und HAA: Bewertungsstufen wie in Schritt 4 / Kriterium 2.1, zusätzlich unter Berücksichtigung der hydrogeologischen Situation (Tiefenlage, Topographie).	
	Selbstabdichtungsvermögen			×	Bewertung erfolgt in Schritt 4 / Kriterium 1.4.	

Tab. 5.4-1: (Fortsetzung)

SGT-Kriterium	Indikator	MA	VA	BS	Anforderungen für SMA-Lager	Anforderungen für HAA-Lager
Evaluation der Konfigurationen (SCHRITT 5)						
3.3 Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen	Modellvorstellungen zur Geodynamik und Neotektonik [inkl. Hinweise auf differenzielle Bewegungen]			×	*Günstig bis sehr günstig* (graduelle Abstufung): innerhalb des Betrachtungszeitraums von 100'000 Jahren sind zuverlässige Aussagen zur geologischen Stabilität im bevorzugten Bereich möglich *Ungünstig bis bedingt günstig* (graduelle Abstufung): innerhalb des Betrachtungszeitraums von 100'000 Jahren sind zuverlässige Aussagen zur geologischen Stabilität im bevorzugten Bereich nur bedingt möglich bzw. nicht möglich	*Günstig bis sehr günstig*: innerhalb des Betrachtungszeitraums von 1 Mio. Jahren sind zuverlässige Aussagen zur geologischen Stabilität im bevorzugten Bereich möglich (geringe Beanspruchung durch Fernschub; entspricht geologischem Regime: "Tafeljura s.str.") *Günstig*: innerhalb des Betrachtungszeitraums von 1 Mio. Jahren sind zuverlässige Aussagen zur geologischen Stabilität im bevorzugten Bereich möglich (mässige Beanspruchung durch Fernschub; entspricht geologischem Regime: "Vorfaltenzone") *Ungünstig bis bedingt günstig* (graduelle Abstufung): innerhalb des Betrachtungszeitraums von 1 Mio. Jahren sind zuverlässige Aussagen zur geologischen Stabilität im bevorzugten Bereich nur bedingt möglich bzw. nicht möglich (erhebliche bis starke Beanspruchung durch Fernschub)
	Unabhängige Evidenzen der Langzeitisolation			×	Bewertungsstufen wie in Schritt 4 / Kriterium 3.3.	
3.1 Charakterisierbarkeit der Gesteine	Diffus gestörte Zonen [geologisch-tektonische Situation, kleinräumige Störungen, Häufigkeit von Klüften und Störungen]		×		Einengung erfolgt in Schritt 5 / Kriterium 1.1.	

Tab. 5.4-1: (Fortsetzung)

SGT-Kriterium	Indikator	MA	VA	BS	Anforderungen für SMA-Lager	Anforderungen für HAA-Lager
Evaluation der Konfigurationen (SCHRITT 5)						
3.1 Charakterisierbarkeit der Gesteine	Variabilität der Gesteinseigenschaften im Hinblick auf ihre Charakterisierbarkeit [inkl. Architekturelemente]			×	Bewertungsstufen wie in Schritt 4 / Kriterium 3.1.	
	Erfahrungen			×	Bewertungsstufen wie in Schritt 4 / Kriterium 3.1.	
3.2 Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse	Kontinuität der interessierenden Schichten			×	Beurteilt wird die Kontinuität der Schichten innerhalb von wenig zergliederten Bereichen, in denen die Lagerkammern angeordnet werden können: *Sehr günstig*: hoher Grad an Kontinuität, wird in Gebieten ohne signifikante Deformation durch tektonische Überprägung erreicht (entspricht tektonischem Regime: "Tafeljura s.str.") *Günstig bis sehr günstig*: graduelle Abstufung (entspricht tektonischem Regime: "Vorfaltenzone") *Günstig*: mittlerer Grad an Kontinuität, wird in Gebieten mit erheblicher Deformation durch tektonische Überprägung erreicht (entspricht tektonischem Regime: "östliche Subjurassische Zone") *Ungünstig bis bedingt günstig* (graduelle Abstufung): geringer Grad an Kontinuität Bewertung dieses Indikators entfällt für Bereiche ohne Schichtung (z.B. tektonische Akkumulationen).	Beurteilt wird die Kontinuität der Schichten innerhalb von wenig zergliederten Bereichen, in denen die Lagerkammern angeordnet werden können: *Sehr günstig*: hoher Grad an Kontinuität, wird in Gebieten ohne signifikante Deformation durch tektonische Überprägung erreicht (entspricht tektonischem Regime: "Tafeljura s.str.") *Günstig bis sehr günstig*: graduelle Abstufung (entspricht tektonischem Regime: "Vorfaltenzone") *Ungünstig / bedingt günstig / günstig*: diese Bewertungsstufen kommen für HAA-Bereiche nicht zur Anwendung (kein entsprechendes tektonisches Regime)

Tab. 5.4-1: (Fortsetzung)

SGT-Kriterium	Indikator	MA	VA	BS	Anforderungen für SMA-Lager	Anforderungen für HAA-Lager
Evaluation der Konfigurationen (SCHRITT 5)						
3.2 Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse	Explorationsverhältnisse im geologischen Untergrund [inkl. geologisch-tektonische Situation und Komplexität]			×	Bewertungsstufen wie in Schritt 4 / Kriterium 3.2, zusätzlich unter Berücksichtigung der tektonischen Überprägung.	
	Explorationsbedingungen an Oberfläche [Möglichkeiten für 3D-Seismik und Bohrungen]	×			Identische Anforderungen für SMA und HAA: Keine Bereiche, in denen die Exploration unmöglich sein könnte.	
				×	Identische Bewertungsskalen für SMA und HAA: Die Gesamtnote ergibt sich durch eine gewichtete Mittelung der Bewertung der Einsatzmöglichkeiten und Erfolgsaussichten für Seismik und Bohrungen, wobei die Seismik höher gewichtet wird. Die Seismikbewertung ergibt sich aus der Evaluation der Parameter Topographie, Tiefenlage, Oberflächennutzung und Ankoppelungsbedingungen. *Sehr günstig*: Topographie: kein Teil des Bereichs weist Höhengradienten von > 20° auf Tiefenlage des verwendbaren seismischen Markerhorizonts: > 400 m (relativ grosser Abstand zwischen Schuss- und Geophonlinien möglich) Oberflächennutzung: Überwiegend Felder und Wiesen Ankoppelungsbedingungen: keine quartären Ablagerungen bzw. nur lokale (< 10 % der Fläche), geringmächtige quartäre Ablagerungen; bei Karstverdacht: Abzug einer Bewertungsstufe *Günstig*: Topographie: kleine Teile des Bereichs mit Höhengradient > 20° bzw. nur an den Rändern des Bereichs Tiefenlage des verwendbaren seismischen Markerhorizonts: 200 – 400 m (mittlerer Abstand zwischen Schuss- und Geophonlinien) Oberflächennutzung: Felder und Wiesen mit kleineren Ortschaften und vereinzelten Waldgebieten Ankoppelungsbedingungen: quartäre Ablagerungen (> 25 m) in einem Teil des Bereichs (10 – 30 %); bei Karstverdacht: Abzug einer Bewertungsstufe	

Tab. 5.4-1: (Fortsetzung)

SGT-Kriterium	Indikator	MA	VA	BS	Anforderungen für SMA-Lager	Anforderungen für HAA-Lager
Evaluation der Konfigurationen (SCHRITT 5)						
3.2 Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse	Explorationsbedingungen an Oberfläche [Möglichkeiten für 3D-Seismik und Bohrungen]				*Bedingt günstig:* Topographie: Teile des Bereichs (< 30 %) mit Höhengradient > 20° Tiefenlage des verwendbaren seismischen Markerhorizonts: 100 – 200 m (geringer Abstand zwischen Schuss- und Geophonlinien) Oberflächennutzung: überwiegend Waldgebiete und Gebiete mit grösseren Ortschaften (> 30 %) Ankoppelungsbedingungen: quartäre Ablagerungen (> 25 m) im Grossteil des Bereichs (> 30 %); bei Karstverdacht: Abzug einer Bewertungsstufe *Ungünstig:* Topographie: Grossteil des Bereichs (> 30 %) mit Höhengradient > 20° Tiefenlage: 0 – 100 m (sehr geringer Abstand zwischen Schuss- und Geophonlinien notwendig) Oberflächennutzung: Flüsse, Seen, Moorlandschaften, reine Industriegebiete bzw. mehr als 50 % Ortschaften Ankoppelungsbedingungen: mächtige (> 50 m) quartäre Ablagerungen im Grossteil des Bereichs (> 30 %)	

1) In Schritt 3 wird nur das Potenzial für eine geeignete räumliche Ausdehnung eruiert. Eine detaillierte Prüfung des Kriteriums 'Räumliche Ausdehnung' erfolgt in Schritt 5.

2) In Schritt 4 wird nur das Potenzial für eine geeignete räumliche Ausdehnung eruiert. Eine detaillierte Prüfung des Kriteriums 'Räumliche Ausdehnung' erfolgt in Schritt 5.

3) Unter Berücksichtigung der Mindestanforderungen an den Indikator 'Mächtigkeit'.

4) Die VA für die Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger' entfällt, weil diese in der östlichen Subjurassischen Zone nicht vorhanden ist.

5) Unter Berücksichtigung der verschärften Anforderungen an den Indikator 'Mächtigkeit'.

6) Als übertiefte Felsrinnen werden Rinnen mit einer Quartärmächtigkeit von mindestens 100 m definiert.

7) Der nutzbare Teil des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs muss hier alle Mindestanforderungen bzgl. Tiefenlage erfüllen.

8) Der nutzbare Teil des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs muss hier alle verschärften Anforderungen bzgl. Tiefenlage erfüllen.

9) Streng genommen muss als Teil der verschärften Anforderung auch das potenzielle Platzangebot ausreichend für ≥ 2-faches umhüllendes Abfallinventar sein, damit die Bewertungsstufe *günstig* erreicht wird. In diesem Fall sind die Bewertungsstufen *ungünstig* und *bedingt günstig* nicht erforderlich.

10) Darin enthalten ist auch eine Bewertung der Kohlevorkommen.

5.5 Schlussfolgerungen

In Kap. 5 wurden die Anforderungen an die Geologie für das SMA- und HAA-Lager aus Sicht der Sicherheit und Machbarkeit festgelegt und begründet. Dazu wurde in Kap. 5.2 zunächst das Vorgehen beschrieben. In Kap. 5.3 wurden die im Einengungsverfahren verwendeten Indikatoren identifiziert und im Kontext der Vorgaben aus dem SGT erläutert. In Kap. 5.4 wurden die Anforderungen an die im Einengungsverfahren verwendeten Indikatoren festgelegt und in tabellarischer Form zusammengefasst; die detaillierten Erläuterungen der Festlegungen finden sich im Anhang 1. Sie bilden die Unterlagen für die Einengungsprozedur (Nagra 2008b).

Basierend auf den durchgeführten generischen Sicherheitsbetrachtungen sowie den Erfahrungen aus früheren Sicherheitsanalysen werden die folgenden Merkmale für die Standortevaluation als besonders wichtig beurteilt:

- Bei der Identifikation geeigneter geologisch-tektonischer Grossräume (Schritt 3) gilt das Hauptaugenmerk der Langzeitstabilität der geologischen Situation (Geodynamik und Neotektonik, Hebung bzw. Erosion) und den typischen räumlichen Verhältnissen und ihrer Explorierbarkeit (regionales Störungsmuster und Lagerungsverhältnisse).
- Für die Identifikation potenziell geeigneter Wirtgesteine und einschlusswirksamer Gebirgsbereiche (Schritt 4) sind die Gesteinseigenschaften (insbesondere die Beständigkeit der Gesteinseigenschaften (Potenzial für Verkarstung), die hydraulische Durchlässigkeit und – für Sedimentgesteine – ihr Selbstabdichtungsvermögen) unter Berücksichtigung der tektonischen Überprägung sowie das Potenzial für eine geeignete Geometrie der Gesteinsvorkommen (Mächtigkeit, minimale und maximale Tiefenlage, laterale Ausdehnung) sowie machbare geotechnische Eigenschaften ausschlaggebend.
- Bei der Identifikation geeigneter Konfigurationen (Schritt 5) stehen die räumlichen geologischen Verhältnisse im Vordergrund. Dazu gehören die Mächtigkeit in geeigneter Tiefenlage (minimale Tiefenlage im Hinblick auf flächenhafte Erosion und glaziale Tiefenerosion sowie bzgl. Gesteins-Dekompaktion; maximale Tiefenlage im Hinblick auf bautechnische Verhältnisse) und die laterale Ausdehnung (unter Berücksichtigung von regionalen geologischen Elementen) sowie die lokale geologisch-tektonische Situation.

Diese Merkmale sind in die verwendete Einengungsprozedur integriert und werden durch entsprechende Mindestanforderungen bzw. verschärfte Anforderungen sowie bei der Bewertung berücksichtigt.

6 Schlussfolgerungen

Der vorliegende Bericht ergänzt den Bericht der Nagra mit dem Vorschlag geologischer Standortgebiete (Nagra 2008b), welcher die Umsetzung des Konzeptteils des Sachplans geologische Tiefenlager für die Etappe 1 (Auswahl von geologischen Standortgebieten für das SMA- und das HAA-Lager) durch die Entsorgungspflichtigen dokumentiert. Er stellt die Abfallzuteilung zum SMA- bzw. HAA-Lager vor und legt die entsprechenden Barrieren- und Sicherheitskonzepte fest. Er zeigt auf, welches die lagerspezifischen Anforderungen an die Geologie sind und wie sie begründet werden. Diese Anforderungen werden im schrittweisen Einengungsverfahren zur Auswahl der geologischen Standortgebiete verwendet (Nagra 2008b).

Als eines der Hauptresultate des vorliegenden Berichts schlägt die Nagra zwei Varianten für die Abfallzuteilung auf das SMA- bzw. das HAA-Lager vor. Eine davon ist charakterisiert durch eine zugehörige Mindestanforderung an die grossräumige hydraulische Durchlässigkeit des Wirtgesteins für das SMA-Lager von 10^{-9} m/s, die andere durch eine solche von 10^{-10} m/s. Erwartungsgemäss ist das Abfallvolumen, das dem SMA-Lager zugeteilt wird, bei der Variante 10^{-9} m/s etwas kleiner als bei der Variante 10^{-10} m/s. Aufgrund der Einschätzung der geologischen Möglichkeiten in der Schweiz, die zeigt, dass es genügend geeignete Wirtgesteine resp. einschlusswirksame Gebirgsbereiche mit einer grossräumigen hydraulischen Durchlässigkeit von 10^{-10} m/s oder besser gibt, wurde die entsprechende Zuteilungsvariante als Referenzzuteilung bezeichnet; die Variante für 10^{-9} m/s als alternative Zuteilung.

Das von der Nagra vorgeschlagene und im vorliegenden Bericht beschriebene Barrieren- und Sicherheitskonzept für das SMA- und das HAA-Lager spielt sowohl bei der Abfallzuteilung als auch bei der Festlegung der Anforderungen an die Geologie eine wichtige Rolle und steht im Einklang mit den schweizerischen Vorgaben, Grundlagen und Prinzipien. Insbesondere wird die Langzeitsicherheit durch ein System von gestaffelten passiven Sicherheitsbarrieren gewährleistet, bei dem sowohl die technischen Barrieren als auch die natürlichen Barrieren (Wirtgestein/Rahmengesteine und ihre geologische Situation) in signifikantem Masse zur Barrierenwirkung des Gesamtsystems beitragen. Gemäss diesem Grundsatz werden Sicherheitskonzepte, die sich praktisch vollständig auf die Barrierenwirkung der technischen Barrieren abstützen (z.B. Kupferbehälter in durchlässigeren Gesteinsformationen) oder bei denen die technischen Barrieren praktisch nicht zur Barrierenwirkung beitragen (z.B. nicht sorbierendes Verfüllmaterial in Lagerkammern und Zugangsbauwerken, Lager mit Langzeitkontrolle ohne Verfüllung), bei der Evaluation der Standortmöglichkeiten nicht in Betracht gezogen. Des Weiteren werden Wirtgesteine nicht betrachtet, die zwar von einschlusswirksamen Rahmengesteinen umschlossen sind, sonst aber über keine eigene Barrierenwirkung verfügen (z.B. höher durchlässige Fremdgesteinseinschlüsse).

Die Elemente des Barrierensystems gewährleisten eine Reihe von Sicherheitsfunktionen, die den Grundsätzen der Redundanz und der Diversität entsprechen. Das Barrieren- und Sicherheitskonzept für das HAA-Lager entspricht weitgehend demjenigen aus dem Projekt Entsorgungsnachweis für BE, HAA und LMA (Nagra 2002b); dasjenige für das SMA-Lager umfasst dieselben Hauptelemente wie der LMA-Teil des HAA-Lagers im Projekt Entsorgungsnachweis bzw. wie das SMA-Lager, das im Rahmenbewilligungsgesuch für ein SMA-Lager am Standort Wellenberg vorgeschlagen wurde (Nagra 1994b). Die Funktionsweise des gewählten Barrieren- und Sicherheitskonzepts für das SMA- und das HAA-Lager wird im vorliegenden Bericht illustriert und die Beiträge der einzelnen Barrierenelemente zur Radionuklid-Rückhaltung werden quantifiziert.

Als weiteres Hauptresultat legt die Nagra die Anforderungen an die Geologie aus Sicht der Sicherheit und Machbarkeit fest. Dazu wird ein Satz von Indikatoren abgeleitet, wobei für die Indikatoren Mindestanforderungen, verschärfte Anforderungen bzw. Bewertungsskalen definiert werden. Diese Festlegung ist abgestimmt auf die vorgeschlagene Abfallzuteilung sowie auf das gewählte Barrieren- und Sicherheitskonzept für das SMA- und das HAA-Lager. Basierend auf den durchgeführten generischen Sicherheitsbetrachtungen sowie den Erfahrungen aus früheren System- und Sicherheitsanalysen werden die folgenden Merkmale für die Standortevaluation als besonders wichtig beurteilt: Bei der Identifikation geeigneter geologisch-tektonischer Grossräume (Schritt 3) gilt das Hauptaugenmerk der Langzeitstabilität der geologischen Situation (Geodynamik und Neotektonik, Hebung bzw. Erosion) und den typischen räumlichen Verhältnissen und ihrer Explorierbarkeit (regionales Störungsmuster und Lagerungsverhältnisse). Für die Identifikation potenziell geeigneter Wirtgesteine und einschlusswirksamer Gebirgsbereiche (Schritt 4) sind die Gesteinseigenschaften (insbesondere die Beständigkeit der Gesteinseigenschaften (Potenzial für Verkarstung), die hydraulische Durchlässigkeit und – für Sedimentgesteine – ihr Selbstabdichtungsvermögen) unter Berücksichtigung der tektonischen Überprägung sowie das Potenzial für eine geeignete Geometrie der Gesteinsvorkommen (Mächtigkeit, minimale und maximale Tiefenlage, laterale Ausdehnung) sowie machbare geotechnische Eigenschaften ausschlaggebend. Bei der Identifikation geeigneter Konfigurationen (Schritt 5) stehen die räumlichen geologischen Verhältnisse im Vordergrund. Dazu gehören die Mächtigkeit in geeigneter Tiefenlage (minimale Tiefenlage im Hinblick auf flächenhafte Erosion und glaziale Tiefenerosion sowie bzgl. Gesteins-Dekompaktion; maximale Tiefenlage im Hinblick auf bautechnische Verhältnisse) und die laterale Ausdehnung (unter Berücksichtigung von regionalen geologischen Elementen) sowie die lokale geologisch-tektonische Situation.

Diese Merkmale sind durch die verwendeten Indikatoren erfasst und werden durch entsprechende Mindestanforderungen bzw. verschärfte Anforderungen sowie bei der Bewertung berücksichtigt.

7 Literaturverzeichnis

Advocat, T. (1991): Les mécanismes de corrosion en phase aqueuse du verre nucléaire R7T7. Approche expérimentale. Essai de modélisation thermodynamique et cinétique. Ph.D. thesis, Centre de Géochimie de la Surface (CNRS), Univ. Louis Pasteur, Strasbourg, 213 p. (pp. 80-85).

AkEnd (2002a): Stellungnahme zum Auswahlverfahren Opalinuston im Zürcher Weinland. Im Auftrag der Deutsch-Schweizerischen Kommission für die Sicherheit kerntechnischer Einrichtungen (DSK). Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte [unveröffentlicht].

AkEnd (2002b): Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte: Auswahlverfahren für Endlagerstandorte: Empfehlungen des AkEnd.

Alder, J.C. & McGinnes, D.F. (1994): Model Radioactive Waste Inventory for Swiss Waste Disposal Projects. Volume 1: Main report. Volume 2: Database. Nagra Technical Report NTB 93-21. Nagra, Wettingen, Schweiz.

Alexander, W.R. & Mazurek, M. (1996): The Maqarin natural analogue: possible implications for the performance of a cementitious repository at Wellenberg. Nagra Interner Bericht, Nagra, Wettingen, Schweiz.

Allard, B., Karlsson, M., Tullbory, E.L. & Larson, S.A. (1983): Ion exchange capacities and surface areas of some major components and common fracture filling materials of igneous rocks. SKBF/KBS Technical Report 83-64. SKB, Stockholm.

Armand, G., Blümling, P., Frank, E., Frieg, B., Loew, S., Mayor, J.-C. & Volckaert, G. (2008): EDZ (including Self-Sealing) Experiments. In: Bossart, P. & Thury, M. (Eds): Mont Teri Rock Laboratory. Project, Programme 1996 to 2007 and Results. Swisstopo Report 2008-01. Bundesamt für Landestopografie swisstopo, Bern.

BAFU (2007): Bundesamt für Umwelt BAFU: Hydrologisches Jahrbuch der Schweiz 2006. UVEK, Bern, Schweiz.

BAG (2001): Umweltradioaktivität und Strahlendosen in der Schweiz; Jahr 2000. Bundesamt für Gesundheit, Fribourg, Schweiz.

Baujard, C., Signorelli, S. & Kohl, T. (in prep.): Atlas des ressources géothermiques de la Suisse Occidentale – Domaine Sud-Ouest du Plateau Suisse. Contribution à la géologie de la Suisse 40, Commission Suisse de Géophysique.

BFE (2008): Sachplan geologische Tiefenlager. Konzeptteil. Bundesamt für Energie BFE, Bern, Schweiz.

BMU (2008): Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle (Entwurf). Bundesamt für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Bonn, Bundesrepublick Deutschland.

Bradbury, M.H. & Baeyens, B. (1997): Far-Field Sorption Data Bases for Performance Assessment of a L/ILW Repository in a Disturbed/Altered Palfris Marl Host Rock. Nagra Technischer Bericht NTB 96-06, Nagra, Wettingen, Schweiz.

Bradbury, M.H. & Baeyens B. (2000): A generalised sorption model for the concentration dependent uptake of cesium by argillaceous rocks. Journal of Contaminant Hydrology 42, 141–163.

Bradbury, M.H. & Baeyens, B. (2003): Far-field sorption data bases for performance assessment of a high-level radioactive waste repository in an undisturbed Opalinus Clay host rock. Nagra Technischer Bericht NTB 02-19. Nagra, Wettingen, Schweiz.

Bradbury, M.H. & Baeyens, B. (2004): Sorption data base for Opalinus influenced by a high pH plume. Nagra Technischer Bericht NTB 03-12. Nagra, Wettingen, Schweiz.

Bradbury, M.H. & Baeyens, B. (2006): A quasi-mechanistic non-electrostatic modelling approach to metal sorption on clay minerals. In: Surface Complexation Modelling (ed. J. Lützenkirchen), Elsevier Series Interface Science and Technology. Elsevier, Amsterdam, 518-538.

Bradbury, M.H., Baeyens, B. & Thoenen, T. (2008): Sorption Data Bases for Generic Swiss Argillaceous, Crystalline and Calcareous Rock Systems. Nagra Arbeitsbericht NAB 08-50. Nagra, Wettingen, Schweiz.

de Marsily, G. (1986): Quantitative hydrogeology: Groundwater hydrology for engineers. Academic Press, San Diego, USA.

Dixon, D.A. (2000): Porewater salinity and the development of swelling pressure in bentonite-based buffer and backfill materials. Posiva Report 2000-04

EKRA (2000): Entsorgungskonzepte für radioaktive Abfälle: Schlussbericht. Im Auftrag des Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation. Expertengruppe Entsorgungskonzepte für radioaktive Abfälle (EKRA), Bern, Schweiz.

EPA (2002): Cancer risk coefficients for environmental exposure to radionuclides. Federal Guidance Report 13, EPA 402-C-99-001, Rev. 1 , CD Supplement, Environmental Protection Agency, Washington, DC, USA.

EPA (2005): Public health and environmental radiation protection standards for Yucca Mountain, Nevada. Proposed Rule. 40 CFR Part 197, OAR-2005-0083; FRL, RIN 2060-AN15, Environmental Protection Agency, Washington, DC, USA.

Gautschi, A. (2001): Hydrogeology of a fractured shale (Opalinus Clay): Implications for the deep disposal of radioactive wastes. Hydrogeol. J. 9, 97-107.

Glaus, M.A., Hummel, W. & Van Loon, L.R. (1997): Experimental determination and modelling of trace metal-humate interactions : a pragmatic approach for applications in groundwater. Nagra Technical Report NTB 97-03. Nagra, Wettingen, Schweiz.

Glaus, M.A., Baeyens, B., Bradbury, M.H., Jakob, A., Van Loon, L.R. & Yaroshchuk, A. (2007): Diffusion of ^{22}Na and ^{85}Sr in montmorillonite: Evidence of interlayer diffusion being the dominant pathway at high compaction. Environ. Sci. Technol. 41: 478–485.

GNW (1994): Technischer Bericht zum Gesuch um die Rahmenbewilligung für ein Endlager schwach- und mittelaktiver Abfälle am Wellenberg, Gemeinde Wolfenschiessen, NW. Technischer Bericht 94-01. Genossenschaft für Nukleare Entsorgung Wellenberg GNW, Wettingen, Schweiz.

GNW (2000): Lager schwach- und mittelaktiver Abfälle am Wellenberg, Gemeinde Wolfenschiessen, NW. Bericht zu Handen der Kantonalen Fachgruppe Wellenberg. Technischer Bericht 00-01. Genossenschaft für Nukleare Entsorgung Wellenberg GNW, Wettingen, Schweiz.

Honeyman, B.D. (1999): Colloidal culprits in contamination. Nature 397: 23-24.

HSK (1986): Gutachten zum Projekt Gewähr 1985 der Nationalen Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra). HSK 23/28. Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen (HSK), Villigen, Schweiz.

HSK & KSA (1993): Schutzziele für die Endlagerung radioaktiver Abfälle. Richtlinie HSK-R-21/d. Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen (HSK) und Eidg. Kommission für die Sicherheit von Kernanlagen (KSA), Villigen, Schweiz.

HSK (1996): Gutachten zum Gesuch um Rahmenbewilligung für ein SMA-Endlager am Wellenberg, HSK 30/9 & KSA 30/11, Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen (HSK), Villigen, Schweiz.

HSK (2000): Anforderungen der HSK an das Projekt eines Lagers für schwach- und mittelaktive Abfälle (SMA) am Wellenberg unter Berücksichtigung der Empfehlungen der Expertengruppe EKRA. HSK 30/15. Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen (HSK), Villigen, Schweiz.

HSK (2001): Geologisches Tiefenlager für schwach- und mittelaktive Abfälle (SMA): Verfahren zur Auswahl eines Standortgebietes. HSK 30/17. Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen (HSK), Villigen, Schweiz.

HSK (2002): Stellungnahme zum Auswahlverfahren Opalinuston im Zürcher Weinland. HSK 23/74. Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen (HSK), Villigen, Schweiz.

HSK (2004): Stellungnahme zur Sicherheitsanalyse Kristallin-I der Nagra. HSK 23/73. Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen (HSK), Villigen, Schweiz.

HSK (2005): Gutachten zum Entsorgungsnachweis der Nagra für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive sowie langlebige mittelaktive Abfälle (Projekt Opalinuston). HSK 35/99. Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen (HSK), Villigen, Schweiz.

HSK (2008a): Spezifische Auslegungsgrundsätze für geologische Tiefenlager und Anforderungen an den Sicherheitsnachweis – Richtlinie für die schweizerischen Kernanlagen (G03/d). Entwurf vom 26. September 2008. Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen (HSK), Villigen, Schweiz.

HSK (2008b): Spezifische Auslegungsgrundsätze für geologische Tiefenlager und Anforderungen an den Sicherheitsnachweis – Erläuterungsbericht zur Richtlinie. Entwurf vom 26. September 2008. Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen (HSK), Villigen, Schweiz.

Hummel W., Berner U., Curti E., Pearson F.J. & Thoenen T. (2002): Nagra/PSI Chemical Thermodynamic Data Base 01/01. Nagra Technischer Bericht NTB 02-16. Nagra, Baden, Schweiz.

IAEA (2006): Geological Disposal of Radioactive Waste, Safety Requirements, IAEA Safety Standards No. WS-R-4.

ICRP (2007): ICRP publication 101: Assessing dose of the representative person for the purpose of radiation protection of the public and the optimisation of radiological protection. Annals of the ICRP, 36(3).

Johannesson, L.E. & Nilsson, U. (2006): Deep repository – engineered barrier systems. Geotechnical behaviour of candidate backfill materials. Laboratory tests and calculations for determining performance of the backfill. SKB Report R-06-73. SKB, Stockholm.

Johnson, L.H., Niemeyer, M., Klubertanz, G., Siegel, P. & Gribi, P. (2002): Calculations of the temperature evolution of a repository for spent fuel, vitrified high-level waste and intermediate level waste in Opalinus Clay. Nagra Technical Report NTB 01-04. Nagra, Wettingen, Schweiz.

Johnson, L.H. & King, F. (2003): Canister options for the disposal of spent fuel. Nagra Technical Report NTB 02-11. Nagra, Wettingen, Schweiz.

KEG (2003): Kernenergiegesetz vom 21.03.2003. KEG, Systematische Sammlung des Bundesrechts SR 732.1, Schweiz.

KEV (2004): Kernenergieverordnung vom 10.12.2004. KEV, Systematische Sammlung des Bundesrechts SR 732.11, Schweiz.

KNE (2005): Projekt Opalinuston Zürcher Weinland der Nagra: Beurteilung der erdwissenschaftlichen Datengrundlagen und der bautechnischen Machbarkeit. Expertenbericht der Kommission Nukleare Entsorgung (KNE) zuhanden der Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen (HSK). HSK 35/98. Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen (HSK), Villigen, Schweiz.

Kohl, T., Schill, E. & Baujard, C. (2009): Integration von geothermischen Ressourcenbewertungen. Zeitschrift für geologische Wissenschaften (Geothermie-Sonderband, in Vorbereitung).

Kosakowski, G. (2004): Anomalous transport of colloids and solutes in a shear zone. Journal of Contaminant Hydrology 72, 23-46.

Kretzschmar, R., Borkovec, M., Grolimund, D. & Elimelech, M. (1999): Mobile subsurface colloids and their role in contaminant transport; Advances in Agronomy 66: 121-193.

KSA (2005): Stellungnahme zum Entsorgungsnachweis für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive sowie langlebige mittelaktive Abfälle (Projekt Opalinustion). KSA 23/170. Eidgenössische Kommission für die Sicherheit von Kernanlagen KSA, Schweiz.

KSR (2005): Analyse der Beiträge zur Strahlenexposition der Schweizer Bevölkerung in 2004, Eidgenössische Kommission für Strahlenschutz und Überwachung der Radioaktivität.

Kündig, R., Mumenthaler, Th., Eckardt, P., Keusen, H.R., Schindler, C., Hofmann, F., Vogler, R. & Guntli, P. (1997): Die mineralischen Rohstoffe der Schweiz. – Schweiz. Geotech. Komm., 552 p.

Lahusen, P. & Wyss, R. (1995): Erdöl- und Erdgasexploration in der Schweiz: Ein Rückblick. - Bull. Ver. schweiz. Petroleum-Geol. u. -Ing. 62/141, p. 43-72.

Liu, J. & Neretnieks, I. (2006): Physical and chemical stability of the bentonite buffer. SKB Rapport R-06-103, SKB, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co, Stockholm, Sweden.

Marsh, G.P., Taylor, K.J. (1988): An Assessment of Carbon Steel Containers for Radioactive Waste Disposal. Corrosion Science 28: 289-320.

Martin, C. D., Kaiser, P.K. & McCreath D.R. (1999): Hoek-Brown parameters for predicting the depth of brittle failure around tunnels. Canad. Geotchn. Jour. 36/1.

Martin, C. D., Lanyon, G.W., Blümling, P. & Mayor, J.-C. (2002): The Excavation Disturbed Zone around a Test Tunnel in Opalinus Clay. Proc. NARMS meeting, Toronto.

McCarthy, J.F. & Zacharia, J.M. (1989): Subsurface transport of contaminants. Environmental Science and Technology 23: 496-502.

McGinnes, D.F. (2002): Model Radioactive Waste Inventory for Reprocessing Waste and Spent Fuel. Nagra Technical Report NTB 01-01. Nagra, Wettingen, Schweiz.

Müller, W.H., Naef, H. & Graf, H.R. (2002): Geologische Entwicklung der Nordschweiz, Neotektonik und Langzeitszenarien Zürcher Weinland. Nagra Technischer Bericht NTB 99-08. Nagra, Baden, Schweiz.

Nagra (1981): Die Endlagerung schwach- und mittelradioaktiver Abfälle in der Schweiz. Potentielle Standortgebiete für ein Endlager Typ B. Band 1: Grundlagen und Vorgehen zur Standortwahl; Band 2: Standortgebiete der engeren Wahl. Nagra Technischer Bericht NTB 81-04. Nagra, Baden, Schweiz.

Nagra (1983): Die Endlagerung schwach- und mittelradioaktiver Abfälle in der Schweiz: Evaluation der potentiellen Standortgebiete. Band 1: Grundlagen, Bewertungskriterien und Ergebnisse; Band 2: Standortbezogene Anhänge und Beilagen. Nagra Technischer Bericht NTB 83-15. Nagra, Baden, Schweiz.

Nagra (1984): Inventar und Charakterisierung der radioaktiven Abfälle in der Schweiz. Nagra Technischer Bericht NTB 84-47. Nagra, Baden, Schweiz.

Nagra (1985): Projekt Gewähr 1985, Bd. 1 – 9. Nagra Gewähr Bericht NGB 85-01/09. Nagra, Baden, Schweiz.

Nagra (1988): Sedimentstudie – Zwischenbericht 1988: Möglichkeiten zur Endlagerung langlebiger radioaktiver Abfälle in den Sedimenten der Schweiz. Nagra Technischer Bericht NTB 88-25. Nagra, Wettingen, Schweiz.

Nagra (1991): Sedimentstudie – Zwischenbericht 1990: Zusammenfassende Übersicht der Arbeiten von 1988 bis 1990 und Konzept für das weitere Vorgehen. Nagra Technischer Bericht NTB 91-19. Nagra, Wettingen, Schweiz.

Nagra (1993a): Endlager für kurzlebige schwach- und mittelaktive Abfälle (Endlager SMA) – Vergleichende Beurteilung der Standorte Bois de la Glaive, Oberbauenstock, Piz Pian Grand und Wellenberg. – Nagra Technischer Bericht NTB 93-02. Nagra, Wettingen, Schweiz.

Nagra (1993b): Beurteilung der Langzeitsicherheit des Endlagers SMA am Standort Wellenberg (Gemeinde Wolfenschiessen, NW). Nagra Technischer Bericht NTB 93-26. Nagra, Wettingen, Schweiz.

Nagra (1994a): Kristallin-I safety assessment report. Nagra Technical Report NTB 93-22. Nagra, Wettingen, Schweiz.

Nagra (1994b): Bericht zur Langzeitsicherheit des Endlagers SMA am Standort Wellenberg. Nagra Technical Report NTB 94-06. Nagra, Wettingen, Schweiz.

Nagra (1994c): Sedimentstudie – Zwischenbericht 1993: Zusammenfassende Übersicht der Arbeiten von 1990 bis 1994 und Konzept für weitere Untersuchungen. Nagra Technischer Bericht NTB 94-10. Nagra, Wettingen, Schweiz.

Nagra (1997): Geosynthese Wellenberg 1996 – Ergebnisse der Untersuchungsphasen I und II. Nagra Technischer Bericht NTB 96-01. Nagra, Wettingen, Schweiz.

Nagra (1998): Endlager für schwach- und mittelaktive Abfälle am Standort Wellenberg : Etappen auf dem Wege zum Verschluss; präzisierende Darstellung der Kontrollierbarkeit und Rückholbarkeit. Nagra Technischer Bericht NTB 98-04. Nagra, Wettingen, Schweiz.

Nagra (2001): Optimierungsstudie für ausgewählte Abfalltypen aus Medizin, Industrie und Forschung. Nagra Technischer Bericht NTB 01-06. Nagra, Wettingen, Schweiz.

Nagra (2002a): Projekt Opalinuston – Synthese der geowissenschaftlichen Untersuchungsergebnisse. Entsorgungsnachweis für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive sowie langlebige mittelaktive Abfälle. Nagra Technischer Bericht NTB 02-03. Nagra, Wettingen, Schweiz.

Nagra (2002b): Projekt Opalinuston – Konzept für die Anlage und den Betrieb eines geologischen Tiefenlagers. Entsorgungsnachweis für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive sowie langlebige mittelaktive Abfälle. Nagra Technischer Bericht NTB 02-02. Nagra, Wettingen, Schweiz.

Nagra (2002c): Project Opalinus Clay: Safety Report. Demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and long-lived intermediate-level waste (Entsorgungsnachweis). Nagra Technical Report NTB 02-05. Nagra, Wettingen, Schweiz.

Nagra (2002d): Project Opalinus Clay: Models, codes and data for safety assessment. Demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and long-lived intermediate-level waste (Entsorgungsnachweis). Nagra Technical Report NTB 02-06. Nagra, Wettingen, Schweiz.

Nagra (2002e): FEP management for the Opalinus Clay safety assessment. Nagra Technical Report NTB 02-23. Nagra, Wettingen, Schweiz.

Nagra (2004a): Effects of post-disposal gas generation in a repository for spent fuel, high-level waste and long-lived intermediate level waste sited in Opalinus clay. Nagra Technical Report NTB 04-06. Nagra, Wettingen, Schweiz.

Nagra (2004b): Unterlagen zur Beurteilung Standortoptionen SMA aus baulicher und wirtschaftlicher Sicht – Felsmechanische Berechnungen Kavernenquerschnitte. Nagra Arbeitsbericht NAB 04-11. Nagra, Wettingen, Schweiz.

Nagra (2005a): Geologische Tiefenlagerung der abgebrannten Brennelemente, der hochaktiven und langlebigen mittelaktiven Abfälle: Darstellung und Beurteilung der aus sicherheitstechnisch-geologischer Sicht möglichen Wirtgesteine und Gebiete. Nagra Technischer Bericht NTB 05-02. Nagra, Wettingen, Schweiz.

Nagra (2005b): Lagerkonzepte für ein geologisches SMA-Lager – Bautechnische und betriebliche Grundlagen zur Reevaluation potenzieller Lagerstandorte SMA. Nagra Arbeitsbericht NAB 05-08. Nagra, Wettingen, Schweiz.

Nagra (2007): Modellhaftes Inventar radioaktiver Materialien (MIRAM): Auswertung 2007. Nagra Arbeitsbericht NAB 07-43. Nagra, Wettingen, Schweiz.

Nagra (2008a): Entsorgungsprogramm. Nagra Technischer Bericht NTB 08-01. Nagra, Wettingen, Schweiz.

Nagra (2008b): Vorschlag geologischer Standortgebiete für das SMA- und das HAA-Lager. Darlegung der Anforderungen, des Vorgehens und der Ergebnisse (Hauptbericht). Nagra Technischer Bericht NTB 08-03. Nagra, Wettingen, Schweiz.

Nagra (2008c): Vorschlag geologischer Standortgebiete für das SMA- und das HAA-Lager. Geologische Grundlagen. Nagra Technischer Bericht NTB 08-04. Nagra, Wettingen, Schweiz.

Nagra (2008d): MIRAM 2008. Nagra Technischer Bericht NTB 08-06. Nagra, Wettingen, Schweiz.

Nagra (2008e): Biosphärenmodellierung in den sicherheitstechnischen Betrachtungen für die Vororientierung zum Sachplan geologische Tiefenlager. Nagra Arbeitsbericht NAB 08-01. Nagra, Wettingen, Schweiz.

Nagra (2008f): VPAC – A numerical model for groundwater flow and radionuclide transport. Nagra Arbeitsbericht NAB 08-05. Nagra, Wettingen, Schweiz.

Nagra (2008g): VPAC – Einfluss der Anströmrichtung auf die berechneten Radionuklid-Freisetzungsraten. Nagra Arbeitsbericht NAB 08-16. Nagra, Wettingen, Schweiz.

Nagra (2008h): Effects of post-disposal gas generation in a repository for low- and intermediate-level waste sited in Opalinus Clay. Nagra Technical Report NTB 08-07. Nagra, Wettingen, Schweiz.

Nagra (2008i): Comparative rock-mechanical modeling of ILW caverns in different host rocks. Nagra Arbeitsbericht NAB 08-45. Nagra, Wettingen, Schweiz.

Nagra (2008j): Geochemische Nahfeld-Daten für die sicherheitstechnischen Betrachtungen zum Sachplan geologische Tiefenlager, Etappe 1. Nagra Arbeitsbericht NAB 08-51. Nagra, Wettingen, Schweiz.

NEA (2004a): Die Sicherheit der geologischen Tiefenlagerung von BE, HAA und LMA in der Schweiz: Eine internationale Expertenprüfung der radiologischen Langzeitsicherheits-analyse der Tiefenlagerung im Opalinuston des Zürcher Weinlands. OECD Nuclear Energy Agency, Issy-les-Moulineaux, France.

NEA (2004b): Stability and buffering capacity of the geosphere for long-term isolation of radioactive waste: Application to argillaceous media: "Clay Club" workshop proceedings Braunschweig, Germany 9-11 December 2003. OECD Nuclear Energy Agency, Issy-les-Moulineaux, France.

NEA (2006): Integration Group for the Safety Case (IGSC): Consideration of timescales in post-closure safety of geological disposal of radioactive waste. OECD Nuclear Energy Agency, Issy-les-Moulineaux, France.

Neall F., editor (1998): The Hyperalkaline Plume: Status of understanding and priorities for future work. Nagra Interner Bericht, Nagra, Wettingen, Schweiz.

Nuklearforum (2007): Kernenergie für die Schweiz, Quellenmaterial mit Texten, Bildern und Grafiken für Präsentationen zur Kernenergiediskussion. Nuklearforum Schweiz, Bern.

Pearson, F.J., Arcos, D., Bath, A., Boisson, J.-Y., Fernández, A.M., Gaebler, H.E., Gaucher, E., Gautschi, A., Griffault, L., Hernan, P. & Waber, H.N. (2003): Geochemistry of water in the Opalinus Clay formation at the Mont Terri Rock Laboratory – Synthesis Report. Bern, Switzerland, Berichte des Bundesamtes für Geologie und Wasser – Serie Geologie, Nr. 5. Chapter 5.

Pedersen, K. (2000): Microbial processes in radioactive waste disposal. SKB TR-00-04. SKB, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co, Stockholm, Sweden.

Pfingsten, W. (2001): Indication for self-sealing of a cementitious repository for low- and intermediate-level waste. Nagra Technischer Bericht NTB 01-05, Nagra, Wettingen, Schweiz.

Posiva (2008): Safety Assessment for a KBS-3H Spent Nuclear Fuel Repository at Olkiluoto – Process Report. Posiva Report 2007-09. Posiva Oy, Olkiluoto, Finland.

Schneider, J.W., Zuidema, P., Smith, P.A., Gribi, P. & Niemeyer, M. (1996): Recent Developments in the Safety Assessment of a Repository for High-Level Radioactive Waste Sited in the Crystalline Basement of Northern Switzerland. Proceedings of the International Conference on Deep Geological Disposal of Radioactive Waste, Winnipeg, Manitoba, Canada, 16-19 September 1996.

Schneider, J.W., Zuidema, P., Smith, P.A., Gribi, P. & Niemeyer, M. (1997): Preliminary Calculations of Radionuclide Release and Transport from a Repository for Spent Nuclear Fuel in Switzerland. Proceedings of WM'97, Tucson, Arizona, U.S.A., 2-6 March 1997.

Schwyn, B., Wersin, P., Berner, U., Wieland, E. & Neall, F. (2003): Near-field chemistry of an ILW repository in Opalinus Clay. Unpubl. Nagra Interner Bericht, Wettingen, Schweiz.

SIA Empfehlung 199 (1998): Erfassen des Gebirges im Untertagbau. SIA Empfehlung Nr. 199. Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein, Zürich.

SIA Norm 198 (2004): Untertagbau Ausführung. SIA Norm Nr. 198. Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein, Zürich.

Signorelli, S. & Kohl, T. (2007): Geothermischer Ressourcenatlas der Nordschweiz – Gebiet des Nördlichen Schweizer Mittellandes. Beiträge zur Geologie der Schweiz, Schweiz. Geophys. Komm. 39.

Smith, P., Gribi, P., Mayer, G. & Schneider, J. (2004): Project Opalinus Clay (Entsorgungsnachweis): Supplementary calculations to illustrate the influence of EDZ hydraulic conductivity on radionuclide transport. Unpubl. Nagra Interner Bericht, Wettingen, Schweiz.

Soler, J.M. (2003): Reactive transport modeling of the interaction between a high-pH plume and a fractured marl: the case of Wellenberg. Appl. Geochem. 18, 1555 –1571.

Stroes-Gascoyne, S., Schippers, A., Schwyn, B., Poulain, S., Sergeant, C., Simonoff, M., Marrec, C. Le, Altmann, S., Nagaoka, T., Mauclaire, L., McKenzie, J., Daumas, S., Vinsot, A., Beaucaire, C. & Matray, J. -M. (2007): Microbial Community Analysis of Opalinus Clay Drill Core Samples from the Mont Terri Underground Research Laboratory, Switzerland. Geomicrobiology Journal 24: 1-17.

StSV (1994): Strahlenschutzverordnung vom 22.6.1994 (Stand 4.4.2000), StSV, SR 814.501, Schweiz.

SUVA (2002): Grundlagen zur Charakterisierung der Erdgasgefährdung bei Untertagebauten. Bull. Angew. Geol. Vol. 7/1, 45-65, 2002.

Van Loon, L.R. & Glaus, M.A. (1998): Experimental and theoretical studies on alkaline degradation of cellulose and its impact on the sorption of radionuclides. Nagra Technical Report NTB 97-04. Nagra, Wettingen, Schweiz.

Van Loon, L.R. & Soler, J.M. (2003): Diffusion of HTO, $^{36}Cl^-$, $^{125}I^-$ and $^{22}Na^+$ in Opalinus Clay: Effect of confining pressure, sample orientation, sample depth and temperature. NTB 03-07. Nagra, Wettingen, Schweiz.

Van Loon, L.R., Mueller, W. & Glaus, M.A. (2007): Anion exclusion effects in compacted bentonites: towards a better understanding of anion diffusion. Appl. Geochem. 22, 2536-2552.

Voegelin, A. & Kretzschmar, R. (2002): Stability and mobility of colloids in Opalinus Clay. Nagra Technical Report NTB 02-14. Nagra, Wettingen, Schweiz.

Wieland, E. (2001): Experimental studies on the inventory of cement-derived colloids in the pore water of a cementitious backfill material. Nagra Technical Report NTB 01-02. Nagra, Wettingen, Schweiz.

Anhang 1 Festlegung und Erläuterung der Anforderungen an die Geologie

Abgestimmt auf die gewählte Abfallzuteilung (Kap. 3) und basierend auf dem Barrieren- und Sicherheitskonzept für das SMA- und das HAA-Lager (Kap. 4) werden im vorliegenden Anhang die quantitativen und qualitativen Anforderungen und Vorgaben für die Standortevaluation nach SGT (Etappe 1) festgelegt und erläutert. Ausgangspunkt für die Ableitung der Anforderungen und Vorgaben sowie der Bewertungsskalen sind einerseits die in Kap. 4.4 aufgeführten Sicherheitsfunktionen und Prinzipien, welche bei der Auslegung des geologischen Tiefenlagers zu berücksichtigen sind, und andererseits die zu entsorgenden Abfallmengen und ihre Eigenschaften. Im SGT, Anhang I, wird unterschieden zwischen quantitativen Anforderungen an das Wirtgestein und die Geosphäre (Betrachtungszeitraum, Platzbedarf für Lager), quantitativen Zielvorgaben für das Wirtgestein (Tiefenlage, Mächtigkeit, laterale Ausdehnung und hydraulische Durchlässigkeit) sowie qualitativen vierstufigen Bewertungsskalen für die weiteren Kriterien bzw. Indikatoren zur Sicherheit und Machbarkeit (vgl. Tab. 2.2-4).

Bei den quantitativen Anforderungen an das Wirtgestein und die Geosphäre und bei den quantitativen Zielvorgaben handelt es sich um *Mindestanforderungen*[77], welche die zugehörigen Indikatoren betreffen. Der Betrachtungszeitraum, der festlegt, wie lange die Barrieren des geologischen Tiefenlagers ihre Funktion zu erfüllen haben, wird in Anhang A5.4 diskutiert und festgelegt; er beträgt – unter Berücksichtigung der Radiotoxizität des zugeteilten Abfallinventars und ihrer zeitlichen Entwicklung (radioaktiver Zerfall) – 100'000 Jahre für das SMA-Lager und 1 Million Jahre für das HAA-Lager. Die erforderliche Grösse und der Platzbedarf für das SMA- und HAA-Lager werden anhand der erforderlichen Lagerkapazität (Abfallmengen) und unter Berücksichtigung eines Sicherheitsabstands zu bereichsbegrenzenden geologischen Elementen sowie Zuschlägen für Ungewissheiten in den geometrisch wirksamen Elementen bestimmt. Für die Festlegung der erforderlichen Lagerkapazität wird die Information zum Abfallinventar in Kap. 2 und 3 verwendet. Als Umhüllende für das einzulagernde Abfallvolumen werden für die Evaluation der Platzverhältnisse neben den Abfällen der bestehenden KKW auch die Abfälle absehbarer zukünftiger KKW berücksichtigt sowie die Abfälle aus Medizin, Industrie und Forschung (Tab. 2.5-1b und c): Für das SMA-Lager wird für die Evaluation der Platzverhältnisse von einer Lagerkapazität für 200'000 m^3 für in Endlagerbehälter verpackte Abfälle ausgegangen, für das HAA-Lager für 20'000 m^3 BE/HAA und 7'500 m^3 LMA (s. Kap. 3.3). Der entsprechende Platzbedarf für das SMA- und das HAA-Lager wird in Anhang 2 abgeleitet.

Zusätzlich zu den im SGT geforderten quantitativen Zielvorgaben werden an eine beschränkte Anzahl weiterer Indikatoren Mindestanforderungen gestellt.

Haben gewisse Merkmale einen sehr ausgeprägten Einfluss auf die Sicherheit oder bestehen für die als potenziell möglich eingestuften Varianten in Bezug auf gewisse Merkmale von übergeordneter Bedeutung noch grössere Ungewissheiten, so können für die entsprechenden Indikatoren zusätzlich sogenannte *verschärfte Anforderungen* eingeführt werden, welche über die Mindestanforderungen hinausgehen. Damit soll erreicht werden, dass die resultierenden Varianten (die so genannten bevorzugten Varianten) sich tatsächlich als geeignet erweisen und dass sie bzgl. Sicherheit vergleichbar und von hoher Qualität sind. Damit wird auch sichergestellt, dass im Hinblick auf Etappe 2 des SGT alle Standortgebiete bzw. Standorte das Potenzial haben, sich bezüglich der Sicherheit als vergleichbar zu qualifizieren, wie dies für Etappe 2 gefordert wird

[77] Anhand der Mindestanforderungen werden potenziell mögliche Varianten festgelegt. Das Adjektiv "potenziell" weist darauf hin, dass die Erfüllung aller Mindestanforderungen zwar eine notwendige, nicht aber hinreichende Bedingung dafür ist, dass eine Variante abschliessend als möglich eingestuft werden kann.

(BFE 2008). Diejenigen Varianten, welche die verschärften Anforderungen für die entsprechenden Indikatoren erfüllen, werden als *bevorzugt* bezeichnet; diejenigen Varianten, welche zwar die Mindestanforderungen erfüllen, nicht aber die verschärften Anforderungen, werden *zurückgestellt*. Mit diesem Vorgehen wird erreicht, dass die bevorzugten Varianten bezüglich der für die Sicherheit relevanten Merkmale in der Regel *günstig* bewertet werden.

Die anschliessende *Bewertung* der bevorzugten Varianten erfolgt anhand von Bewertungsskalen und kann für eine Prioritätensetzung benutzt werden (vgl. Nagra 2008b). Wo machbar und sinnvoll, werden für die Bewertungsskalen quantitative Werte verwendet. Teilweise sind jedoch für die Bewertung nur qualitative Argumente und Aussagen möglich, und in einigen Fällen ist es eine Kombination einer quantitativen und qualitativen Bewertung. Da in Etappe 1 des SGT die detaillierte Anordnung der Lagerkammern im Untergrund noch nicht erfolgt, wird für die diesbezüglichen (geometrischen) Bewertungen bei verschiedenen Indikatoren vereinfacht vorgegangen[78].

Einige der Indikatoren kommen bei der stufenweisen Evaluation mehrmals und teilweise in verschiedenen Schritten zur Anwendung: In einer ersten Stufe als Mindestanforderung, in einer zweiten Stufe als verschärfte Anforderung und/oder in einer dritten Stufe für die Bewertung der bevorzugten Varianten.

Bei der Festlegung der Anforderungen werden die Zwischenresultate der Einengungsprozedur – wo notwendig oder sinnvoll – berücksichtigt. Einerseits werden dabei die in der Schweiz zu erwartenden geologischen Verhältnisse berücksichtigt ("relative Bewertung"). Andererseits wird die schrittweise Verschärfung der Anforderungen nur für die weiter zu betrachtenden Varianten formuliert (z.B. werden für das HAA-Lager keine Bewertungsskalen für Wirtgesteine oder Bereiche im Alpenraum formuliert, da dieser Grossraum bereits in Schritt 3 ausgeschlossen wird). Häufig werden in den qualitativen Bewertungsskalen zwei Bewertungsstufen mit dem Hinweis zusammengefasst, dass für die Anforderungen eine graduelle Abstufung vorgesehen wird. Dies erlaubt es, bei der Bewertung der betreffenden Indikatoren situationsbezogene Informationen einfliessen zu lassen und auch Nuancen im direkten Vergleich zwischen verschiedenen Varianten zu berücksichtigen.

Bei der Evaluation der Verbreitung der Wirtgesteine ist zwischen flächenhafter Verbreitung (für SMA und HAA) und lokalen Vorkommen (nur für SMA) zu unterscheiden. Während im östlichen Tafeljura und in der östlichen Subjurassischen Zone die Verbreitung der betrachteten Wirtgesteine flächenhaft ist und mit Hilfe eines Geographischen Informationssystems (GIS) evaluiert werden kann, wird im Helvetikum jedes bekannte grössere lokale Vorkommen von Mergel-Formationen individuell beurteilt. Dabei werden jedoch bei der Beurteilung der lokalen Vorkommen grundsätzlich die gleichen Kriterien bzw. Indikatoren angewendet wie bei den mit GIS untersuchten flächenhaft verbreiteten Vorkommen.

Der vorliegende Anhang enthält zahlreiche Verweise auf den Hauptbericht (Nagra 2008b), insbesondere auf Grundlagen, die hier nicht dupliziert werden, auf Argumente und Aussagen sowie auf Zwischenergebnisse der Einengungsprozedur (Schritte 3 bis 5). Verweise auf den Bericht zur Geologie (Nagra 2008c) sind auf vertiefte Grundlagen, Argumente und Aussagen in Zusammenhang mit spezifischen geologischen Aspekten beschränkt. Dieses Vorgehen wird mit der breiteren Leserschaft des Hauptberichts im Vergleich mit dem Bericht zur Geologie begründet.

---

[78] Dies betrifft insbesondere die Indikatoren 'Laterale Ausdehnung' und 'Länge der Freisetzungspfade'.

Gemäss SGT müssen die Anforderungen und Bewertungsskalen an die Geologie auf die Zuteilung der Abfälle auf die beiden Lagertypen SMA und HAA abgestimmt werden. Wie in Kap. 3.3 dargelegt ist, werden zwei mögliche Varianten der Abfallzuteilung betrachtet:

- In einer ersten Variante (Referenzzuteilung) wird für das SMA-Lager auf Standortbedingungen abgestützt, die im erwarteten Bereich liegen (insbesondere charakterisiert durch eine grossräumige Durchlässigkeit des Wirtgesteins von 10^{-10} m/s). In dieser Variante müssen nur einige wenige der gemäss KEV als SMA eingestuften Abfälle[79] dem HAA-Lager zugeteilt werden (weniger als 1 % des Gesamtvolumens der als SMA eingestuften Abfälle), während alle gemäss KEV als ATA eingestuften Abfälle dem HAA-Lager zugeteilt werden.
- In einer zweiten Variante (alternative Zuteilung) wird für das SMA-Lager auf Standortbedingungen abgestützt, die auf eher ungünstigen Annahmen beruhen (insbesondere charakterisiert durch eine grossräumige Durchlässigkeit des Wirtgesteins von 10^{-9} m/s). In dieser Variante müssen knapp 10 % der gemäss KEV als SMA eingestuften Abfälle dem HAA-Lager zugeteilt werden, während alle gemäss KEV als ATA eingestuften Abfälle dem HAA-Lager zugeteilt werden.

Aufgrund der Einschätzung der geologischen Möglichkeiten in der Schweiz, die erwarten lässt, dass es genügend geeignete Wirtgesteine mit einer grossräumigen hydraulischen Durchlässigkeit von 10^{-10} m/s oder besser gibt (Nagra 2008c), wird die entsprechende Zuteilungsvariante als Referenzzuteilung bezeichnet. Die andere Variante wird als alternative Zuteilung bezeichnet.

Die Festlegung der Anforderungen an die Geologie (bestehend aus Mindestanforderungen, und verschärften Anforderungen) und der Bewertungsskalen wird wie folgt auf die Abfallzuteilung abgestimmt:

- Für das HAA-Lager wird grundsätzlich nur ein Satz von Anforderungen festgelegt; dieser wird primär durch die hochaktiven Abfälle (insbesondere durch die abgebrannten Brennelemente) bestimmt; wo nötig werden bei der Festlegung auch die LMA mitberücksichtigt. Die Evaluation für LMA ist jedoch praktisch unabhängig von der Art und Menge der SMA und ATA, die dem HAA-Lager zugeteilt werden;
- Für das SMA-Lager wird ebenfalls grundsätzlich nur ein Satz von Anforderungen festgelegt. Wo nicht anders vermerkt, gelten die Festlegungen für beide Abfallzuteilungsvarianten. Unterschiedliche Anforderungen und Bewertungsskalen werden einzig an die grossräumige Durchlässigkeit des Wirtgesteins gestellt, entsprechend dem Vorgehen bei der Definition der beiden Zuteilungsvarianten (vgl. Anforderungen in Anhang A1.9).

Teilweise hängen die Indikatoren bzw. die betreffenden Anforderungen und Bewertungsskalen voneinander ab. Dies ist eine Konsequenz aus der Tatsache, dass die Langzeitsicherheit und die bautechnische Machbarkeit übergeordnete Zielsetzungen sind und von zahlreichen Faktoren beeinflusst werden. Die Langzeitsicherheit wird letztlich anhand der übergeordneten Grössen Dosis und Risiko beurteilt; diese Grössen hängen von zahlreichen Einflussgrössen (Indikatoren) ab, womit sich naturgemäss eine Abhängigkeit zwischen diesen ergibt. Als typisches Beispiel sei hier auf die Abhängigkeit zwischen den Indikatoren 'Hydraulische Durchlässigkeit', 'Transmissivität präferenzieller Freisetzungspfade', 'Tongehalt' und 'Selbstabdichtungsvermögen' hingewiesen; alle diese Indikatoren spielen eine wichtige Rolle bei der Begrenzung des Wasserflusses im Nahfeld und in der Geosphäre. Wo solche Abhängigkeiten existieren, wird bei den entsprechenden Beschreibungen im vorliegenden Anhang speziell darauf hingewiesen.

---

[79] Dabei handelt es sich insbesondere um stark aktivierte Reaktoreinbauten und Uran-haltige Abfälle aus der Forschung.

Hauptresultat des vorliegenden Anhangs ist die tabellarische Übersicht aller Anforderungen bzw. Bewertungsskalen für die Grossräume, Wirtgesteine bzw. einschlusswirksamen Gebirgsbereiche[80] und Konfigurationen (vgl. Tab. 5.4-1).

Für die Dokumentation der Informationen im vorliegenden Anhang wird die folgende, einheitliche Struktur verwendet:

Festlegung der Anforderungen und Bewertungsskalen

- Titel des Indikators
- Tabellarische Zusammenfassung der Anforderungen und Bewertungsskalen für den Indikator (entspricht dem Inhalt der Tab. 5.4-1 für den betreffenden Indikator)

Hintergrundinformationen

1. Relevanz für Langzeitsicherheit bzw. bautechnische Machbarkeit:

- Kurzbeschreibung des Indikators und Verweis auf relevante Sicherheitsfunktionen und Prinzipien, relevante Elemente des Barrierensystems und sicherheitsrelevante Eigenschaften in Tab. 5.3-1. Diese Verknüpfung wird in einheitlicher Form als tabellarische Auflistung (in Kästchen) dargestellt, wobei für jeden Indikator systematisch die relevanten Sicherheitsfunktionen und Prinzipien, die relevanten Elemente des Barrierensystems und die relevanten Eigenschaften aus Tab. 5.3-1 gesammelt werden. Wo möglich und sinnvoll (d.h. wo die gleichen Elemente des Barrierensystems bzw. ähnliche oder deckungsgleiche Eigenschaften relevant sind) werden diese Zuordnungen in entsprechenden Kästchen zusammengefasst bzw. leicht gekürzt.

2. Beschreibung und zugehörige Grundlagen:

- Beschreibung des Indikators.
- Annahmen und Grundlagen (teilweise mit Quellenangaben) zur Festlegung der Anforderungen und Bewertungsskalen; Hinweis, ob sich die Anforderungen und Bewertungsskalen auf quantitative Grundlagen (z.B. Radionuklid-Freisetzungsrechnungen oder quantitative Modellvorstellungen zum Verhalten einzelner Barrieren oder Prozesse) oder überwiegend auf Beobachtungen und Erfahrungen abstützen. In vielen Fällen fliessen Expertenbeurteilungen in die Erwägungen mit ein.
- Abgrenzungen zu anderen Indikatoren und Hinweise auf Abhängigkeiten zwischen Indikatoren.

3. Erläuterung der Anforderungen und Bewertungsskalen:

- Mindestanforderungen, verschärfte Anforderungen und Bewertungsskalen.

---

[80] Auf den Zusatz "bzw. einschlusswirksamer Gebirgsbereich" wird häufig verzichtet; für eine umfassende Beurteilung eines Wirtgesteins ist es jedoch notwendig, auch das zugehörige Rahmengestein und mithin den ganzen einschlusswirksamen Gebirgsbereich zu betrachten.

A1.1 Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit

Festlegung der Anforderungen und Bewertungsskalen

Schritt/ Kriterium	Attribut	Anforderungen und Bewertungsskalen	
		SMA	**HAA**
4.1/1.1	Mindest-anforderung (MA, Potenzial)	≤ 800 m u.T. (Sedimentgesteine) ≤ 1200 m u.T. (Kristallingesteine)	≤ 900 m u.T. (Sedimentgesteine) ≤ 1200 m u.T. (Kristallingesteine)
5.1/1.1	Mindest-anforderung (MA)	Lagerebene (Mitte notwendiger einschlusswirksamer Gebirgsbereich [1)]) ≤ 800 m u.T. (Sedimentgesteine) ≤ 1200 m u.T. (Kristallingesteine)	Lagerebene (Mitte notwendiger einschlusswirksamer Gebirgsbereich [1)]) ≤ 900 m u.T. (Sedimentgesteine) ≤ 1200 m u.T. (Kristallingesteine)
5.2/1.1	Verschärfte Anforderung (VA)	Opalinuston und Tongesteins-abfolge 'Brauner Dogger': keine Verschärfung für Tafeljura s.str. und Vorfaltenzone notwendig (VA = MA); Lagerebene (Mitte notwendiger einschlusswirksamer Gebirgsbereich) ≤ 700 m u.T. für östliche Subjurassische Zone [2)] Effinger Schichten und Mergel: keine Verschärfung notwendig (VA = MA)	Für Opalinuston keine Verschärfung für Tafeljura s.str. und Vorfaltenzone notwendig (VA = MA); Lagerebene (Mitte notwendiger einschlusswirksamer Gebirgsbereich) ≤ 800 m u.T. für östliche Subjurassische Zone
5.3/4.1	Sehr günstig	Opalinuston und Tongesteins-abfolge 'Brauner Dogger': Lagerebene (Mitte Wirtgestein [3)]) < VA – 500 m Effinger Schichten und Mergel-Formationen des Helvetikums: Lagerebene (Mitte Wirtgestein) < VA – 350 m	Lagerebene (Mitte Wirtgestein [3)]) < VA – 600 m
	Günstig	Opalinuston und Tongesteins-abfolge 'Brauner Dogger': Lagerebene (Mitte Wirtgestein) zwischen VA – 500 m und VA – 200 m Effinger Schichten und Mergel-Formationen des Helvetikums: Lagerebene (Mitte Wirtgestein) zwischen VA – 350 m und VA	Lagerebene (Mitte Wirtgestein) zwischen VA – 600 m und VA – 300 m

Schritt/ Kriterium	Attribut	Anforderungen und Bewertungsskalen	
		SMA	**HAA**
5.3/4.1	Bedingt günstig	Opalinuston und Tongesteins-abfolge 'Brauner Dogger': Lagerebene (Mitte Wirtgestein) zwischen VA – 200 m und VA	Lagerebene (Mitte Wirtgestein) zwischen VA – 300 m und VA
	Ungünstig	–	–

1) Unter Berücksichtigung der Mindestanforderungen für den Indikator 'Mächtigkeit'.

2) Die VA für die Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger' entfällt, weil diese in der östlichen Subjurassischen Zone nicht vorhanden ist.

3) Bei der Einengung mittels MA/VA beziehen sich die Anforderungen bzgl. Tiefenlage auf die Mitte des notwendigen einschlusswirksamen Gebirgsbereichs, bei der Bewertung der bevorzugten Bereiche hingegen auf die Mitte des Wirtgesteins. Da diese beiden Horizonte nicht in allen Fällen deckungsgleich sind, ergeben sich bei der Bewertung in gewissen Fällen kleinere Unstimmigkeiten.

Hintergrundinformationen

1. Relevanz für Langzeitsicherheit bzw. bautechnische Machbarkeit

Beurteilt wird der Einfluss der Tiefenlage der Lagerebene im Hinblick auf die bautechnische Machbarkeit. Mit zunehmender Tiefenlage bzw. Überlagerung nehmen die *in-situ* Gebirgsspannungen zu, was die Standfestigkeit und das Kurzzeitdeformationsverhalten der ausgebrochenen Hohlräume beeinflusst. Ausschlaggebend für die Langzeitsicherheit des HAA-Lagers ist die Bildung bzw. das Langzeitverhalten einer Auflockerungszone im Grenzbereich zwischen Stollenverfüllung/Versiegelung und Wirtgestein. In den HAA-Lagerstollen sind die Möglichkeiten für Sicherungsmassnahmen begrenzt (Felsanker/Netze, aber nur begrenzte Mengen an zementhaltigen Materialien). Im Falle des SMA-Lagers ist der Grenzbereich zwischen Versiegelung und Wirtgestein für die Langzeitsicherheit relevant (wegen der hochporösen Kavernenverfüllung spielt die Auflockerungszone im Bereich der Kaverne nur eine untergeordnete Rolle, sie muss jedoch räumlich auch in Grenzen gehalten werden, um die Geosphärenbarriere in ihrer Wirkung nicht signifikant zu beinträchtigen). Hier besteht eine grössere Flexibilität bzgl. Sicherungsmassnahmen während des Baus und Betriebs, diese müssen aber vor dem Einbau der Versiegelungen wieder entfernt werden. Abgesehen von diesen Anforderungen aus Gründen der Langzeitsicherheit soll eine sichere und zuverlässige Realisierung über alle Realisierungsphasen (Bau, Einlagerung, Beobachtung und Verschluss), gewährleistet werden können. Dies wird erfüllt, wenn die Standsicherheit der Hohlräume in allen Phasen sichergestellt werden kann.

Relevante Sicherheitsfunktionen:	Einschluss Rückhaltung Kleine Freisetzungsraten
Relevante Elemente des Barrierensystems:	Endlagerbehälter Verfüllung & Versiegelung WG/EG
Sicherheitsrelevante Eigenschaften:	Geometrische und geomechanische Bedingungen Räumliche Ausdehnung WG/EG

Relevantes Prinzip:	Zuverlässige Erstellung der geologischen Tiefenlager
Relevante Elemente des Barrierensystems:	WG/EG Verfüllung & Versiegelung
Sicherheitsrelevante Eigenschaften:	Flexibilität/Reserven Geotechnische Eigenschaften

2. Beschreibung und zugehörige Grundlagen

Das Wirtgestein erfüllt eine wichtige natürliche Barrierenfunktion; deren Erhalt ist eine zentrale Anforderung an die Auslegung und den Bau des Tiefenlagers. Dies wird unter anderem erreicht, indem die Deformationen und die Auflockerung beim Bau und Betrieb der untertägigen Anlagen im Wirtgestein klein gehalten und der Einsatz von Baumaterialien für die Felssicherung dort beschränkt werden, wo der Wasserfluss im Hinblick auf die Langzeitsicherheit klein gehalten werden muss (insbesondere im Bereich der Versiegelungsbauwerke bzw. der HAA-Lagerstollen). Die Deformationen, die Auflockerung und die Standsicherheit hängen ausser von den felsmechanischen Gebirgseigenschaften und den getroffenen Felssicherungsmassnahmen auch stark vom primären Gebirgsspannungszustand ab.

Die Gebirgsspannungen bestimmen massgeblich die bautechnischen Möglichkeiten für ein sicheres Auffahren der Lagerkammern und für den zuverlässigen Einbau der technischen Barrieren. Die vertikalen Gebirgsspannungen nehmen proportional mit der Tiefenlage (Überlagerung) zu, und in Abhängigkeit des Überkonsolidierungsgrades, der lithologischen Eigenschaften und der Tektonik nehmen auch die horizontalen Spannungen mit der Tiefe zu. Letzteres bestimmt auch die Richtung der Hauptspannungstensoren.

Bautechnische Probleme in Bezug auf die Standsicherheit und grosse Auflockerungen sind dann zu erwarten, wenn die Festigkeit des Gebirges infolge Spannungsumlagerungen grösserräumig (im Dekameterbereich) überschritten wird und es zu Bruchvorgängen und plastischen Deformationen um den Hohlraum kommt. Diese spannungsinduzierten Bruchvorgänge sind folglich abhängig vom Spannungszustand und der Gebirgsfestigkeit.

Die bautechnischen Möglichkeiten zur Beherrschung solcher Bruchvorgänge nehmen mit der Grösse des ausgebrochenen Hohlraumes ab und hängen von der Orientierung der Hohlräume in Bezug auf die Hauptspannungsrichtung ab. Somit sind die bautechnischen Möglichkeiten im Falle der voluminösen Lagerkavernen des SMA-Lagers kleiner als im Falle der kleineren Lagerstollen des HAA-Lagers.

Ohne genaue Kenntnisse der felsmechanischen Bedingungen können keine allgemeingültigen, theoretisch eindeutig begründeten Beziehungen zwischen der Tiefenlage und den bautechni-

schen Schwierigkeiten abgeleitet werden. Die Beurteilung muss sich auf Erfahrungswerte (z.B. Tunnelbauten in vergleichbaren geologischen Formationen), semiempirische Gesetzmässigkeiten sowie orientierende felsmechanische Berechnungen stützen. Aufgrund des unterschiedlichen Bruchverhaltens wird zwischen spröden, harten Gesteinen mit hoher Festigkeit (Kristallingesteine) und duktilen, weichen Gesteinen mit eher geringer Festigkeit (Sedimentgesteine mit signifikanten Anteilen von Tonmineralen) unterschieden.

Es liegen Erfahrungen aus Tunneln und Bergbauten sowie aus Felslabors in Sedimentgesteinen und kristallinen Gesteinen mit grosser Überlagerung vor. Erfahrungen aus Tunneln im Opalinuston sind in Nagra (2002a) dokumentiert. Diese Tunnel weisen lokal Überlagerungen bis 800 m (meist aber 200 – 400 m) auf. Letzteres gilt auch für Erfahrungen in Tunnelbauten in anderen tonreichen Sedimentgesteinen[81]. Semi-empirische Gesetzmässigkeiten basieren meistens auf dem Verhältnis zwischen Spannung und einaxialer Gebirgsdruckfestigkeit (Martin et al., 1999; Martin et al., 2002; SIA Norm 198, 2004). Generell steigen die bautechnischen Schwierigkeiten in Tiefenlagen, in denen die Spannungen in der Grössenordnung der halben einaxialen Druckfestigkeit liegen. Weitere Hinweise geben felsmechanische Berechnungen auf der Basis von orientierenden Geodatensätzen (u.a. Nagra 2002a, Nagra 2002b, Nagra 2004b, Nagra 2008i).

Die Anforderungen und Bewertungsskalen für die felsmechanischen Eigenschaften werden im Rahmen des Indikators 'Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften' festgelegt.

3. Erläuterung der Anforderungen und Bewertungsskalen

Der Indikator 'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit' fliesst in die Evaluation der Wirtgesteine in Schritt 4 und der Konfigurationen in Schritt 5 ein. Für den Indikator werden Mindestanforderungen (Schritte 4.1 und 5.1), verschärfte Anforderungen (Schritt 5.2) und Bewertungsskalen (Schritt 5.3) festgelegt. Die nachfolgend aufgeführten Festlegungen für die Tiefenlage der Lagerebene basieren auf Werten, die sicherstellen sollen, dass bei der Einengung keine Wirtgesteine bzw. Bereiche frühzeitig eliminiert werden.

- **Mindestanforderung für SMA** (Schritte 4.1 und 5.1) – Eine Mindestanforderung an die Tiefenlage aus rein bautechnischer Sicht ist schwierig zu formulieren. Einerseits sind die technologischen Möglichkeiten heute bereits beträchtlich (bzw. in Zukunft noch grösser), um Untertag- und Grubenbauten in grossen Tiefenlagen zu meistern, andererseits hängt die maximale Tiefenlage auch stark von den Gebirgseigenschaften ab. Unter Berücksichtigung, dass die Mindestanforderungen an die Gesteinsfestigkeiten relativ weit gefasst wurden, wird für die Mindestanforderung bezüglich der Tiefenlage ein eher vorsichtiger Wert postuliert. Basierend auf den Erfahrungen in vergleichbaren geologischen Formationen orientiert sich dieser an den Erfahrungen im Tunnelbau der Schweiz.
- In Sedimentgesteinen mit signifikanten Anteilen an Tonmineralien wird eine zuverlässige Erstellung der Lagerkavernen und der Versiegelungsbauwerke bis in eine Maximaltiefe von 800 m u.T. als potenziell möglich erachtet, im Falle von Kristallingesteinen bis in eine Tiefe von 1200 m u.T. Ersteres leitet sich vor allem aus den fehlenden Tunnelbauerfahrungen in darüber hinausgehenden Tiefenlagen in vergleichbaren tonreichen Sedimentgesteinen ab. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Grösse der Lagerkavernen sowie die Felssicherungsmassnahmen und die Verkleidung den felsmechanischen Bedingungen angepasst werden können.

[81] Mergel des Palfris: Erfahrungen Seelisbergtunnel (Abschnitt Huttegg) mit maximal 800 m Überlagerung, Effingerschichten: Erfahrungen im Grenchenbergtunnel mit maximal 600 m.

- **Mindestanforderung für HAA** (Schritte 4.1 und 5.1) – In Sedimentgesteinen mit signifikanten Anteilen an Tonmineralien wird eine zuverlässige Erstellung der Lagerstollen bis in eine Maximaltiefe von 900 m u.T. als potenziell möglich erachtet, im Falle von Kristallingesteinen bis in eine Maximaltiefe von 1200 m u.T. Ausgangslage dazu bilden die gleichen Überlegungen zur Mindestanforderung für SMA, wobei aufgrund der deutlich kleineren Querschnitte der Lagerstollen, der kürzeren Standzeit (2 Jahre) und der Ausrichtung der Lagerstollen ungefähr in Richtung der maximalen horizontalen Hauptspannungsrichtung die Mindestanforderung in Sedimentgesteinen um 100 m erhöht wurde.
- **Verschärfte Anforderungen für SMA** (Schritt 5.2) – Aufgrund der bestehenden Ungewissheiten bzgl. der Zuverlässigkeit der Erstellung der Lagerkammern in den betrachteten Gesteinstypen und Tiefen, werden verschärfte Anforderungen an die Maximaltiefe gestellt. Dabei werden vor allem erwartete felsmechanisch ungünstige Bedingungen in Bezug auf das Trennflächengefüge mitberücksichtigt. Die Maximaltiefen werden für den Opalinuston und die Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger' im Tafeljura s.str. und in der Vorfaltenzone bei 800 m u.T. belassen bzw. wegen der tektonischen Überprägung in der östlichen Subjurassischen Zone auf 700 m u.T. verschärft. Für die Effinger Schichten und die Mergel-Formationen des Helvetikums werden die Anforderungen an die Maximaltiefen aufgrund der erwarteten höheren Gebirgsfestigkeit nicht verschärft.
- **Verschärfte Anforderungen für HAA** (Schritt 5.2) – Analog zum SMA-Lager werden die Maximaltiefen für Opalinuston im Tafeljura s.str. und in der Vorfaltenzone bei 900 m u.T. belassen bzw. wegen der tektonischen Überprägung in der östlichen Subjurassischen Zone auf 800 m u.T. verschärft.
- **Bewertungsskala für SMA** (Schritt 5.3) – Als Orientierung zur Festlegung der Bewertungsskala werden die Grenzen gemäss Norm SIA 198 (2004) zugrunde gelegt. Unter Annahme einer repräsentativen Gebirgsfestigkeit für jeden Wirtgesteinstyp können die Grenzen zwischen standfest bis leicht nachbrüchig und Plastifizierung abgeleitet werden. Als sehr günstig werden Tiefenlagenbereiche postuliert, welche mit relativ grosser Sicherheit standfest bleiben, auch wenn die Gebirgseigenschaften nicht sehr günstig sind (z.B bei Klüftungen). Als günstig werden Tiefenlagenbereiche postuliert, die bei eher günstigen Verhältnissen der Gebirgseigenschaften noch standfest bleiben. Als bedingt günstig werden die Tiefenlagen bezeichnet, welche zwar nachbrüchig bis gebräch sein können (Plastifizierungen im Tunnelumfang) aber tiefgreifende Plastifizierungen mit ausgeprägten Instabilitäten ausgeschlossen werden können. Basierend darauf wird beim Opalinuston und der Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger' folgende Bewertungsskala für die Tiefenlage der Lagerebene (Mitte Wirtgestein) verwendet: *sehr günstig,* wenn < VA – 500 m (im Falle der östlichen Subjurassischen Zone entspricht dies gerade der geforderten Mindesttiefe von 200 m, vgl. Indikator 'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf flächenhafte Erosion'); *günstig,* wenn zwischen VA – 500 m und VA – 200 m; *bedingt günstig,* wenn zwischen VA – 200 m und VA. Die Effinger Schichten und die Mergel-Formationen des Helvetikums sind aus bautechnischer Sicht etwas vorteilhafter. Bei ihnen sieht die Bewertungsskala wie folgt aus: *sehr günstig,* wenn < VA – 350 m; *günstig,* wenn zwischen VA – 350 m und VA. VA steht dabei für "verschärfte Anforderung".
- **Bewertungsskala für HAA** (Schritt 5.3) – In Anlehnung an die Bewertungsskala für SMA wird für HAA die folgende Bewertungsskala für die Tiefenlage der Lagerebene (Mitte Wirtgestein) verwendet: *sehr günstig,* wenn < VA – 600 m (allerdings wird diese Bewertungsstufe für das HAA-Lager wegen der geforderten Mindesttiefe nirgends erreicht, vgl. Indikatoren 'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteins-Dekompaktion' und 'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf flächenhafte Erosion'); *günstig,* wenn zwischen VA – 600 m und VA – 300 m; *bedingt günstig,* wenn zwischen VA – 300 m und VA.

Man beachte, dass sowohl bei SMA wie auch bei HAA in den Bewertungsskalen die Einstufung *bedingt günstig* auftritt, obwohl das sonst im Falle einer verschärften Anforderung nicht vorgesehen ist. Diese Abweichung vom Konzept wird toleriert, damit das Spektrum der Möglichkeiten nicht frühzeitig stärker eingeschränkt wird.

A1.2 Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteins-Dekompaktion

Festlegung der Anforderungen und Bewertungsskalen

Schritt/ Kriterium	**Attribut**	**Anforderungen und Bewertungsskalen**	
		SMA	**HAA**
5.1/1.1	Mindest-anforderung (MA)	Top notwendiger einschluss-wirksamer Gebirgsbereich ≥ 200 m u.T.	Top notwendiger einschluss-wirksamer Gebirgsbereich ≥ 400 m u.T.
5.2/1.1	Verschärfte Anforderung (VA)	Opalinuston: Top notwendiger einschlusswirksamer Gebirgsbereich [1] ≥ 200 m u.T., wo obere Rahmengesteine nicht notwendig; ≥ 300 m u.T., wo obere Rahmengesteine notwendig Effinger Schichten und Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger': Top notwendiger einschluss-wirksamer Gebirgsbereich ≥ 300 m u.T. Mergel-Formationen des Helvetikums: Top notwendiger einschlusswirksamer Gebirgsbereich ≥ 400 m u.T.	Opalinuston: Top notwendiger einschlusswirksamer Gebirgsbereich [1] ≥ 400 m u.T., wo obere Rahmengesteine nicht notwendig; ≥ 500 m u.T., wo obere Rahmengesteine notwendig
5.3/1.2	Sehr günstig	Top notwendiger einschlusswirk-samer Gebirgsbereich: ≥ VA + 100 m	Top notwendiger einschlusswirk-samer Gebirgsbereich: ≥ VA + 200 m
	Günstig	Top notwendiger einschlusswirk-samer Gebirgsbereich: VA bis VA + 100 m	Top notwendiger einschlusswirk-samer Gebirgsbereich: VA bis VA + 200 m
	Ungünstig bis bedingt günstig	– [2]	– [2]

[1] Unter Berücksichtigung der verschärften Anforderungen für den Indikator 'Mächtigkeit'.

[2] Diese Bewertungsstufen sind nicht erforderlich, da alle bewerteten Varianten die verschärften Anforderungen erfüllen müssen und damit als mindestens *günstig* beurteilt werden.

Hintergrundinformationen

1. Relevanz für Langzeitsicherheit bzw. bautechnische Machbarkeit

Der Indikator 'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteins-Dekompaktion' bezieht sich auf die Distanz zwischen der Obergrenze des notwendigen einschlusswirksamen Gebirgsbereichs und der Terrainoberfläche. Er dient der Begrenzung der Auswirkungen von Gesteins-Dekompaktionseffekten auf die Langzeitsicherheit (Dekompaktionseffekte können eine Erhöhung der hydraulischen Durchlässigkeit im Wirtgestein bewirken und damit die Wasserflussraten und Radionuklid-Freisetzungsraten aus den technischen und geologischen Barrieren erhöhen).

Relevante Sicherheitsfunktion:	Einschluss
Relevante Elemente des Barrierensystems:	Endlagerbehälter Weitere technische Barrieren
Sicherheitsrelevante Eigenschaften:	Geometrische Bedingungen

Relevante Sicherheitsfunktionen:	Verzögerte Freisetzung Rückhaltung Kleine Freisetzungsraten
Relevante Elemente des Barrierensystems:	Abfallmatrix Verfüllung & Versiegelung WG/EG
Sicherheitsrelevante Eigenschaften:	Stabilität der Abfallmatrix sowie der Verfüll- und Versiegelungsmaterialien dank geringer Wasserführung Rückhaltung und kleine Freisetzungsraten dank geringem Wasserfluss und günstigen Transporteigenschaften Räumliche Ausdehnung WG/EG

Relevantes Prinzip:	Zuverlässige Erstellung der geologischen Tiefenlager
Relevante Elemente des Barrierensystems:	WG/EG
Sicherheitsrelevante Eigenschaften:	Flexibilität/Reserven

2. Beschreibung und zugehörige Grundlagen

Die grossräumige hydraulische Durchlässigkeit wird wirtgesteinsspezifisch bewertet (s. Indikator 'Hydraulische Durchlässigkeit'). Wenn durch Hebungs- und Erosionsprozesse die Überdeckung abnimmt, können Dekompaktionseffekte zu einer Erhöhung der hydraulischen Durchlässigkeit um mehrere Grössenordnungen führen. Die Erhöhung hängt vom Gesteinstyp, dem Grad der Überkonsolidierung und lokalen Aspekten (z.B. Spannungsfeld, Topographie) ab. In mässig überkonsolidierten Tongesteinen ist der Effekt in den obersten 10 bis 30 m sehr ausgeprägt und kann, wenn auch stark abgeschwächt, bis in eine Tiefe von rund 200 m nachgewiesen werden. In kalkigeren oder stärker überkonsolidierten Gesteinen (z.B. Palfris-Formation Wellenberg) sind Dekompaktionseffekte bis in Tiefen von mindestens 400 m, in Kristallingesteinen in der Nordschweiz und in den Alpen bis mindestens 500 m Tiefe nachgewiesen, was qualitativ auch mit Beobachtungen anderswo (Schweden, Finnland) übereinstimmt. Eine detail-

liertere Darstellung des Einflusses der Dekompaktion und der notwendigen Überdeckung für die verschiedenen Wirtgesteine findet sich in Nagra (2008c).

Beim Indikator 'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteins-Dekompaktion' wird die Tiefenlage zum Zeitpunkt des Verschlusses des Lagers bewertet; die Zunahme der Durchlässigkeit, die im oberen Randbereich des Wirtgesteins mit der Abnahme der Überdeckung infolge Erosion verbunden ist, kann akzeptiert werden, weil mit fortschreitender Zeit durch den Zerfall auch die Radiotoxizität der Abfälle abnimmt. Die Abnahme der Überdeckung selbst wird durch zwei andere Indikatoren berücksichtigt, nämlich durch die Indikatoren 'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf flächenhafte Erosion' und 'Tiefenlage unter Oberfläche Fels im Hinblick auf glaziale Tiefenerosion'.

3. Erläuterung der Anforderungen und Bewertungsskalen

Der Indikator 'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteins-Dekompaktion' fliesst in die Evaluation der Konfigurationen in Schritt 5 ein (s. oben). Für den Indikator werden Mindestanforderungen (Schritt 5.1), verschärfte Anforderungen (Schritt 5.2) und Bewertungsskalen (Schritt 5.3) festgelegt.

- **Mindestanforderung für SMA** (Schritt 5.1) – Der Mindestabstand zwischen Oberkante Terrain und Obergrenze des Wirtgesteins (bzw. Top notwendiger einschlusswirksamer Gebirgsbereich) beträgt 200 m. Die bei einer Erosionsrate von 0.5 mm/a[82] über den Betrachtungszeitraum von 100'000 Jahren resultierende Erosion von ca. 50 m ist von untergeordneter Bedeutung für die Langzeitsicherheit.
- **Mindestanforderung für HAA** (Schritt 5.1) – Es wird gefordert, dass die Obergrenze des Wirtgesteins (bzw. Top notwendiger einschlusswirksamer Gebirgsbereich) mindestens 400 m unter Terrain liegt. Damit wird die gleiche Mindestanforderung gestellt wie beim Indikator 'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf flächenhafte Erosion'. Der Mindestabstand ist um 200 m grösser als bei SMA. Diese Differenz entspricht der Erosion über den Betrachtungszeitraum von 1 Million Jahren bei einer Erosionsrate von 0.2 mm/a[83].
- **Verschärfte Anforderungen für SMA** (Schritt 5.2) – Die Anforderung an die Überdeckung des notwendigen einschlusswirksamen Gebirgsbereichs wird in Schritt 5.2 erhöht. Damit wird eine ausreichend tiefe hydraulische Durchlässigkeit unter Berücksichtigung der Dekompaktionseffekte und der diesbezüglichen Ungewissheiten gewährleistet. Diese Festlegung erfolgt für die in Schritt 4 identifizierten bevorzugten Wirtgesteine und berücksichtigt deren unterschiedliches Verhalten gegenüber Dekompaktion (Nagra 2008b): $\geq$ 200 m u.T. (d.h. keine Verschärfung) für den Opalinuston, wo obere Rahmengesteine nicht notwendig sind; $\geq$ 300 m u.T. für die Effinger Schichten, die Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger' und den Opalinuston, wo obere Rahmengesteine notwendig sind; $\geq$ 400 m u.T. für die Mergel-Formationen des Helvetikums. Für Opalinuston kommt also die verschärfte Anforderung nur zur Anwendung, wenn die Rahmengesteine beansprucht werden müssen.
- **Verschärfte Anforderungen für HAA** (Schritt 5.2) – Die Anforderung an die Überdeckung wird wie für SMA erhöht. Damit ergeben sich die folgenden Werte: $\geq$ 400 m u.T. (d.h. keine Verschärfung) für Opalinuston, wo obere Rahmengesteine nicht notwendig sind; $\geq$ 500 m u.T. für Opalinuston, wo obere Rahmengesteine notwendig sind.

---

[82] Entspricht einer typischen Hebungsrate z.B. in den Voralpen.

[83] Entspricht einer typischen Hebungsrate in der Nordschweiz.

- **Bewertungsskalen für SMA und HAA** (Schritt 5.3) – Die Festlegung der Bewertungsskala geht von den verschärften Anforderungen aus. Wenn die Tiefenlage bei SMA die verschärfte Anforderung um mehr als 100 m übertrifft, ergibt sich die Bewertung *sehr günstig*. Bei HAA beträgt der betreffende Zuschlag 200 m. Für Tiefenlagen zwischen der verschärften Anforderung und der verschärften Anforderung plus Zuschlag resultiert die Bewertung *günstig*. Der Zuschlag von 100 m entspricht einer Erosionsrate von 0.5 mm/a über einen Betrachtungszeitraum von 100'000 Jahren (SMA) und einem weiteren Zuschlag von 50 m (Berücksichtigung Ungewissheiten), und der Zuschlag von 200 m entspricht einer Erosionsrate von 0.2 mm/a über einen Betrachtungszeitraum von 1 Million Jahren (HAA).

A1.3 Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf flächenhafte Erosion

Festlegung der Anforderungen und Bewertungsskalen

Schritt/ Kriterium	Attribut	Anforderungen und Bewertungsskalen	
		SMA	**HAA**
4.1/1.1	Mindest-anforderung (MA, Potenzial)	≥ 200 m u.T.	≥ 400 m u.T.
5.1/1.1	Mindest-anforderung (MA)	Top notwendiger einschlusswirksamer Gebirgs-bereich ≥ 200 m u.T.	Top notwendiger einschlusswirksamer Gebirgs-bereich ≥ 400 m u.T.
5.3/2.2		Beurteilung der Überdeckung nach Ablauf des Betrachtungs-zeitraums von 100'000 Jahren für SMA:	Beurteilung der Überdeckung nach Ablauf des Betrachtungs-zeitraums von 1 Mio. Jahren für HAA:
	Sehr günstig	Top notwendiger einschluss-wirksamer Gebirgsbereich noch nicht von Dekompaktion betroffen	Bewertungsstufen wie bei SMA
	Günstig	Wirtgestein mehrheitlich noch nicht von Dekompaktion betroffen	
	Ungünstig bis bedingt günstig (graduelle Abstufung)	Lager knapp unter der Terrain-oberfläche	

Hintergrundinformationen

1. Relevanz für Langzeitsicherheit bzw. bautechnische Machbarkeit

Der Indikator 'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf flächenhafte Erosion' bezieht sich auf die Distanz zwischen der Obergrenze des notwendigen einschlusswirksamen Gebirgsbereichs und der Terrainoberfläche. Er dient der Beurteilung der Auswirkungen der flächenhaften Erosion auf die Langzeitsicherheit (Abnahme der Gesteins-Überdeckung, und schliesslich Freilegung des Tiefenlagers durch langfristige Hebung/Erosion).

Relevante Sicherheitsfunktionen:	Isolation Gewährleistung Langzeitstabilität Einschluss
Relevante Elemente des Barrierensystems:	Technische Barrieren Geologische Situation
Sicherheitsrelevante Eigenschaften:	Physische Trennung der Abfälle vom menschlichen Lebensraum Schutz des Lagers vor Prozessen und Ereignissen an der Erdoberfläche (z.B. Erosion) Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften Geometrische Bedingungen

Relevante Sicherheitsfunktionen:	Rückhaltung Kleine Freisetzungsraten
Relevante Elemente des Barrierensystems:	WG/EG
Sicherheitsrelevante Eigenschaften:	Räumliche Ausdehnung WG/EG

Relevantes Prinzip:	Zuverlässige Erstellung der geologischen Tiefenlager
Relevante Elemente des Barrierensystems:	WG/EG
Sicherheitsrelevante Eigenschaften:	Flexibilität/Reserven

2. Beschreibung und zugehörige Grundlagen

Eine integrale Beurteilung der Beeinträchtigung eines Tiefenlagers durch flächenhafte Erosion erfolgt aufgrund der Tiefenlage der Wirtgesteins-Obergrenze (bzw. Top notwendiger einschlusswirksamer Gebirgsbereich)[84], der rezenten Erosions- bzw. Hebungsraten und des Betrachtungszeitraums (10^5 Jahre für SMA und 10^6 Jahre für HAA, vgl. Anhang A5.4). Es besteht ein enger Zusammenhang mit dem Indikator 'Grossräumige Erosion im Betrachtungszeitraum' und dem Indikator 'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteins-Dekompaktion'.

Gestützt auf die allgemeinen Kenntnisse über die geomorphologische Entwicklungsgeschichte der Schweiz kann man von der plausiblen Annahme ausgehen, dass die Geländeformen in den nächsten 100'000 Jahren wie in der jüngeren geologischen Vergangenheit in den Grundzügen erhalten bleiben und dass die Erosion mit der Hebung ungefähr Schritt halten wird. Somit dürften die grossräumigen Erosionsraten in derselben Grössenordnung liegen wie die grossräumigen Hebungsraten[85]. Je nach Grossraum muss jedoch auch einer fortschreitenden Einebnung der Topographie durch lokale Erosion die nötige Beachtung geschenkt werden. Für einen Betrachtungszeitraum von 1 Million Jahren gelten grundsätzlich die gleichen Aussagen, wobei jedoch die Ungewissheiten über die zukünftigen Hebungs- und Erosionsraten grösser sind.

---

[84] Im Sinne eines vorsichtigen Vorgehens fliesst statt der Lagerebene die Wirtgesteins-Obergrenze (bzw. Top notwendiger einschlusswirksamer Gebirgsbereich) als massgeblicher Bezugshorizont in die Beurteilung der flächenhaften Erosion ein. Damit wird sichergestellt, dass nach Ablauf des Betrachtungszeitraums noch eine ausreichende Überdeckung der Lagerebene vorhanden ist.

[85] Die langfristigen Denudations- und Exhumationsraten in den Alpen und im Alpenvorland liegen vorwiegend in einem ähnlichen Bereich oder sind niedriger als die rezenten Hebungsraten (Nagra 2008c).

Die Tiefenlage unter der Felsoberfläche, die im Hinblick auf die glaziale Tiefenerosion relevant ist, wird separat diskutiert (s. Indikator 'Tiefenlage unter Oberfläche Fels im Hinblick auf glaziale Tiefenerosion').

3. Erläuterung der Anforderungen und Bewertungsskalen

Der Indikator 'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf flächenhafte Erosion' fliesst in die Evaluation der Wirtgesteine in Schritt 4 und in die Evaluation der Konfigurationen in Schritt 5 ein (s. oben). Einerseits wird eine Mindestanforderung bzgl. des Potenzials der betrachteten Wirtgesteine für eine ausreichende Tiefenlage festgelegt (Schritt 4.1). Die Mindestanforderung wird anschliessend auch konfigurationsspezifisch überprüft (Schritt 5.1). Schliesslich wird für die Bewertung der verbleibenden Varianten eine Bewertungsskala festgelegt (Schritt 5.3).

- **Mindestanforderung für SMA** (Schritte 4.1 und 5.1) – Es wird gefordert, dass die Obergrenze des Wirtgesteins (bzw. Top notwendiger einschlusswirksamer Gebirgsbereich) mindestens 200 m unter Terrain liegt. Dieser Wert entspricht der Erosion über den Betrachtungszeitraum von 10^5 Jahren bei einer Erosionsrate von 2 mm/a. Auf eine räumliche Differenzierung der Mindestanforderung wird verzichtet, weil im Hinblick auf Dekompaktionseffekte und deren Auswirkungen auf die hydraulische Durchlässigkeit ohnehin nur Bereiche betrachtet werden, in denen die Überdeckung mindestens 200 m beträgt (s. Erläuterung der Anforderungen für Indikator 'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteins-Dekompaktion'). In Schritt 4.1 ist nur das Potenzial für die Mindesttiefe der Wirtgesteine zu betrachten, während in Schritt 5.1 die Mindesttiefe konfigurationsspezifisch geprüft wird.
- **Mindestanforderung für HAA** (Schritte 4.1 und 5.1) – Es wird gefordert, dass die Obergrenze des Wirtgesteins (bzw. Top notwendiger einschlusswirksamer Gebirgsbereich) mindestens 400 m unter Terrain liegt. Dieser Wert entspricht der Erosion über den Betrachtungszeitraum von 10^6 Jahren bei einer Erosionsrate von 0.4 mm/a. Wie bei SMA ist in Schritt 4.1 nur das Potenzial für eine Mindesttiefe der Wirtgesteine zu betrachten, während in Schritt 5.1 die Mindesttiefe konfigurationsspezifisch geprüft wird.
- Eine Verschärfung der Anforderungen an die Tiefenlage erfolgt für SMA und HAA im Rahmen des Indikators 'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteins-Dekompaktion'.
- **Bewertungsskalen für SMA und HAA** (Schritt 5.3) – Zur Bewertung der Tiefenlage im Hinblick auf flächenhafte Erosion (Schritt 5.3) wird die Überdeckung nach Ablauf des Betrachtungszeitraums untersucht. Wenn die Obergrenze des notwendigen einschlusswirksamen Gebirgsbereichs zu jenem Zeitpunkt noch nicht von Dekompaktion betroffen ist, wird die Tiefenlage als *sehr günstig* eingestuft. Der Begriff "nicht von Dekompaktion betroffen" bedeutet, dass die verschärften Anforderungen für den Indikator 'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteins-Dekompaktion' erfüllt sind, mit Unterschieden zwischen den Wirtgesteinen sowie zwischen SMA und HAA. Wenn das Wirtgestein mehrheitlich noch nicht von Dekompaktion betroffen ist, wird die Tiefenlage als *günstig* beurteilt. Wenn das Lager mehr oder weniger knapp unter der Terrainoberfläche liegt, ergibt sich die Bewertung *ungünstig* bis *bedingt günstig* je nach verbliebener Überdeckung. Die nicht näher festgelegten Begriffe "mehrheitlich" und "knapp" berücksichtigen die Tatsache, dass die Überdeckung räumlich variieren kann und deshalb bei der Bewertung eines Bereichs teilweise ein gewisser Ermessensspielraum besteht. Für die Durchführung der Bewertung muss die Überdeckung nach Ablauf des Betrachtungszeitraums abgeschätzt werden. Dabei wird grundsätzlich mit den rezenten Hebungsraten für den jeweiligen Bereich gerechnet und mit der Annahme, dass Hebung und Erosion annähernd im Gleichgewicht stehen.

A1.4 Tiefenlage unter Oberfläche Fels im Hinblick auf glaziale Tiefenerosion

Festlegung der Anforderungen und Bewertungsskalen

Schritt/ Kriterium	Attribut	Anforderungen und Bewertungsskalen	
		SMA	**HAA**
5.1/1.1	Mindest-anforderung (MA)	Top notwendiger einschluss-wirksamer Gebirgsbereich ≥ 200 m unter Felsoberfläche im Bereich von übertieften Felsrinnen [1)]	Top notwendiger einschluss-wirksamer Gebirgsbereich ≥ 400 m unter Felsoberfläche im Bereich von übertieften Felsrinnen [1)]
5.2/1.1	Verschärfte Anforderung (VA)	Top notwendiger einschluss-wirksamer Gebirgsbereich ≥ 300 m unter Felsoberfläche im Bereich von übertieften Felsrinnen, ≥ 200 m unter Felsoberfläche ausserhalb übertiefter Felsrinnen [1)]	Top notwendiger einschluss-wirksamer Gebirgsbereich ≥ 500 m unter Felsoberfläche im Bereich von übertieften Felsrinnen; ≥ 400 m unter Felsoberfläche ausserhalb von übertieften Felsrinnen [1)]
5.3/2.2	Sehr günstig	Top notwendiger einschlusswirksamer Gebirgsbereich > VA + 100 m oder Lage des Bereichs ausserhalb der Haupttäler	
	Günstig	Top notwendiger einschlusswirksamer Gebirgsbereich: VA bis VA + 100 m	
	Ungünstig bis bedingt günstig	– [2)]	

[1)] Als übertiefte Felsrinnen werden aus praktischen Gründen Rinnen mit einer Quartärmächtigkeit von mindestens 100 m definiert.

[2)] Diese Bewertungsstufen sind nicht erforderlich, da alle bewerteten Varianten die verschärften Anforderungen erfüllen müssen und damit als mindestens *günstig* beurteilt werden.

Hintergrundinformationen

1. Relevanz für Langzeitsicherheit bzw. bautechnische Machbarkeit

Der Indikator 'Tiefenlage unter Oberfläche Fels im Hinblick auf glaziale Tiefenerosion' bezieht sich auf die Distanz zwischen der Obergrenze des notwendigen einschlusswirksamen Gebirgsbereichs und der Oberfläche Fels. Er dient der Beurteilung der Auswirkungen der glazialen Tiefenerosion auf die Langzeitsicherheit (Abnahme der Gesteins-Überdeckung, und Freilegung des Tiefenlagers durch glaziale Erosion unter Berücksichtigung der langfristigen Hebung/ Erosion).

Relevante Sicherheitsfunktionen:	Isolation Gewährleistung Langzeitstabilität Einschluss
Relevante Elemente des Barrierensystems:	Technische Barrieren Geologische Situation
Sicherheitsrelevante Eigenschaften:	Physische Trennung der Abfälle vom menschlichen Lebensraum Schutz des Lagers vor Prozessen und Ereignissen an der Erdoberfläche (z.B. Erosion) Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften Geometrische Bedingungen

Relevante Sicherheitsfunktionen:	Rückhaltung Kleine Freisetzungsraten
Relevante Elemente des Barrierensystems:	WG/EG
Sicherheitsrelevante Eigenschaften:	Räumliche Ausdehnung WG/EG

Relevantes Prinzip:	Zuverlässige Erstellung der geologischen Tiefenlager
Relevante Elemente des Barrierensystems:	WG/EG
Sicherheitsrelevante Eigenschaften:	Flexibilität/Reserven

2. Beschreibung und zugehörige Grundlagen

Aufgrund der heutigen Kenntnisse wird davon ausgegangen, dass die zukünftige glaziale Tiefenerosion im Alpenvorland bevorzugt entlang bestehender übertiefter Felsrinnen[86] erfolgt. Bereiche ausserhalb der bestehenden übertieften Felsrinnen bleiben unter dieser Voraussetzung von der glazialen Tiefenerosion weitgehend unbeeinträchtigt.

Als alternatives Szenarium ist in Betracht zu ziehen, dass die glaziale Tiefenerosion nicht zwingend auf die bestehenden übertieften Felsrinnen beschränkt bleiben muss, sondern sich bis zu einem gewissen Grad neue Wege bahnen könnte. Auch in diesem Fall wäre die Gletscherzunge jedoch an die topographischen Gegebenheiten gebunden und würde deshalb die Haupttäler aller Wahrscheinlichkeit nach nicht verlassen. Zudem befinden sich die meisten glazial übertieften Felsrinnen im Bereich heutiger Haupttäler.

3. Erläuterung der Anforderungen und Bewertungsskalen

Der Indikator 'Tiefenlage unter Oberfläche Fels im Hinblick auf glaziale Tiefenerosion' fliesst in die Evaluation der Konfigurationen in Schritt 5 ein (s. oben). Für den Indikator werden Mindestanforderungen (Schritt 5.1), verschärfte Anforderungen (Schritt 5.2) und Bewertungsskalen (Schritt 5.3) festgelegt.

---

[86] Als übertiefte Felsrinnen werden aus praktischen Gründen Rinnen mit einer Quartärmächtigkeit von mindestens 100 m definiert.

- **Mindestanforderung für SMA** (Schritt 5.1) – Im Bereich von übertieften Felsrinnen wird für die Obergrenze des notwendigen einschlusswirksamen Gebirgsbereichs eine Tiefe von mindestens 200 m unter Felsoberfläche gefordert. Damit wird sichergestellt, dass selbst dann noch eine ausreichende Überdeckung bestehen bleibt, wenn zukünftige Gletscher die vergleichsweise leicht erodierbaren Quartärablagerungen vollständig ausräumen. Zahlenmässig ist der Mindestabstand von 200 m gleich wie die Mindestanforderung beim Indikator 'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf flächenhafte Erosion'. Zu berücksichtigen ist allerdings der unterschiedliche Bezugshorizont, entsprechend der Bezeichnung des Indikators.
- **Mindestanforderung für HAA** (Schritt 5.1) – Im Bereich von übertieften Felsrinnen wird für die Obergrenze des notwendigen einschlusswirksamen Gebirgsbereichs eine Tiefe von mindestens 400 m unter Felsoberfläche gefordert. Damit wird wie bei SMA sichergestellt, dass selbst dann noch eine ausreichende Überdeckung bestehen bleibt, wenn zukünftige Gletscher die vergleichsweise leicht erodierbaren Quartärablagerungen vollständig ausräumen. Weiter wird damit der längere Betrachtungszeitraum berücksichtigt. Die Erhöhung des Mindestabstands um 200 m gegenüber SMA entspricht einer mittleren Erosionsrate von 0.2 mm/a über den Betrachtungszeitraums von 1 Million Jahren. Zahlenmässig ist der Mindestabstand unter Felsoberfläche gleich wie die zugehörige Mindestanforderung beim Indikator 'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf flächenhafte Erosion'.
- **Verschärfte Anforderung für SMA** (Schritt 5.2) – Um zu berücksichtigen, dass zukünftige Gletscher möglicherweise nicht ausnahmslos den bestehenden tiefsten Felsrinnen folgen, wird auch ausserhalb übertiefter Felsrinnen als verschärfte Anforderung die minimale Tiefenlage von 200 m generell unter Felsoberfläche gefordert und nicht mehr unter Terrain. Im Bereich übertiefter Felsrinnen wird eine minimale Tiefenlage von 300 m unter Felsoberfläche gefordert, d.h. ein um 100 m grösserer Wert. Damit werden u.a. lokale Effekte berücksichtigt sowie die Ungewissheiten in der Tiefe der übertieften Felsrinnen.
- **Verschärfte Anforderung für HAA** (Schritt 5.2) – Vorgehen und Argumentation sind gleich wie für SMA, ausser dass die Schwellen erhöht werden und zwar ausserhalb übertiefter Felsrinnen von 200 m auf 400 m und im Bereich übertiefter Felsrinnen von 300 m auf 500 m. Die Anforderungen für SMA und HAA differieren somit einheitlich um 200 m. Dies entspricht einer Erosionsrate von 0.2 mm/a über den Betrachtungszeitraum von 1 Million Jahren.
- **Bewertungsskalen für SMA und HAA** (Schritt 5.3) – Die Bewertungsstufen werden wie folgt festgelegt: *Sehr günstig*, falls die Tiefenlage unter Felsoberfläche grösser als VA + 100 m ist oder falls der bevorzugte Bereich ausserhalb der Haupttäler liegt (z.B. Rhein, Aare, Thur, Glatt) und die verschärfte Anforderung erfüllt ist. *Günstig,* falls die Tiefenlage unter Felsoberfläche zwischen VA und VA + 100 m liegt.

A1.5 Mächtigkeit

Festlegung der Anforderungen und Bewertungsskalen

Schritt/ Kriterium	Attribut	Anforderungen und Bewertungsskalen	
		SMA	**HAA**
4.1/1.1	Mindest-anforderung (MA, Potenzial)	≥ 100 m (Sedimentgesteine) bzw. ≥ 50 m (Sedimentgesteine mit Akkumulationspotenzial) ≥ 200 m (Kristallingesteine)	
5.1/1.1	Mindest-anforderung (MA)	Nutzbare [1)] Mächtigkeit ≥ 100 m Mindestabstand der Lagerebene zu Top und Basis des Wirtgesteins: Opalinuston: je ≥ 20 m Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger': kein Mindestabstand Effinger Schichten und Mergel-Formationen des Helvetikums: je ≥ 50 m	Nutzbare [1)] Mächtigkeit ≥ 100 m Mindestabstand der Lagerebene zu Top und Basis Opalinuston: je ≥ 20 m
5.2/1.1	Verschärfte Anforderung (VA)	Nutzbare [2)] Mächtigkeit ≥ 100 m für Opalinuston mit Rahmen-gesteinen, mit Abzug von 30 % auf die Mächtigkeit von Rahmen-gesteinen, wo diese zum Erreichen der notwendigen Mächtigkeit benötigt werden Nutzbare Mächtigkeit ≥ 150 m für Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger' mit Rahmengesteinen (davon ≥ 75 m innerhalb 'Brauner Dogger') Nutzbare Mächtigkeit ≥ 200 m für Effinger Schichten und Mergel-Formationen des Helvetikums (bei beiden sind keine Rahmen-gesteine vorhanden)	Nutzbare [2)] Mächtigkeit ≥ 100 m für Opalinuston mit Rahmen-gesteinen, mit Abzug von 30 % auf die Mächtigkeit von Rahmen-gesteinen, wo diese zum Erreichen der notwendigen Mächtigkeit benötigt werden; Abstand der Lagerebene zu Top und Basis Opalinuston je ≥ 40 m.

Schritt/ Kriterium	Attribut	Anforderungen und Bewertungsskalen	
		SMA	**HAA**
5.3/1.1	Sehr günstig	Opalinuston: nutzbare Mächtigkeit Opalinuston ≥ 100 m und obere und untere Rahmengesteine je ≥ 25 m, wobei als untere Rahmengesteine nur die Zone bis Top Arietenkalk betrachtet wird Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger': nutzbare Mächtigkeit 'Brauner Dogger' mit oberen und unteren Rahmengesteinen ≥ 200 m und Mächtigkeit 'Brauner Dogger' mit oberen Rahmengesteinen ≥ 100 m Effinger Schichten und Mergel-Formationen des Helvetikums: nutzbare Mächtigkeit ≥ 250 m	Opalinuston: nutzbare Mächtigkeit Opalinuston ≥ 100 m und obere und untere Rahmengesteine je ≥ 25 m, wobei als untere Rahmengesteine nur die Zone bis Top Arietenkalk betrachtet wird
	Günstig	Alle anderen Fälle (die VA erfüllen)	Alle anderen Fälle (die VA erfüllen)
	Ungünstig bis bedingt günstig	– [3)]	– [3)]

[1)] Der nutzbare Teil des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs muss hier alle Mindestanforderungen bzgl. Tiefenlage erfüllen.

[2)] Der nutzbare Teil des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs muss hier alle verschärften Anforderungen bzgl. Tiefenlage erfüllen.

[3)] Diese Bewertungsstufen sind nicht erforderlich, da alle bevorzugten Bereiche die verschärften Anforderungen erfüllen müssen und damit als mindestens *günstig* beurteilt werden.

Hintergrundinformationen

1. Relevanz für Langzeitsicherheit bzw. bautechnische Machbarkeit

Die Mächtigkeit des Wirtgesteins und seiner Rahmengesteine bestimmt im Wesentlichen die vertikale (in der Regel minimale) Länge der Freisetzungspfade für Radionuklide innerhalb des Wirtgesteins. Zusammen mit den Rückhalte- und Transporteigenschaften der technischen und geologischen Barrieren hat die Länge der Freisetzungspfade einen massgeblichen Einfluss auf die Radionuklid-Freisetzungsraten aus der Geosphäre.

Relevante Sicherheitsfunktion:	Einschluss
Relevante Elemente des Barrierensystems:	Endlagerbehälter Weitere technische Barrieren
Sicherheitsrelevante Eigenschaften:	Geometrische Bedingungen im WG/EG

Relevante Sicherheitsfunktionen:	Rückhaltung Kleine Freisetzungsraten
Relevante Elemente des Barrierensystems:	WG/EG
Sicherheitsrelevante Eigenschaften:	Räumliche Ausdehnung WG (lange Freisetzungspfade).

Relevantes Prinzip:	Zuverlässige Erstellung der geologischen Tiefenlager
Relevante Elemente des Barrierensystems:	WG/EG
Sicherheitsrelevante Eigenschaften:	Flexibilität/Reserven

2. Beschreibung und zugehörige Grundlagen

Bei der Identifikation der potenziell möglichen Wirtgesteine in Schritt 4 wird lediglich das Potenzial für eine ausreichende Mächtigkeit der betrachteten Sedimentgesteine und Kristallingesteine geprüft. Die detaillierten Anforderungen und Bewertungsskalen an die Mächtigkeit in Schritt 5 beziehen sich auf den nutzbaren Teil des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs[87], d.h. auf denjenigen Teil, der die Mindestanforderungen (Schritt 5.1) bzw. verschärften Anforderungen (Schritt 5.2) bzgl. der Tiefenlage[88] erfüllt.

Die Anforderungen und Bewertungsskalen für den Indikator 'Mächtigkeit' sind mit denjenigen für die Indikatoren 'Länge der Freisetzungspfade' und 'Homogenität des Gesteinsaufbaus' gekoppelt. Der erste Indikator betrifft primär die geologischen Verhältnisse, während der zweite und dritte Indikator auch bautechnische Aspekte beinhalten (Durchmesser der Lagerkammern und der angrenzenden Auflockerungszone; vertikale Platzierung der Lagerebene unter Berücksichtigung geologischer Inhomogenitäten).

Die Werte für die verschiedenen geforderten Mächtigkeitsbereiche basieren auf Erfahrungswerten, die in zahlreichen Untersuchungen von Tiefenlagern in unterschiedlichen Wirtgesteinstypen gewonnen wurden, insbesondere in den Projekten Entsorgungsnachweis/Opalinuston (Nagra 2002c), Kristallin-I (Nagra 1994a) und SMA/Wellenberg (Nagra 1994b). Zusätzlich wurden orientierende Sicherheitsbetrachtungen für das SMA- und HAA-Lager durchgeführt, um den Einfluss der Transportpfadlänge auf die Radionuklid-Freisetzungsraten zu illustrieren (vgl. Anhang A5.3 und Erläuterung des Indikators 'Länge der Freisetzungspfade').

---

87 Einschliesslich allenfalls vorhandener wenig mächtiger Inhomogenitäten (Sandsteinlagen, kalkige Lagen).

88 Dabei handelt es sich um Anforderungen und Bewertungsskalen für die Indikatoren 'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit', 'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteins-Dekompaktion', 'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf flächenhafte Erosion' und 'Tiefenlage unter Oberfläche Fels im Hinblick auf glaziale Tiefenerosion'.

3. Erläuterung der Anforderungen und Bewertungsskalen

Der Indikator 'Mächtigkeit' fliesst in die Evaluation der Wirtgesteine in Schritt 4 und in die Evaluation der Konfigurationen in Schritt 5 ein (s. oben). Einerseits wird eine Mindestanforderung bzgl. des Potenzials der betrachteten Wirtgesteine und allenfalls vorhandener Rahmengesteine für eine ausreichende Mächtigkeit festgelegt (Schritt 4.1). Die Mindestanforderung wird in Schritt 5.1 konfigurationsspezifisch überprüft und zusätzlich wird eine verschärfte Anforderung in Schritt 5.2 verwendet. Schliesslich wird für die Bewertung der verbleibenden Varianten in Schritt 5.3 eine Bewertungsskala festgelegt.

- **Mindestanforderung für SMA und HAA** (Schritt 4.1) – Die Mächtigkeit von potenziell möglichen Wirtgesteinen, einschliesslich allenfalls vorhandener Rahmengesteine, muss im Falle von Sedimentgesteinen mindestens 100 m (bzw. eine primäre stratigraphische Mächtigkeit von 50 m, falls es sich um Gesteine mit tektonischem Akkumulationspotenzial mit potenziellen Mächtigkeiten von mindestens 100 m handelt), im Falle von Kristallingesteinen mindestens 200 m betragen. Damit werden in Schritt 4.1 alle Sedimentgesteinsabfolgen ausgeschlossen, die gemäss den stratigraphischen Sammelprofilen die erforderlichen Mächtigkeiten nicht erwarten lassen. Die Erfahrungen aus früheren Sicherheitsanalysen und die Resultate der orientierenden Sicherheitsbetrachtungen für SMA und HAA in Anhang A5.3 zeigen, dass in homogen-porösen oder kleinräumig geklüfteten Gesteinen mit einer Transportpfadlänge[89] von ca. 40 m – bei entsprechend günstigen Transporteigenschaften – ein massgeblicher Beitrag der geologischen Barriere zur Barrierenwirkung des Gesamtsystems erzielt wird. Im Falle von Kristallingesteinen wird mit der Mindestanforderung bzgl. Mächtigkeit eine Transportpfadlänge von ca. 100 m gefordert.
- **Mindestanforderung für SMA und HAA** (Schritt 5.1) – Die nutzbare Mächtigkeit der bevorzugten Wirtgesteine (Sedimentgesteine), einschliesslich der Beiträge von allenfalls vorhandenen Rahmengesteinen, muss mindestens 100 m betragen. Dabei müssen einerseits die Mindestanforderungen an die Tiefenlage[88] erfüllt sein. Andererseits sind wirtgesteinsspezifische Mindestabstände der Lagerebene zur Basis des Wirtgesteins einzuhalten (Opalinuston: $\geq$ 20 m; Effinger Schichten und Mergel-Formationen des Helvetikums: je $\geq$ 50 m). Damit soll sichergestellt werden, dass das Wirtgestein massgeblich zur Barrierenwirkung des Gesamtsystems beiträgt. Im Falle der Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger' ist kein Mindestabstand zu Top und Basis erforderlich, da dank der hervorragenden Barriereneigenschaften des Opalinustons (im Liegenden) eine grosse Flexibilität hinsichtlich der vertikalen Lage der Lagerebene besteht, d.h. der untere Teil des 'Braunen Doggers' steht vollumfänglich für die Platzierung der Lagerkammern zur Verfügung.
- **Verschärfte Anforderung für SMA und HAA** (Schritt 5.2) – Für diejenigen Wirtgesteine, für die eine Mächtigkeit von mehr als 100 m (Mindestanforderung) einen deutlichen Gewinn an Sicherheit bzw. eine deutliche Reduktion der Ungewissheit bzgl. Sicherheit bringt, werden verschärfte Anforderungen an die nutzbare Mächtigkeit verwendet: $\geq$ 100 m für Opalinuston mit Rahmengesteinen, mit Abzug von 30 % auf die Mächtigkeit von Rahmengesteinen, wo diese zum Erreichen der notwendigen Mächtigkeit benötigt werden[90]; $\geq$ 150 m für Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger' mit Rahmengesteinen (davon $\geq$ 75 m innerhalb des 'Brauner Doggers'); $\geq$ 200 m für die Effinger Schichten und für die Mergel-Formationen des Helvetikums. Diese verschärften Anforderungen stützen sich auf Erfahrungen aus früheren Sicherheitsanalysen und auf die Resultate der orientierenden Sicher-

---

[89] Die angegebenen Werte für die Transportpfadlänge basieren auf einer Mächtigkeit von 100 m, unter vereinfachter Berücksichtigung der vertikalen Ausdehnung der SMA/LMA-Lagerkammern (inkl. Auflockerungszone) von 20 m bzw. der vertikalen Ausdehnung der HAA-Lagerstollen (inkl. Auflockerungszone) von 5 m.

[90] Hingegen wird für den Opalinuston keine verschärfte Anforderung verlangt, wo die notwendige Mächtigkeit durch den Opalinuston alleine erreicht wird.

heitsbetrachtungen für das SMA-Lager in Anhang A5.3. Im Falle der Effinger Schichten und der Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger' muss bei der Platzierung der SMA-Lagerkavernen allenfalls vorhandenen, wenig mächtigen Inhomogenitäten (Sandsteinlagen, kalkige Lagen) ausgewichen werden können, womit sich die Länge der Freisetzungspfade reduziert.

Ferner sind in Wirtgesteinen mit höheren Durchlässigkeiten (vgl. Fig. A5.3-6 für ein poröses Gestein; Fig. A5.3-7 und A5.3-8 für ein kleinräumig geklüftetes Gestein; Fig. A5.3-9 und A5.3-10 für ein Gestein mit Störungszonen) im Vergleich mit porösen Wirtgesteinen mit sehr niedrigen Durchlässigkeiten (Fig. A5.3-5) längere Transportpfade notwendig, um den Beitrag der geologischen Barriere zur Barrierenwirkung des Gesamtsystems in signifikantem Masse zu erhöhen. Aus diesen Gründen (und im Sinne eines vorsichtigen Vorgehens) werden für das SMA-Lager im Falle der Effinger Schichten, der Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger' und der Mergel-Formationen des Helvetikums grössere Mächtigkeiten als beim Opalinuston verlangt.

Im Falle des HAA-Lagers wird zusätzlich ein Abstand der Lagerebene zu Top und Basis Opalinuston von je ≥ 40 m verlangt. Damit wird sichergestellt, dass die Lagerkammern innerhalb des Wirtgesteins so ausgelegt werden können, dass lange Transportpfade innerhalb des Opalinustons zur Verfügung stehen. Damit kann erfahrungsgemäss mit dem Wirtgestein eine hervorragende Barrierenwirkung erzielt werden.

- **Bewertungsskala für SMA und HAA** (Schritt 5.3) – Im Falle des Opalinustons wird die Wertung *sehr günstig* sowohl für SMA als auch für HAA dann erreicht, wenn die nutzbare Mächtigkeit des Opalinuston ≥ 100 m und diejenige der oberen und unteren Rahmengesteine je ≥ 25 m beträgt, wobei als untere Rahmengesteine nur die Zone bis Top Arietenkalk betrachtet wird. Im Falle der Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger' wird die Wertung *sehr günstig* dann erreicht, wenn die nutzbare Mächtigkeit des 'Braunen Doggers' einschliesslich der oberen und unteren Rahmengesteinen ≥ 200 m beträgt und die nutzbare Mächtigkeit des 'Braunen Doggers' einschliesslich der oberen Rahmengesteinen ≥ 100 m beträgt. Damit wird wiederum dem Umstand Rechnung betragen, dass der untere Teil des 'Braunen Doggers' vollumfänglich für die Platzierung der Lagerkammern zur Verfügung steht. Im Falle der Effinger Schichten und Mergel-Formationen des Helvetikums (bei beiden sind keine nennenswerten Rahmengesteine vorhanden) wird eine nutzbare Mächtigkeit ≥ 250 m als *sehr günstig* eingestuft. Alle anderen Varianten gelten als *günstig*, da sie die verschärften Anforderungen bzgl. nutzbarer Mächtigkeit erfüllen. Die Bewertungsstufen *ungünstig* und *bedingt günstig* sind deshalb nicht erforderlich.

A1.6 Abstand zu regionalen Störungszonen

Festlegung der Anforderungen und Bewertungsskalen

Schritt/ Kriterium	Attribut	Anforderungen und Bewertungsskalen	
		SMA	**HAA**
5.1/1.1	Mindestanforderung (MA)	Abstand geht von einem Richtwert von 200 m aus und wird vergrössert, wo dies durch vorhandene geologische Daten (z.B. kartierte Sekundärbrüche, verdickte oder gestörte Bereiche in seismischen Profilen, erhöhte Neigung auf Isohypsenkarten) angezeigt ist	

Hintergrundinformationen

1. Relevanz für Langzeitsicherheit bzw. bautechnische Machbarkeit

Regionale Störungszonen sind Störungen mit einer Längserstreckung im Kilometerbereich (vgl. Fig. 4.1-1 in Nagra 2008b). Zu diesen Strukturen wird ein Sicherheitsabstand eingehalten, um die Ausdehnung der Zone mit gestörtem Gesteinsverband und die Ungewissheiten im genauen Verlauf der Störungen sowie den Einflussbereich potenziell möglicher differenzieller Bewegungen zu berücksichtigen. Damit werden mögliche Auswirkungen differenzieller Bewegungen und ungünstiger geomechanischer Verhältnisse sowie ungünstige Bedingungen für den Radionuklidtransport vermieden bzw. minimiert.

Relevante Sicherheitsfunktionen:	Isolation Gewährleistung der Langzeitstabilität
Relevante Elemente des Barrierensystems:	Geologische Situation
Sicherheitsrelevante Eigenschaften:	Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften (im Hinblick auf seltene geologische Ereignisse und differenzielle Bewegungen)

Relevante Sicherheitsfunktion:	Einschluss
Relevante Elemente des Barrierensystems:	Endlagerbehälter Weitere technische Barrieren
Sicherheitsrelevante Eigenschaften:	Geomechanische Bedingungen

Relevante Sicherheitsfunktionen:	Rückhaltung Kleine Freisetzungsraten
Relevante Elemente des Barrierensystems:	WG/EG
Sicherheitsrelevante Eigenschaften:	Räumliche Ausdehnung WG/EG (lange Freisetzungspfade durch Sicherheitsabstand zu Störungszonen).

Relevantes Prinzip:	Zuverlässige Erstellung der geologischen Tiefenlager
Relevante Elemente des Barrierensystems:	WG/EG
Sicherheitsrelevante Eigenschaften:	Flexibilität/Reserven (räumliche Ausdehnung)

2. Beschreibung und zugehörige Grundlagen

Als regionale Störungszonen werden Störungen mit einer Längserstreckung im Kilometerbereich betrachtet, die aus Oberflächenkartierungen und/oder Seismikinterpretationen bekannt sind. Zu diesen als Linien kartierten Störungen wird ein Sicherheitsabstand eingehalten, um die Ausdehnung der Zone mit gestörtem Gesteinsverband und die Ungewissheiten im genauen Verlauf der Störungen sowie den Einflussbereich potenziell möglicher differenzieller Bewegungen zu berücksichtigen. Der Abstand geht von einem Richtwert von 200 m aus und wird vergrössert, wo dies durch vorhandene geologische Daten (z.B. kartierte Sekundärbrüche, verdickte oder gestörte Bereiche in seismischen Profilen, erhöhte Neigung auf Isohypsenkarten) angezeigt ist, vgl. dazu auch die Diskussion in Nagra (2008c). Fig. 5.1-1 in Nagra (2008b) enthält eine Karte mit den regionalen Störungszonen (inkl. Sicherheitsabstände) im betrachteten, flächenhaf-

ten Verbreitungsraum des Opalinustons, der Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger' und der Effinger Schichten. Der vorliegende Indikator ist nicht auf Gesteins-Akkumulationen anwendbar; die bekannten grösseren lokalen Vorkommen der Mergel-Formationen des Helvetikums für das SMA-Lager werden individuell beurteilt.

3. Erläuterung der Anforderungen und Bewertungsskalen

Der Indikator 'Abstand zu regionalen Störungszonen' fliesst bei der Identifikation der potenziell möglichen Bereiche in Schritt 5.1 ein (s. oben); regionale Störungszonen wirken als lateral bereichsbegrenzende Strukturen. Für diesen Indikator werden weder verschärfte Anforderungen noch Bewertungsskalen festgelegt.

- **Mindestanforderung für SMA und HAA** (Schritt 5.1) – Dem Einflussbereich von regionalen Störungszonen wird bei der Ausscheidung von potenziell möglichen Bereichen für das SMA- und HAA-Lager ausgewichen. Der dabei einzuhaltende Abstand geht von einem Richtwert von 200 m aus und wird vergrössert, wo dies durch vorhandene geologische Daten angezeigt ist (z.B. kartierte Sekundärbrüche, verdickte oder gestörte Bereiche in seismischen Profilen, erhöhte Neigung auf Isohypsenkarten).

A1.7 Laterale Ausdehnung

Festlegung der Anforderungen und Bewertungsskalen

Schritt/ Kriterium	Attribut	Anforderungen und Bewertungsskalen	
		SMA	**HAA**
3.1/1.1	Mindest-anforderung (MA, Potenzial)	Räumliches Potenzial vorhanden für wenig zergliederte Bereiche, in denen die Lagerkammern angeordnet werden können (≥ 2 km^2 bei einer nutzbaren Breite von ≥ 1 km)	Räumliches Potenzial vorhanden für wenig zergliederte Bereiche, in denen die Lagerkammern angeordnet werden können (≥ 4 km^2 bei einer nutzbaren Breite von ≥ 1.5 km)
3.3/1.1		Räumliches Potenzial vorhanden für wenig zergliederte Bereiche, in denen die Lagerkammern angeordnet werden können:	Wie SMA, aber grössere unzergliederte Bereiche notwendig
	Sehr günstig	Mehrere, teilweise auch grössere Bereiche wahrscheinlich	
	Günstig	Einige Bereiche wahrscheinlich,	
	Ungünstig bis bedingt günstig (graduelle Abstufung)	Wenige Bereiche wahrscheinlich	
4.1/1.1	Mindest-anforderung (MA, Potenzial)	≥ 2 km^2 bei einer nutzbaren Breite von ≥ 1 km	≥ 4 km^2 bei einer nutzbaren Breite von ≥ 1.5 km
5.1 & 5.2/1.1	Mindest-anforderung (MA)	≥ 3 km^2 bei einer nutzbaren Breite von ≥ 1 km (Form der Bereiche wird so festgelegt, dass die Bedingung der nutzbaren Breite innerhalb des Bereichs überall erfüllt ist)	≥ 6 km^2 bei einer nutzbaren Breite von ≥ 1.5 km (Form der Bereiche wird so festgelegt, dass die Bedingung der nutzbaren Breite innerhalb des Bereichs überall erfüllt ist)

Hintergrundinformationen

1. Relevanz für Langzeitsicherheit bzw. bautechnische Machbarkeit

Die laterale Ausdehnung des Wirtgesteins bestimmt im Zusammenspiel mit weiteren Faktoren (z.B. Lagergeometrie, Mächtigkeit, Orientierung des hydraulischen Gradienten etc.) einerseits die Möglichkeiten zur Anordnung der untertägigen Lagerbauten, unter Berücksichtigung der minimal erforderlichen Länge der Freisetzungspfade für Radionuklide innerhalb des Wirtgesteins, und andererseits die vorhandene Flexibilität in Bezug auf noch nicht erkennbare geologische Strukturen/Elemente, denen ausgewichen werden muss, sowie die Platzreserven für Lagererweiterungen.

Relevante Sicherheitsfunktion:	Einschluss
Relevante Elemente des Barrierensystems:	Endlagerbehälter Weitere technische Barrieren
Sicherheitsrelevante Eigenschaften:	Geometrische Bedingungen im WG/EG

Relevante Sicherheitsfunktionen:	Rückhaltung Kleine Freisetzungsraten
Relevante Elemente des Barrierensystems:	WG/EG
Sicherheitsrelevante Eigenschaften:	Räumliche Ausdehnung WG (lange Freisetzungspfade)

Relevantes Prinzip:	Zuverlässige Erstellung der geologischen Tiefenlager
Relevante Elemente des Barrierensystems:	WG/EG
Sicherheitsrelevante Eigenschaften:	Flexibilität/Reserven

2. Beschreibung und zugehörige Grundlagen

Die Beurteilung der lateralen Ausdehnung von wenig zergliederten Bereichen (einschliesslich tektonischer Akkumulationen) ist primär abhängig vom Abfallinventar, von den felsmechanischen Bedingungen (Grösse der Lagerkammern), von der minimal erforderlichen horizontalen Länge der Freisetzungspfade, von der Komplexität der lokalen geologischen Verhältnisse (Flexibilität, Reserven) sowie von der Lagerauslegung bzw. der zugelassenen Lagerarchitektur (Anordnung der Lagerkammern, untertägige Erschliessung etc.). Eine detaillierte Beschreibung dieser Einflussfaktoren und der entsprechenden Grundlagen erfolgt in Anhang 2.

Für die Beurteilung der lateralen Ausdehnung werden die Abfallmengen des umhüllenden Abfallinventars zugrunde gelegt, d.h. für das SMA-Lager wird von einer erforderlichen Lagerkapazität von 200'000 m^3 für in Endlagerbehälter verpackte Abfälle ausgegangen, für das HAA-Lager von 20'000 m^3 BE/HAA und 7'500 m^3 LMA (vgl. Kap. 2.5, Kap. 3). Wie in Anhang 2 detailliert ausgeführt, resultiert aus diesen Abfallmengen ein minimaler Platzbedarf für das SMA-Lager von ≥ 2 km^2, bei einer nutzbaren Breite von ≥ 1 km, und für das HAA-Lager ein minimaler Platzbedarf von ≥ 4 km^2, bei einer nutzbaren Breite von ≥ 1.5 km. Diese Zielwerte für den Platzbedarf beinhalten nur vergleichsweise geringe Reserven für geologische Ungewissheiten. Um grösseren geologischen Ungewissheiten (bzgl. des Verlaufs bereichsbegrenzender geologischer Elemente und auslegungsbestimmender Störungszonen) Rechnung zu tragen, werden die Zielwerte in einem zweiten Beurteilungsschritt erhöht: Für das SMA-Lager auf ≥ 3 km^2, bei einer nutzbaren Breite von ≥ 1 km, und für das HAA-Lager auf ≥ 6 km^2, bei einer nutzbaren Breite von ≥ 1.5 km.

Diese erste, vereinfachte Prüfung der räumlichen Verhältnisse anhand des vorliegenden Indikators 'Laterale Ausdehnung' wird durch eine zweite, detaillierte Überprüfung des Platzangebots anhand des Indikators 'Platzangebot untertags' ergänzt, unter Berücksichtigung der effektiven geometrischen Verhältnisse und weiterer Ungewissheiten bzgl. der Konfiguration des Wirtgesteinskörpers (Tiefenlage, Schichtneigung Mächtigkeit, Welligkeit).

3. Erläuterung der Anforderungen und Bewertungsskalen

Der Indikator 'Laterale Ausdehnung' fliesst in die Evaluation der Grossräume in Schritt 3, der Wirtgesteine bzw. einschlusswirksamen Gebirgsbereiche in Schritt 4 und der Konfigurationen in Schritt 5 ein. Für den Indikator werden Mindestanforderungen (Schritte 3.1, 4.1, 5.1) und Bewertungsskalen (Schritt 3.3) festgelegt (s. oben). Verschärfte Anforderungen werden im Rahmen des Indikators 'Platzangebot untertags' festgelegt.

- **Mindestanforderung für SMA und HAA** (Schritt 3.1) – Grossräume ohne räumliches Potenzial für wenig zergliederte Bereiche, in denen die Lagerkammern angeordnet werden können, werden von der weiteren Evaluation ausgeschlossen. Der Zielwert für die Fläche wenig zergliederte Bereiche für SMA beträgt ≥ 2 km^2, bei einer nutzbaren Breite von ≥ 1 km; für HAA wird als Zielwert eine Fläche von ≥ 4 km^2, bei einer nutzbaren Breite von ≥ 1.5 km, festgelegt. Dabei handelt es sich um Zielwerte, die nur vergleichsweise kleine Reserven für geologische Ungewissheiten beinhalten; damit soll ein möglichst breites Spektrum an Grossräumen für die weitere Evaluation erhalten bleiben.

- **Bewertungsskala für SMA und HAA** (Schritt 3.3) – Bewertet wird das räumliche Potenzial für wenig zergliederte Bereiche, in denen die Lagerkammern angeordnet werden können. Die Bewertungsskala sieht wie folgt aus: *Sehr günstig*, wenn wahrscheinlich mehrere, teilweise auch grössere wenig zergliederte Bereiche existieren; *günstig*, wenn wahrscheinlich einige solche Bereiche existieren; *ungünstig* bis *bedingt günstig* (mit gradueller Abstufung), wenn wahrscheinlich wenige solche Bereiche existieren. Die Skala ist für SMA und HAA gleich, ausser dass für HAA grössere unzergliederte Bereiche notwendig sind (vgl. oben). Eine detaillierte Bewertung der Platzverhältnisse – unter Berücksichtigung geologischer Ungewissheiten – erfolgt anhand des Indikators 'Platzangebot untertags' in Schritt 5.3.

- **Mindestanforderung für SMA und HAA** (Schritt 4.1) – Analog zu Schritt 3.1 werden in Schritt 4.1 Wirtgesteine ohne räumliches Potenzial für wenig zergliederte Bereiche, in denen die Lagerkammern angeordnet werden können, von der weiteren Evaluation ausgeschlossen. Die Zielwerte für die Fläche von wenig zergliederten Bereichen sind dieselben wie in Schritt 3.1, wobei wiederum für HAA grössere unzergliederte Bereiche notwendig sind als für SMA. Dabei handelt es sich um Zielwerte, die nur vergleichsweise kleine Reserven für geologische Ungewissheiten beinhalten; damit soll ein möglichst breites Spektrum an Wirtgesteinen für die weitere Evaluation erhalten bleiben.

- **Mindestanforderung für SMA und HAA** (Schritt 5.1) – Im Falle von SMA wird eine Mindestfläche der potenziell möglichen Bereiche von ≥ 3 km^2 bei einer nutzbaren Breite von ≥ 1 km festgelegt; für HAA wird eine Mindestfläche von ≥ 6 km^2 bei einer nutzbaren Breite von ≥ 1.5 km verlangt. Dabei handelt es sich um vorsichtige Zielwerte, die etwas grössere Reserven für geologische Ungewissheiten (bzgl. des Verlaufs bereichsbegrenzender geologischer Elemente und auslegungsbestimmender Störungszonen) beinhalten. Bei der Abgrenzung der potenziell möglichen Bereiche wird deren Form so festgelegt, dass die Bedingung der nutzbaren Breite innerhalb des Bereichs überall erfüllt ist. Dies hat zur Folge, dass bei der vereinfachten Prüfung Ausbuchtungen mit komplexer Geometrie weggeschnitten sowie Bereichsecken abgerundet werden; bei der effektiven Anordnung der Lagerkammern können diese Flächen bei Bedarf wieder genutzt werden.

A1.8 Platzangebot untertags

Festlegung der Anforderungen und Bewertungsskalen

Schritt/ Kriterium	Attribut	Anforderungen und Bewertungsskalen	
		SMA	**HAA**
5.2/ Kriterium 1.1	Verschärfte Anforderung (VA)	Platzangebot [1)] ausreichend für umhüllendes Abfallinventar (Volumina der in Lagerbehälter verpackten Abfälle: SMA: 200'000 m^3, BE/HAA: 20'000 m^3, LMA: 7'500 m^3) unter Berücksichtigung geologischer Ungewissheiten (maximale und minimale Tiefenlage; Lage der bereichsbegrenzenden geologischen Elemente; mögliche kleinräumige Elemente; Architekturelemente und Fremdgesteinseinschlüsse; Mächtigkeit, Schichtneigung und Welligkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs) und bei günstiger Lageranordnung	
5.3/1.1	Sehr günstig	Potenzielles Platzangebot ausreichend für ≥ 4-faches umhüllendes Abfallinventar und Platzangebot ausreichend für ≥ 2-faches umhüllendes Abfallinventar unter Berücksichtigung geologischer Ungewissheiten und bei günstiger Lageranordnung	
	Günstig	Potenzielles Platzangebot ausreichend für ≥ 2-faches umhüllendes Abfallinventar und Platzangebot ausreichend für umhüllendes Abfallinventar unter Berücksichtigung geologischer Ungewissheiten und bei günstiger Lageranordnung	
	Ungünstig bis bedingt günstig	– [1)]	

[1)] Streng genommen muss als Teil der verschärften Anforderung auch das potenzielle Platzangebot (ohne Berücksichtigung geologischer Ungewissheiten) ausreichend für ≥ 2-faches umhüllendes Abfallinventar sein, damit die Bewertungsstufe *günstig* erreicht wird. In diesem Fall sind die Bewertungsstufen *ungünstig* und *bedingt günstig* nicht erforderlich.

Hintergrundinformationen

1. Relevanz für Langzeitsicherheit bzw. bautechnische Machbarkeit

Das Platzangebot untertags bestimmt mit weiteren Faktoren (z.B. Lagergeometrie, Mächtigkeit, Orientierung des hydraulischen Gradienten etc.) die Möglichkeiten zur Anordnung der untertägigen Lagerbauten, unter Berücksichtigung der minimal erforderlichen Länge der Freisetzungspfade für Radionuklide innerhalb des Wirtgesteins. Zusammen mit den Rückhalte- und Transporteigenschaften der technischen und geologischen Barrieren hat die Länge der Freisetzungspfade einen massgeblichen Einfluss auf die Radionuklid-Freisetzungsraten aus der Geosphäre.

Das Platzangebot untertags ist ferner von grosser Relevanz für die bautechnische Machbarkeit, indem es die vorhandene Flexibilität in Bezug auf noch nicht erkennbare geologische Strukturen/Elemente, denen ausgewichen werden muss, sowie die Platzreserven für Lagererweiterungen bestimmt.

Relevante Sicherheitsfunktion:	Einschluss
Relevante Elemente des Barrierensystems:	Endlagerbehälter Weitere technische Barrieren
Sicherheitsrelevante Eigenschaften:	Geometrische Bedingungen im WG/EG

Relevante Sicherheitsfunktionen:	Rückhaltung Kleine Freisetzungsraten
Relevante Elemente des Barrierensystems:	WG/EG
Sicherheitsrelevante Eigenschaften:	Räumliche Ausdehnung WG (lange Freisetzungspfade)

Relevantes Prinzip:	Zuverlässige Erstellung der geologischen Tiefenlager
Relevante Elemente des Barrierensystems:	WG/EG
Sicherheitsrelevante Eigenschaften:	Flexibilität/Reserven

2. Beschreibung und zugehörige Grundlagen

Die Bewertung des Platzangebots in subhorizontal gelagerten Wirtgesteinsformationen (Bereiche ausserhalb von bereichsbegrenzenden geologischen Elementen), resp. von tektonischen Akkumulationen, ist primär abhängig vom Abfallinventar, von den felsmechanischen Bedingungen (Grösse der Lagerkammern, Orientierung der Hauptspannungen, Tiefenlage), von der räumlichen Wirtgesteinstopographie (Mächtigkeit, vgl. auch Indikator 'Mächtigkeit'; Schichtneigung, Welligkeit), von den Barriereneigenschaften des Wirtgesteins (inkl. Transportpfadlänge, vgl. auch Indikator 'Länge der Freisetzungspfade'), von der Komplexität der lokalen geologischen Verhältnisse (Flexibilität bei unvorhergesehenen geologischen Komplikationen, Reserven) sowie von der Lagerauslegung bzw. der zugelassenen Lagerkonfiguration (Anordnung der Lagerkammern, untertägige Erschliessung etc.).

Eine Grobbewertung der räumlichen Verhältnisse erfolgt anhand einer vereinfachten Prüfung der vorhandenen Bereichsfläche mit dem Indikator 'Laterale Ausdehnung'.

Eine weitere, detaillierte Bewertung der räumlichen Verhältnisse im geologischen Untergrund eines bevorzugten Bereichs wird durch den Vergleich zwischen dem Platzangebot (räumliche Ausdehnung und Form geeigneter WE/EG-Formationen unter Berücksichtigung der Ungewissheiten bzgl. der geologischen Verhältnisse) und dem Platzbedarf bewertet. Diese zweite, verfeinerte Bewertung erfolgt mit dem vorliegenden Indikator 'Platzangebot untertags'.

In einem ersten Teilschritt wird das potenzielle Platzangebot innerhalb eines Bereichs ermittelt. Das potenzielle Platzangebot entspricht der Abfallmenge, welche unter Ausnützung des gesamten Bereichs eingelagert werden könnte. Dazu werden für jeden Lagertyp Grundmodule (entspricht einem Lagerfeld mit einheitlicher Anzahl Lagerkammern und Grundfläche, vgl. Anhang 2) basierend auf den zugrunde gelegten Lagerkonfigurationen abgeleitet und diese unter Berücksichtigung von sicherheitstechnischen und bautechnischen Anforderungen im gesamten Bereich platziert. Aus der Summe aller platzieren Grundmodule und unter Berücksichtigung der Grösse der Lagerkammern kann die gesamte Abfallmenge abgeleitet werden. Als Grundmodul für HAA wird ein Lagerfeld mit 10 BE/HAA-Lagerstollen (Einlagerungslänge 700 m) mit einer Grundfläche von ca. 0.4 km^2 bezeichnet, welches Platz für eine Abfallmenge von ca. 18 % des umhüllenden Abfallinventars aufweist. Als Grundmodul für SMA wird ein Lagerfeld für

9 SMA-Lagerkavernen (Einlagerungslänge 200 m) mit einer Grundfläche von ca. 0.4 km^2 bezeichnet. Das Platzangebot (Abfallvolumen konditioniert und in Endlagerbehälter verpackt) hängt von der Grösse des gewählten Kavernentyps ab und variiert zwischen ca. 20 % für den Kavernentyp K04 bis 100 % für den Kavernentyp K20 des umhüllenden Abfallinventars (vgl. Anhang 2).

In einem zweiten Schritt wird das 'robuste Platzangebot'[91] unter Berücksichtigung der Auswirkungen von Ungewissheiten in den zur Abgrenzung der Bereiche verwendeten geologischen Daten ermittelt. Es werden Ungewissheiten bzgl. der folgenden geologischen Merkmale berücksichtigt: Tiefenlage, Verlauf von bereichsbegrenzenden geologischen Elementen, auslegungsbestimmende geologische Elemente (auslegungsbestimmende Störungszonen, Architekturelemente, Fremdgesteinseinschlüsse, u.a.), tatsächliche räumliche Wirtgesteinstopographie (Mächtigkeit, Schichtneigung, Welligkeit). Die Bewertung erfolgt hauptsächlich mittels Expertenbeurteilung, d.h. die geologischen Ungewissheiten werden von Geologie-Experten aufgezeigt, die damit verbundenen Auswirkungen auf die räumlichen Platzverhältnisse werden mittels GIS visualisiert und schliesslich durch Experten integral bewertet. Das Resultat dieser Bewertung ist ein robuster Teilbereich des potenziell möglichen Bereichs, in welchem die Grundmodule platziert werden können. Dabei werden diese nur dort angeordnet, wo günstige Lagerkonfigurationen – d.h. solche, die aus bautechnischer und betrieblicher Sicht optimal ausgelegt werden können – möglich sind. Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn die SMA-Lagerkavernen bzw. der Betriebstunnel zu den BE/HAA-Lagerstollen innerhalb des Grundmoduls in einer horizontalen Ebene liegen und die Lagerkammern ungefähr in Richtung der erwarteten horizontalen Hauptspannungen[92] ausgerichtet werden können.

3. Erläuterung der Anforderungen und Bewertungsskalen

Der Indikator 'Platzangebot untertags' fliesst in die Evaluation der Konfigurationen in Schritt 5 ein. Für den Indikator werden verschärfte Anforderungen in Schritt 5.2 und Bewertungsskalen in Schritt 5.3 festgelegt (s. oben). Mindestanforderungen bzgl. des Platzangebots werden im Rahmen des Indikators 'Laterale Ausdehnung' festgelegt.

- **Verschärfte Anforderungen für SMA und HAA** (Schritt 5.2) – Bei der Auswahl bevorzugter Bereiche werden diejenigen Bereiche ausgeschlossen, welche unter Berücksichtigung geologischer Ungewissheiten und bei günstiger Lageranordnung kein ausreichendes Platzangebot für das umhüllende Abfallinventar gewährleisten können. Dabei werden Ungewissheiten bzgl. der folgenden geologischen Merkmale berücksichtigt: Maximale und minimale Tiefenlage; Lage der bereichsbegrenzenden geologischen Elemente; mögliche kleinräumige Elemente; Architekturelemente und Fremdgesteinseinschlüsse; Mächtigkeit, Schichtneigung und Welligkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs. Damit soll möglichst ausgeschlossen werden, dass erst im Zuge der detaillierten Exploration festgestellt wird, dass der Bereich keine ausreichende räumliche Ausdehnung besitzt oder nur mit ungünstigen Lageranordnungen nutzbar gemacht werden kann.

---

[91] Das 'robuste Platzangebot' entspricht den potenziellen Platzreserven innerhalb des Bereichs, welche mit einer hohen Wahrscheinlichkeit realisiert werden können.

[92] Die maximalen horizontalen *in-situ* Hauptspannungen werden ungefähr normal zum Streichen der Alpen und des Juragebirges in Richtung Nord-Nordwest angenommen.

- **Bewertungsskalen für SMA und HAA** (Schritt 5.3) – Mit *sehr günstig* werden bevorzugte Bereiche bewertet, deren potenzielles Platzangebot[93] mindestens ausreichend für das 4-fache umhüllende Abfallinventar und deren Platzangebot[94] mindestens ausreichend für das 2-fache umhüllende Abfallinventar ist. Solche Bereiche bieten eine grosse Flexibilität bei der Platzierung der Lagerkammern. Bevorzugte Bereiche, deren potenzielles Platzangebot zwar ausreichend für das 2-fache umhüllende Abfallinventar ist, deren Platzangebot aber nur gerade ausreichend für das umhüllende Abfallinventar ist, werden mit *günstig* bewertet. Die Bewertungsstufen *ungünstig* und *bedingt günstig* entfallen, da alle bewerteten Bereiche die verschärfte Anforderung bzgl. Platzangebot erfüllen und somit als mindestens *günstig* eingestuft werden.

[93] D.h. ohne Berücksichtigung geologischer Ungewissheiten, aber bei günstiger Lageranordnung.

[94] D.h. unter Berücksichtigung geologischer Ungewissheiten und bei günstiger Lageranordnung.

A1.9 Hydraulische Durchlässigkeit

Festlegung der Anforderungen und Bewertungsskalen

Schritt/ Kriterium	Attribut	Anforderungen und Bewertungsskalen [1)]	
		SMA	**HAA**
4.1/1.2	Mindest-anforderung (MA)	$K_v \leq 10^{-9}$ m/s (AZ: Alternative Abfallzuteilung); $K_v \leq 10^{-10}$ m/s (RZ: Referenz-Abfallzuteilung)	$K_v \leq 10^{-10}$ m/s
		Wenn keine Erfahrungswerte für die hydraulische Durchlässigkeit vorliegen: mittlerer Tongehalt ≥ 25% (bei Sedimentgesteinen, ausser Evaporiten) oder geologische Beschreibung der Gesteinseinheiten und generelle Erfahrungen	
4.2/1.2	Verschärfte Anforderung (VA)	$K_h \leq 10^{-9}$ m/s (AZ) $K_h \leq 10^{-10}$ m/s (RZ)	$K_h \leq 10^{-10}$ m/s
4.3/1.2		Bei der Bewertung, Berücksichtigung der Ungewissheiten und der tektonischen Überprägung:	
	Sehr günstig	$K_v \leq 10^{-11}$ m/s (RZ)	$K_v \leq 10^{-12}$ m/s
	Günstig	$10^{-11} < K_v \leq 10^{-10}$ m/s (RZ)	$10^{-12} < K_v \leq 10^{-11}$ m/s
	Ungünstig bis bedingt günstig (graduelle Abstufung)	–	$10^{-11} < K_v \leq 10^{-10}$ m/s
5.3/1.2	Sehr günstig	Bewertungsstufen wie in Schritt 4.3/Kriterium 1.2, zusätzlich unter Berücksichtigung der tektonischen Überprägung	
	Günstig		
	Ungünstig bis bedingt günstig (graduelle Abstufung)		

[1)] Bei hydraulischen Gradienten von ca. 0.1 m/m, sonst entsprechend angepasst.

Legende: K_v/K_h – Hydraulische Durchlässigkeit in vertikaler/horizontaler Richtung. RZ – Referenzzuteilung für SMA, basierend auf realistischen Annahmen betreffend erwarteter hydraulischer Durchlässigkeit des Wirtgesteins; AZ – alternative Zuteilung für SMA, basierend auf eher ungünstigen Annahmen betreffend erwarteter hydraulischer Durchlässigkeit des Wirtgesteins (vgl. Kap. 3.3).

Hintergrundinformationen

1. Relevanz für Langzeitsicherheit bzw. bautechnische Machbarkeit

Der Indikator 'Hydraulische Durchlässigkeit' bestimmt – zusammen mit dem hydraulischen Gradienten – den Wasserfluss im Nahfeld und in der Geosphäre. Die hydraulische Durchlässigkeit hat dadurch einen massgeblichen Einfluss auf die zeitliche Entwicklung der technischen Barrieren, auf die Radionuklidrückhaltung in den verschiedenen Barrieren und auf die Radionuklidfreisetzung aus dem geologischen Tiefenlager.

Relevante Sicherheitsfunktionen:	Verzögerte Freisetzung Rückhaltung Kleine Freisetzungsraten
Relevante Elemente des Barrierensystems:	Abfallmatrix Verfüllung & Versiegelung WG/EG
Sicherheitsrelevante Eigenschaften:	Stabilität der Abfallmatrix sowie der Verfüll- und Versiegelungsmaterialien dank geringem Wasserfluss Rückhaltung und kleine Freisetzungsraten dank geringem Wasserfluss und günstigen Transporteigenschaften

2. Beschreibung und zugehörige Grundlagen

Die Wasserführung im Wirtgestein wird anhand von Erfahrungswerten für die grossräumige hydraulische Durchlässigkeit und Transmissivität (vgl. Indikator 'Transmissivität präferenzieller Freisetzungspfade') des Wirtgesteins beurteilt. Liegen keine Erfahrungswerte für die Durchlässigkeit vor, so wird der mittlere Tongehalt (vgl. Indikator 'Tongehalt'), die geologische Beschreibung der Gesteinseinheiten (Homogenität bzw. Heterogenität) und generelle Erfahrungen (z.B. über das erwartete Selbstabdichtungsvermögen) für die Beurteilung herangezogen.

Die grossräumige hydraulische Durchlässigkeit bezieht sich auf den in der Matrixporosität und in der kleinräumigen Klüftung stattfindenden Wasserfluss (Kluftabstände im Dezi- bis Dekameterbereich) und berücksichtigt allfällige sedimentäre Heterogenitäten. Störungszonen mit Abständen von einigen Deka- bis einigen Hektometern, denen mit den Lagerkammern nicht ausgewichen werden kann und die somit den Wasserfluss durch die Lagerkammern und den Radionuklidtransport in den technischen und geologischen Barrieren mitbestimmen, werden separat durch den Indikator 'Transmissivität präferenzieller Freisetzungspfade' erfasst. Auslegungsbestimmenden Störungszonen wird bei der Platzierung der Lagerkammern ausgewichen (vgl. Indikator 'Platzangebot untertags'), während regionale Störungszonen bei der Bereichsbegrenzung gemieden werden (vgl. Indikator 'Abstand zu regionalen Störungszonen'). Die regionalen hydrogeologischen Verhältnisse werden im Rahmen der geologischen Konfiguration berücksichtigt (s. Indikatoren 'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteins-Dekompaktion' und 'Grundwasserstockwerke').

Die Werte für die Mindest- und verschärften Anforderungen basieren auf Erfahrungen (vgl. Kap. 2.4 mit einer Diskussion der Projekte Wellenberg (Nagra 1994b), Entsorgungsnachweis (Nagra 2002c-d) und Kristallin-I (Nagra 1994a) sowie auf orientierenden Sicherheitsbetrachtungen mit generischen Annahmen zu den Tiefenlagern SMA und HAA (vgl. Fig. 3.3-1 bis 3.3-4

und Fig. A5.2-1 in Anhang 5). Die abgeleiteten Mindestanforderungen für die hydraulische Durchlässigkeit in vertikaler Richtung (erwartete Richtung der präferenziellen Freisetzungspfade) gelten für einen durchschnittlichen hydraulischen Gradienten von 0.1 m/m. Für höhere hydraulische Gradienten gelten geringere Durchlässigkeiten, für kleinere Gradienten entsprechend höhere Durchlässigkeiten. Es werden Anforderungen für zwei mögliche Varianten der Abfallzuteilung betrachtet: In einer ersten Variante (Referenzzuteilung) wird für das SMA-Lager auf Standortbedingungen abgestützt, die im erwarteten Bereich liegen, d.h. die insbesondere durch eine grossräumige Durchlässigkeit des Wirtgesteins von 10^{-10} m/s charakterisiert werden. In einer zweiten Variante (alternative Zuteilung) wird auf Standortbedingungen abgestützt, die auf eher ungünstigen Annahmen beruhen, d.h. die durch eine grossräumige Durchlässigkeit des Wirtgesteins von 10^{-9} m/s charakterisiert werden (s. Kap. 3.3).

Weil für die Beurteilung der Durchlässigkeit für sehr viele Gesteine keine Erfahrungswerte mit der nötigen Qualität vorliegen, wird für die Beurteilung der hydraulischen Durchlässigkeit der tonhaltigen Sedimentgesteine dort vereinfachend auf den Tongehalt zurückgegriffen: Die Erfahrung zeigt, dass bei einem über die Sedimentgesteinsabfolge gemittelten Tongehalt von > 25 % in der Regel ein genügendes Quell- bzw. Kriechvermögen besteht, um bei einer genügenden Überlagerung (Kompaktion) die erforderliche Selbstabdichtung zu gewährleisten (Nagra 2008c). Falls keine Informationen bezüglich des Tongehalts vorliegen, wird auf die Gesteinsbeschreibung abgestützt. Wo unabhängige Evidenzen für die Dichtheit des Wirtgesteins vorliegen (z.B. Verweilzeiten, Isotopensignaturen) werden diese bei der Beurteilung der Durchlässigkeit mitberücksichtigt (vgl. Indikator 'Unabhängige Evidenzen der Langzeitisolation').

3. Erläuterung der Anforderungen und Bewertungsskalen

Für den Indikator 'Hydraulische Durchlässigkeit' werden Mindestanforderungen und verschärfte Anforderungen für den Schritt 4 und Bewertungsskalen für die Schritte 4 und 5 festgelegt (s. oben). Diese Anforderungen und Bewertungsskalen stützen sich auf Erfahrungen sowie auf orientierende Sicherheitsbetrachtungen (vgl. Fig. 3.3-1 bis 3.3-4 und Fig. A5.2-1 in Anhang 5).

- **Mindestanforderung für SMA** (Schritt 4.1) – Die Referenz-Abfallzuteilung basiert auf einer Mindestanforderung an die hydraulische Durchlässigkeit in vertikaler Richtung von 10^{-10} m/s (Kap. 3.3). Mit dieser Durchlässigkeit resultiert für ein homogen-poröses Wirtgestein ein Dosismaximum, das um ca. eine Grössenordnung unterhalb des Schutzziels von 0.1 mSv/a liegt (vgl. Fig. A5.2-1 in Anhang 5, Inventar SMA RZ). Zusätzlich wird eine alternative Abfallzuteilungsvariante für SMA untersucht, die auf einer vertikalen hydraulischen Durchlässigkeit des Wirtgesteins von 10^{-9} m/s basiert. Auch für diese Durchlässigkeit resultiert für ein homogen-poröses Wirtgestein ein Dosismaximum, das um ca. eine Grössenordnung unterhalb des Schutzziels von 0.1 mSv/a liegt (vgl. Fig. A5.2-1 in Anhang 5, Inventar SMA AZ).
- **Mindestanforderung für HAA** (Schritt 4.1) – Für die Durchlässigkeit wird eine Mindestanforderung von 10^{-10} m/s festgelegt. Mit dieser Durchlässigkeit resultieren für ein homogen-poröses Wirtgestein Dosismaxima, die um ca. eine Grössenordnung (BE und LMA AZ) bzw. um ca. 4 Grössenordnungen (HAA) unterhalb des Schutzziels von 0.1 mSv/a liegen (vgl. Fig. A5.2-1 in Anhang 5, Inventare BE, HAA und LMA AZ). Die vergleichsweise niedrigen Dosen für BE und HAA im Vergleich mit denjenigen für LMA sind auf die günstigen Barriereneigenschaften der Bentonit-Verfüllung in den Lagerstollen zurückzuführen (sehr niedrige hydraulische Durchlässigkeit des Bentonits selbst für vergleichsweise hohe hydraulische Durchlässigkeiten im Wirtgestein). Der Einfluss einer allfälligen Bentonit-Degradation im HAA-Lager bei höheren Durchlässigkeiten im Wirtgestein ist in Fig. A5.2-2 illustriert.

- **Verschärfte Anforderungen für SMA und HAA** (Schritt 4.2) – Bei der verschärften Anforderung für die hydraulische Durchlässigkeit geht es um die horizontale Durchlässigkeit aufgrund von Wasserfliesspfaden, denen mit den Lagerkammern voraussichtlich nicht ausgewichen werden kann; für die horizontale Durchlässigkeit von Wasserfliesspfaden in der Lagerebene wird ein Wert verlangt, welcher der Mindestanforderung für die vertikale Durchlässigkeit entspricht. Dies dient dem Ziel, den Einschluss der Radionuklide besser zu gewährleisten, indem eine erhöhte Radionuklidausbreitung in horizontaler Richtung vermieden wird.
- **Bewertungsskalen für SMA und HAA** (Schritte 4.3 und 5.3) – Die Bewertungsstufen stützen sich auf generelle Erfahrungen und auf die Resultate der orientierenden Sicherheitsbetrachtungen in Anhang 5: Fig. A5.2-1 zeigt den Einfluss der vertikalen hydraulischen Durchlässigkeit für ein homogen-poröses Wirtgestein auf die berechneten Dosismaxima für das SMA- und HAA-Lager. Im Falle von SMA und LMA wird die Bewertung auf die Referenzzuteilung beschränkt. Hydraulische Durchlässigkeiten in vertikaler Richtung von $\leq 10^{-11}$ m/s (SMA) bzw. $\leq 10^{-12}$ m/s (HAA) werden als *sehr günstig* eingestuft. Gemäss Fig. A5.2-1 führen tiefere Durchlässigkeiten in der Regel zu keinen weiteren signifikanten Dosisreduktionen. Hydraulische Durchlässigkeiten von $\leq 10^{-10}$ m/s (SMA) bzw. $\leq 10^{-11}$ m/s (HAA) werden als *günstig* eingestuft. Im Falle von SMA (Referenz-Abfallzuteilung) entfallen die Bewertungsstufen *ungünstig* und *bedingt günstig*. Für HAA erfolgt in der Bewertung eine graduelle Abstufung für hydraulische Durchlässigkeiten zwischen 10^{-10} m/s bis 10^{-11} m/s zwischen den Bewertungsstufen *ungünstig* bis *bedingt günstig*. In diesem Durchlässigkeitsbereich wird zwar das Schutzziel von 0.1 mSv/a immer noch deutlich unterschritten, aber die Sicherheitsmargen fallen für BE und LMA vergleichsweise gering aus. Bei der wirtgesteinsspezifischen Bewertung in Schritt 4.3 fliessen auch Ungewissheiten und die generelle tektonische Überprägung der bevorzugten Wirtgesteine ein; für SMA führt dies bei den Wirtgesteinen Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger', Effinger Schichten und Mergel-Formationen des Helvetikums im Vergleich zum Opalinuston zu Abzügen in der Bewertung. Zusätzlich wird bei der Bewertung in Schritt 5.3 die spezifische tektonische Überprägung der bevorzugten Wirtgesteine berücksichtigt; für SMA führt dies beim Wirtgestein Effinger Schichten in der östlichen Subjurassischen Zone gegenüber der wirtgesteinsspezifischen Bewertung zu einem weiteren Abzug.

A1.10 Grundwasserstockwerke

Festlegung der Anforderungen und Bewertungsskalen

Schritt/ Kriterium	Attribut	Anforderungen und Bewertungsskalen	
		SMA	**HAA**
5.3/1.2	Günstig bis sehr günstig (graduelle Abstufung)	Ausgeprägter Grundwasserstockwerkbau; Aquifere ober- und unterhalb des WG/EG bilden voneinander unabhängige Fliesssysteme; Grundwasserstockwerkbau im Bereich/Region nachgewiesen (*sehr günstig*), aufgrund der stratigraphischen Verhältnisse erwartet (*günstig*)	
	Ungünstig bis bedingt günstig (graduelle Abstufung)	Es gibt Anzeichen (hydraulisch oder hydrochemisch), dass die Aquifere ober- und unterhalb des WG/EG hydraulisch miteinander verbunden sind	

Hintergrundinformationen

1. Relevanz für Langzeitsicherheit bzw. bautechnische Machbarkeit

Der Grundwasserstockwerkbau liefert einen unabhängigen Hinweis auf die hydraulische Barrierenwirkung des Wirtgesteins bzw. einschlusswirksamen Gebirgsbereichs sowie auf die vorherrschenden Transportprozesse und damit indirekt auch auf die Radionuklidfreisetzungsraten aus dem geologischen Tiefenlager.

Relevante Sicherheitsfunktionen:	Rückhaltung Kleine Freisetzungsraten
Relevante Elemente des Barrierensystems:	WG/EG
Sicherheitsrelevante Eigenschaften:	Transporteigenschaften (im Hinblick auf geringe Wasserführung und vorherrschende Transportprozesse)

2. Beschreibung und zugehörige Grundlagen

Beurteilt wird die Ausprägung des Grundwasserstockwerkbaus innerhalb der bevorzugten Bereiche. Aquifere ober- und unterhalb des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs, die voneinander unabhängige Fliesssysteme bilden, können als Hinweis auf geringe Durchlässigkeiten des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (Aquitard) interpretiert werden; teilweise lassen sich daraus auch Aussagen über die vorherrschenden Transportprozesse machen. Es wird unterschieden, ob ein Grundwasserstockwerkbau in Sondierbohrungen im Bereich oder in der Region nachgewiesen wurde bzw. aufgrund der stratigraphischen Verhältnisse zu erwarten ist. Weiter wird geprüft, ob es Anzeichen gibt, dass die Aquifere ober- und unterhalb des WG/EG hydraulisch miteinander verbunden sind ('cross-formational flow').

3. Erläuterung der Anforderungen und Bewertungsskalen

Für den Indikator 'Grundwasserstockwerke' wird eine Bewertungsskala für den Schritt 5.3 festgelegt (s. oben). Es werden keine Mindestanforderungen und verschärfte Anforderungen verwendet. Die Bewertungsskalen für SMA und HAA sind identisch.

- **Bewertungsskalen für SMA und HAA** (Schritt 5.3) – Als *günstig* bzw. *sehr günstig* gilt ein ausgeprägter Grundwasserstockwerkbau, bei dem die Aquifere ober- und unterhalb des WG/EG voneinander unabhängige Fliesssysteme bilden (keine Hinweise auf 'cross-formational flow'). Die Abstufung zwischen den Bewertungsstufen erfolgt aufgrund der lokalen Bedingungen und Hinweise: Ist ein Grundwasserstockwerkbau im Bereich/in der Region in Bohrungen nachgewiesen, wird dies als *sehr günstig* eingestuft; ist ein solcher lediglich aufgrund der stratigraphischen Verhältnisse zu erwarten, wird dies als *günstig* eingestuft. Als *ungünstig* bis *bedingt günstig* wird eine hydrogeologische Situation dann eingestuft, wenn es hydraulische oder hydrochemische Anzeichen gibt, dass die Aquifere ober- und unterhalb des WG/EG hydraulisch miteinander verbunden sind ('cross-formational flow'). Dies würde auf erhöhte Wasserflüsse und auf Advektion als dominierenden Transportprozess im WG/EG hindeuten.

A1.11 Mineralogie

Festlegung der Anforderungen und Bewertungsskalen

Schritt/ Kriterium	Attribut	Anforderungen und Bewertungsskalen	
		SMA	**HAA**
4.3/1.3	Sehr günstig	> 40 % Tonminerale, Glimmer, Zeolithe	
	Günstig	4 – 40 % Tonminerale, Glimmer, Zeolithe	
	Bedingt günstig	< 4 % Tonminerale, Glimmer, Zeolithe	
	Ungünstig	Keine der obigen Minerale	
5.3/1.3	Bewertungs-skala	Bewertungsstufen wie in Schritt 4.3/Kriterium 1.3	

Hintergrundinformationen

1. Relevanz für Langzeitsicherheit bzw. bautechnische Machbarkeit

Der vorliegende Indikator dient der Beurteilung der Mineralogie im Wirtgestein bzw. einschlusswirksamen Gebirgsbereich im Hinblick auf die Langzeitsicherheit der geologischen Tiefenlager. Die Mineralogie des Wirtgesteins beeinflusst die Rückhaltung der Radionuklide durch Sorption in den geologischen Barrieren.

Relevante Sicherheitsfunktionen:	Rückhaltung Kleine Freisetzungsraten
Relevante Elemente des Barrierensystems:	WG/EG
Sicherheitsrelevante Eigenschaften:	Rückhaltung durch Sorption, beeinflusst durch Mineralogie

2. Beschreibung und zugehörige Grundlagen[95]

Die geochemischen Bedingungen im Wirtgestein werden anhand der folgenden Parameter beurteilt:

- Mineralogie, d.h. die in einem Gestein vorkommenden Mineralien;
- Porenwasserzusammensetzung charakterisiert durch:
  - pH/p_{CO2}, pH-Wert mit dem damit gekoppelten Karbonatsystem
  - Eh, Redox-Eigenschaften (reduzierend, oxidierend)
  - Salinität (bzw. Ionenstärke)
  - Mikrobielle Prozesse
  - Kolloide

[95] Wegen des Zusammenspiels der Einflüsse der verschiedenen geochemischen Parameter auf die Radionuklidrückhaltung im Wirtgestein ist diese Beschreibung übergeordnet und deshalb in A1.11 bis A1.16 identisch. Vertiefende Informationen über den vorliegenden Indikator finden sich in Bradbury & Baeyens (2003), Allard et al. (1983) und Van Loon & Soler (2003).

Einfluss der geochemischen Bedingungen auf die chemische Radionuklidrückhaltung in der Geosphäre

Die Rückhaltung von Radionukliden durch das Gestein wird in der Regel mit Sorptionsmechanismen beschrieben (vgl. detaillierte Diskussion in Bradbury et al. 2008). Damit wird diese Rückhaltung tendenziell unterschätzt, weil in der Folge einer Sorption oft weitere Prozesse wie Oberflächenpräzipitation und die Bildung von Mischphasen ablaufen. Bei den Sorptionsprozessen unterscheidet man zwischen Kationenaustausch und Oberflächenkomplexierung.

Kationenaustausch:

Gesteinsbildende Minerale, wie z.B. Tonminerale, weisen negativ geladene Oberflächen auf. Letztere werden durch die Aufnahme von Kationen aus dem Porenwasser elektrisch neutralisiert. Solche Minerale binden auch positiv geladene Radionuklide, indem diese gegen die am Mineral gebundenen Kationen (Na^+, K^+, Ca^{2+} etc.) ausgetauscht werden. Die Kationenaustauschkapazität (CEC) eines Minerals entspricht der Anzahl der Ladungen, welche für den Austausch zur Verfügung stehen und ist deshalb ein Mass für die Fähigkeit, Kationen nach diesem Sorptionsmechanismus zu binden. Der Kationenaustauschmechanismus ist charakterisiert durch seine Unabhängigkeit vom pH-Wert und seine starke Abhängigkeit von der Art der Ionen im Porenwasser und generell von der Ionenstärke. Mit zunehmender Ionenstärke wächst die Konkurrenz um die Austauschplätze der Minerale, d.h., die Sorption von Radionukliden, welche mittels Kationenaustausch sorbieren, sinkt. Als gegenläufiger Trend bezüglich Radionuklid-Mobilität wird zumindest in Opalinuston für Kationen eine Abnahme der effektiven Diffusivität mit zunehmender Ionenstärke beobachtet. Die elektrische Doppelschicht an den geladenen Tonoberflächen scheint ein Haupttransportweg für Kationen zu sein, welcher mit zunehmender Ionenstärke enger wird (dünnere elektrische Doppelschicht).

Oberflächenkomplexierung:

Bei der Oberflächenkomplexierung werden Radionuklide durch chemische Bindung an aktiven Stellen der Mineraloberfläche sorbiert. Der Mechanismus zeichnet sich durch seine schwache Abhängigkeit von der Ionenstärke, aber seine starke pH-Abhängigkeit aus. Die Affinität von Anionen zu den Sorptionsstellen der Mineraloberfläche nimmt mit zunehmendem pH-Wert ab, diejenige von Kationen zu. Erfahrungsgemäss ist die Anzahl der Sorptionsstellen, und somit die Fähigkeit des Minerals, Radionuklide zu sorbieren, ungefähr proportional zur Mineraloberfläche und zur Kationenaustauschkapazität CEC.

Im Folgenden sind die Bereiche der für die Sorption von Radionukliden wichtigen Parameter "Oberfläche" und "Kationenaustauschkapazität" für Mineralgruppen aufgelistet.

Die Mineralgruppen sind in der Tabelle entsprechend ihrer Oberfläche und Kationenaustauschkapazität, d.h. nach ihrer Fähigkeit, Radionuklide zu sorbieren, geordnet. Zwar können gewisse Oxide und Sulfide bessere Sorptionseigenschaften besitzen als z.B. Quarz oder Karbonate, sind aber meist in so geringen Mengen vorhanden, dass sie nicht ins Gewicht fallen. Evaporite (Sulfate und Halogenide, meist als Anhydrit und Steinsalz vorhanden) eignen sich als Wirtgestein nur, wenn sie einen Einschluss gewährleisten, wenn also die geochemischen Eigenschaften keine Rolle spielen.

Die Elemente U, Pu, Np, Tc sind in ihren tiefsten erreichbaren Oxidationsstufen am wenigsten mobil, reduzierende Bedingungen sind also von Vorteil. Dies gilt bedingt auch für Se; die Mobilität als Funktion der Oxidationsstufe ist bei diesem Element aber komplizierter.

Mineralgruppe	Oberfläche	Kationenaustauschkapazität
Tonminerale	gross	hoch
Glimmerminerale	mittel	hoch
Zeolithe	gross	hoch
Feldspäte und andere Silikate	klein	klein
Karbonate	sehr klein	sehr klein
Quarz	sehr klein	sehr klein
Aluminium-/Mangan-/Eisenoxide	klein bis mittel [1)]	klein
Sulfide	klein	klein
Sulfate und Halogenide	sehr klein	sehr klein

[1)] Eisen(III)oxy-hydroxide können zwar eine sehr grosse Oberfläche haben, kommen aber unter reduzierenden Bedingungen nicht vor.

Um die Rückhaltung der Radionuklide durch Sorption (K_d-Werte) für alle zu beurteilenden Wirtgesteine quantifizieren zu können, wurden von Bradbury et al. (2008) Sorptionsdatensätze für Tonsteine, kristallines Gestein und Calcit bei pH-Werten zwischen 6 und 9 verschiedenen Ionenstärken hergeleitet.

Mikroorganismen katalysieren durch ihre Aktivität chemische Reaktionen. Vor allem die reduzierenden Bedingungen, welche in der Regel im Wirtgestein herrschen, werden vermutlich durch mikrobiologische Aktivität unterstützt. In Tonsteinen ist diese Aktivität oft wegen zu kleinen Poren und zu tiefer Wasseraktivität sehr niedrig. In Gesteinen mit grösseren Poren und Klüften sind oft die für mikrobiologische Aktivität notwendigen Nährstoffe (z.B. degradierbare organische Stoffe) verbraucht oder von vornherein nur in kleinsten Mengen vorhanden, und/ oder es fehlt ein Elektronenakzeptor wie Sauerstoff oder Sulfat. Sind in seltenen Fällen die Bedingungen für mikrobiologische Aktivität aber gut, so bilden sich Biofilme, welche die Sorption und Präzipitation von Radionukliden beeinflussen. Die Rückhaltung der Radionuklide kann dadurch grösser oder kleiner werden. Die Bildung von Biofilmen erhöht also die Ungewissheit.

Kolloide können Radionuklide transportieren und so deren Mobilität erhöhen. Kolloide spielen in geklüfteten Gesteinen mit advektivem Transport eine viel grössere Rolle als in Gesteinen mit diffusionskontrolliertem Transport. Bestehen die Kolloide aus Mineralen, so haben die Radionuklide zu diesen eine vergleichbare Affinität wie zur Gesteinsmatrix. Es braucht daher eine relativ hohe Kolloidkonzentration im Porenwasser, um eine wesentliche Erhöhung der Radionuklidmobilität zu bewirken, es sei denn, die Radionuklide werden irreversibel an die Kolloide gebunden (und werden nicht filtriert). Im Porenwasser gelöste Ionen destabilisieren Kolloide durch Ladungsneutralisierung; kleine Ionenstärken begünstigen also die Kolloidmobilität. Kolloide können auch aus organischem Material wie Huminstoffen bestehen, welche die Radionuklidmobilität erhöhen (Glaus et al. 1997). Nur aus Aktinidverbindungen bestehende Kolloide verlassen bei geeigneten technischen Barrieren das Nahfeld nicht.

Die durch ein geologisches Tiefenlager verursachte Dosis wird in den allermeisten Fällen durch Radionuklide bestimmt, welche in den technischen und geologischen Barrieren chemisch nicht zurückgehalten werden. Solche mobile Radionuklide, z.B. ^{129}I, ^{79}Se, $^{14}C_{org}$ und ^{36}Cl, sind im Nahfeld nicht löslichkeitslimitiert und sorbieren im Nahfeld und im Wirtgestein nicht oder nur sehr schwach. Die dosisdominierende Rolle dieser Radionuklide steht in grossem Kontrast zu

ihrem kleinen Anteil am gesamten radioaktiven Inventar resp. zu ihrer vergleichsweise geringen Radiotoxizität. Die übrigen Radionuklide tragen wesentlich weniger zur Dosis bei, weil sie im Nahfeld, aber auch in der Geosphäre (Wirtgestein) chemisch wirkungsvoll zurückgehalten werden.

Auf die Rückhaltung von nicht sorbierenden Radionukliden haben die geochemischen Bedingungen geringen Einfluss. Die Anforderungen an die geochemischen Bedingungen und Bewertungsskalen zielen auf die bezüglich Radiotoxizität überwiegenden, aber – abhängig von den chemischen Bedingungen – weniger mobilen Radionuklide, um deren Beitrag zur Dosis zu beschränken.

Die Rückhaltung der Radionuklide ist nicht nur chemischer Natur (Sorption), sondern hängt auch von den Transporteigenschaften des Wirtgesteins ab (vgl. auch Indikatoren 'Hydraulische Durchlässigkeit' sowie 'Art der Transportpfade und Ausbildung des Porenraums').

3. Erläuterung der Anforderungen und Bewertungsskalen

Für den Indikator 'Mineralogie' werden Bewertungsskalen für die Schritte 4.3 und 5.3 festgelegt (s. oben). Die Bewertungsskalen für SMA und HAA werden als identisch angenommen. Es werden keine Mindestanforderungen und verschärfte Anforderungen verwendet.

- **Bewertungsskalen für SMA und HAA** (Schritte 4.3 und 5.3) – Die Bewertungsskala für die Minerale ist auf deren Sorptionseigenschaften für Radionuklide ausgerichtet. Ein Anteil von über 40 % an Tonmineralen, Glimmer oder Zeolithen wird mit *sehr günstig*, ein Anteil zwischen 4 und 40 % mit *günstig* und ein Anteil kleiner als 4 % mit *bedingt günstig* bewertet. Enthält ein Wirtgestein keine der oben genannten Minerale, so wird es als *ungünstig* taxiert. Um nachhaltige reduzierende Bedingungen zu gewährleisten, sollten in einem Wirtgestein puffernde Minerale wie Pyrit und Siderit vorkommen, was in der Bewertungsskala für Redox-Bedingungen (s. auch Indikator 'Redox-Bedingungen') berücksichtigt wird.

A1.12 pH

Festlegung der Anforderungen und Bewertungsskalen

Schritt/ Kriterium	Attribut	Bewertungsskalen	
		SMA	**HAA**
4.3/1.3	Sehr günstig	pH 7 – 9	
	Günstig	pH 6 – 7	
	Bedingt günstig	–	
	Ungünstig	pH > 9 oder < 6	
5.3/1.3	Bewertungs-skala	Bewertungsstufen wie in Schritt 4.3/Kriterium 1.3	

Hintergrundinformationen

1. Relevanz für Langzeitsicherheit bzw. bautechnische Machbarkeit

Der vorliegende Indikator dient der Beurteilung der Einflüsse des pH-Werts im Wirtgestein bzw. einschlusswirksamen Gebirgsbereich auf die Langzeitsicherheit der geologischen Tiefenlager. Der pH-Wert beeinflusst:

- die Dauerhaftigkeit und somit das Langzeitverhalten der folgenden Nahfeldkomponenten: Abfallmatrix, Endlagerbehälter (z.B. Stahlbehälter), Zement
- die Rückhaltung und die Transporteigenschaften der Radionuklide in den technischen und geologischen Barrieren

Relevante Sicherheitsfunktionen:	Einschluss Verzögerte Freisetzung Rückhaltung Kleine Freisetzungsraten
Relevante Elemente des Barrierensystems:	Abfallmatrix Endlagerbehälter Verfüllung & Versiegelung WG/EG
Sicherheitsrelevante Eigenschaften:	Korrosionsbeständigkeit der Abfallmatrix und der Endlagerbehälter Stabilität der Verfüll- und Versiegelungs-materialien Radionuklid-Rückhaltung im degradierten Endlagerbehälter (Korrosionsprodukte), in der Verfüllung/Versiegelung und im WG/EG

2. Beschreibung und zugehörige Grundlagen[96]

Die geochemischen Bedingungen im Wirtgestein werden anhand der folgenden Parameter beurteilt:

- Mineralogie, d.h. die in einem Gestein vorkommenden Mineralien;
- Porenwasserzusammensetzung charakterisiert durch:
  - pH/p_{CO2}, pH-Wert mit dem damit gekoppelten Karbonatsystem
  - Eh, Redox-Eigenschaften (reduzierend, oxidierend)
  - Salinität (bzw. Ionenstärke)
- Mikrobielle Prozesse
- Kolloide

Einfluss der Porenwasserzusammensetzung auf das Nahfeld

Das Porenwasser im Nahfeld eines Lagers für hochaktive Abfälle und abgebrannte Brennelemente wird durch den Bentonit, dasjenige im LMA- und SMA-Nahfeld durch Zement gepuffert. Die geochemischen Bedingungen im Nahfeld sind also gegen Einflüsse der Geosphäre stabilisiert. Trotzdem wird das Porenwasser des Wirtgesteins vor allem über längere Zeiträume die chemischen und physikalischen Prozesse im Nahfeld beeinflussen. Solche Einflüsse sind in Tab. A1.12-1 zusammengestellt.

[96] Wegen des Zusammenspiels der Einflüsse der verschiedenen geochemischen Parameter auf das Nahfeld und auf die Radionuklidrückhaltung im Wirtgestein, ist diese Beschreibung übergeordnet und deshalb bezüglich Nahfeld in Anhang A1.12 bis A1.14 und bezüglich Radionuklidrückhaltung im Wirtgestein in Anhang A1.11 bis A1.16 identisch. Vertiefende Informationen über den vorliegenden Indikator finden sich in Bradbury & Baeyens (2006), Marsh & Taylor (1988) und Advocat (1991).

Tab. A1.12-1: Einfluss der Porenwasserzusammensetzung auf das Nahfeld (pH).

	BE & HAA			**LMA & SMA**	
	Bentonit	**Stahlbehälter**	**Abfallmatrix**	**Zement**	**Bentonit/Sand**
pH/p_{CO2}	–	Beschleunigung der Korrosion bei tiefem pH	Glas: Beschleunigung der Korrosion bei pH-Werten > 10 (und evtl. < 4)	Leicht beschleunigte Degradation bei tiefem pH/ hohem p_{CO2}	–
Eh/Redox-Reaktionen	–	Oxidation durch O_2 NO_3^- (mikrobiell) SO_4^{2-} (mikrobiell)	UO_2: oxidative Auflösung	–	–
Salinität (Ionenstärke):					
sehr tief	Auswaschen/ Kolloidbildung	–	–	–	Auswaschen/ Kolloidbildung
sehr hoch	(Verlust der Quellfähigkeit, falls Trockendichte < 0.9 Mg/m^3)	Beschleunigung der Korrosion durch Cl^-	Glas: Wasserinhaltsstoffe, wie z.B. Mg^{2+}, können Korrosion beschleunigen		Erhöhung der hydraulischen Durchlässigkeit

Einfluss der geochemischen Bedingungen auf die chemische Radionuklidrückhaltung in der Geosphäre

Die Rückhaltung von Radionukliden durch das Gestein wird in der Regel mit Sorptionsmechanismen beschrieben (vgl. detaillierte Diskussion in Bradbury et al. 2008). Damit wird diese Rückhaltung tendenziell unterschätzt weil in der Folge einer Sorption oft weitere Prozesse wie Oberflächenpräzipitation und die Bildung von Mischphasen ablaufen. Bei den Sorptionsprozessen unterscheidet man zwischen Kationenaustausch und Oberflächenkomplexierung.

Kationenaustausch:

Gesteinsbildende Minerale, wie z.B. Tonminerale, weisen negativ geladene Oberflächen auf. Letztere werden durch die Aufnahme von Kationen aus dem Porenwasser elektrisch neutralisiert. Solche Minerale binden auch positiv geladene Radionuklide, indem diese gegen die am Mineral gebundenen Kationen (Na^+, K^+, Ca^{2+} etc.) ausgetauscht werden. Die Kationenaustauschkapazität (CEC) eines Minerals entspricht der Anzahl der Ladungen, welche für den Austausch zur Verfügung stehen und ist deshalb ein Mass für die Fähigkeit, Kationen nach diesem Sorptionsmechanismus zu binden. Der Kationenaustauschmechanismus ist charakterisiert durch seine Unabhängigkeit vom pH-Wert und seine starke Abhängigkeit von der Art der

Ionen im Porenwasser und generell von der Ionenstärke. Mit zunehmender Ionenstärke wächst die Konkurrenz um die Austauschplätze der Minerale, d.h., die Sorption von Radionukliden, welche mittels Kationenaustausch sorbieren, sinkt. Als gegenläufiger Trend bezüglich Radionuklid-Mobilität wird zumindest in Opalinuston für Kationen eine Abnahme der effektiven Diffusivität mit zunehmender Ionenstärke beobachtet. Die elektrische Doppelschicht an den geladenen Tonoberflächen scheint ein Haupttransportweg für Kationen zu sein, welcher mit zunehmender Ionenstärke enger wird (dünnere elektrische Doppelschicht).

Oberflächenkomplexierung:

Bei der Oberflächenkomplexierung werden Radionuklide durch chemische Bindung an aktiven Stellen der Mineraloberfläche sorbiert. Der Mechanismus zeichnet sich durch seine schwache Abhängigkeit von der Ionenstärke, aber seine starke pH-Abhängigkeit aus. Die Affinität von Anionen zu den Sorptionsstellen der Mineraloberfläche nimmt mit zunehmendem pH-Wert ab, diejenige von Kationen zu. Erfahrungsgemäss ist die Anzahl der Sorptionsstellen, und somit die Fähigkeit des Minerals, Radionuklide zu sorbieren, ungefähr proportional zur Mineraloberfläche und zur Kationenaustauschkapazität CEC.

Im Folgenden sind die Bereiche der für die Sorption von Radionukliden wichtigen Parameter "Oberfläche" und "Kationenaustauschkapazität" für Mineralgruppen aufgelistet.

Mineralgruppe	**Oberfläche**	**Kationenaustauschkapazität**
Tonminerale	gross	hoch
Glimmerminerale	mittel	hoch
Zeolithe	gross	hoch
Feldspäte und andere Silikate	klein	klein
Karbonate	sehr klein	sehr klein
Quarz	sehr klein	sehr klein
Aluminium-/Mangan-/Eisenoxide	klein bis mittel [1)]	klein
Sulfide	klein	klein
Sulfate und Halogenide	sehr klein	sehr klein

[1)] Eisen(III)oxy-hydroxide können zwar eine sehr grosse Oberfläche haben, kommen aber unter reduzierenden Bedingungen nicht vor.

Die Mineralgruppen sind in der Tabelle entsprechend ihrer Oberfläche und Kationenaustauschkapazität, d.h. nach ihrer Fähigkeit, Radionuklide zu sorbieren, geordnet. Zwar können gewisse Oxide und Sulfide bessere Sorptionseigenschaften besitzen als z.B. Quarz oder Karbonate, sind aber meist in so geringen Mengen vorhanden, dass sie nicht ins Gewicht fallen. Evaporite (Sulfate und Halogenide, meist als Anhydrit und Steinsalz vorhanden) eignen sich als Wirtgestein nur, wenn sie einen Einschluss gewährleisten, wenn also die geochemischen Eigenschaften keine Rolle spielen.

Die Elemente U, Pu, Np, Tc sind in ihren tiefsten erreichbaren Oxidationsstufen am wenigsten mobil, reduzierende Bedingungen sind also von Vorteil. Dies gilt bedingt auch für Se; die Mobilität als Funktion der Oxidationsstufe ist bei diesem Element aber komplizierter.

Um die Rückhaltung der Radionuklide durch Sorption (K_d-Werte) für alle zu beurteilenden Wirtgesteine quantifizieren zu können, wurden von Bradbury et al. (2008) Sorptionsdatensätze für Tonsteine, kristallines Gestein und Calcit bei pH-Werten zwischen 6 und 9 und verschiedenen Ionenstärken hergeleitet.

Mikroorganismen katalysieren durch ihre Aktivität chemische Reaktionen. Vor allem die reduzierenden Bedingungen, welche in der Regel im Wirtgestein herrschen, werden vermutlich durch mikrobiologische Aktivität unterstützt. In Tonsteinen ist diese Aktivität oft wegen zu kleinen Poren und zu tiefer Wasseraktivität sehr niedrig. In Gesteinen mit grösseren Poren und Klüften sind oft die für mikrobiologische Aktivität notwendigen Nährstoffen (z.B. degradierbare organische Stoffe) verbraucht oder von vornherein nur in kleinsten Mengen vorhanden, und/oder es fehlt ein Elektronenakzeptor wie Sauerstoff oder Sulfat. Sind in seltenen Fällen die Bedingungen für mikrobiologische Aktivität aber gut, so bilden sich Biofilme, welche die Sorption und Präzipitation von Radionukliden beeinflussen. Die Rückhaltung der Radionuklide kann dadurch grösser oder kleiner werden. Die Bildung von Biofilmen erhöht also die Ungewissheit.

Kolloide können Radionuklide transportieren und so deren Mobilität erhöhen. Kolloide spielen in geklüfteten Gesteinen mit advektivem Transport eine viel grössere Rolle als in Gesteinen mit diffusionskontrolliertem Transport. Bestehen die Kolloide aus Mineralen, so haben die Radionuklide zu diesen eine vergleichbare Affinität wie zur Gesteinsmatrix. Es braucht daher eine relativ hohe Kolloidkonzentration im Porenwasser, um eine wesentliche Erhöhung der Radionuklidmobilität zu bewirken, es sei denn, die Radionuklide werden irreversibel an die Kolloide gebunden (und werden nicht filtriert). Im Porenwasser gelöste Ionen destabilisieren Kolloide durch Ladungsneutralisierung; kleine Ionenstärken begünstigen also die Kolloidmobilität. Kolloide können auch aus organischem Material wie Huminstoffen bestehen, welche die Radionuklidmobilität erhöhen (Glaus et al. 1997). Nur aus Aktinidverbindungen bestehende Kolloide verlassen bei geeigneten technischen Barrieren das Nahfeld nicht.

Die durch ein geologisches Tiefenlager verursachte Dosis wird in den allermeisten Fällen durch Radionuklide bestimmt, welche in den technischen und geologischen Barrieren chemisch nicht zurückgehalten werden. Solche mobile Radionuklide, z.B. ^{129}I, ^{79}Se, $^{14}C_{org}$ und ^{36}Cl, sind im Nahfeld nicht löslichkeitslimitiert und sorbieren im Nahfeld und im Wirtgestein nicht oder nur sehr schwach. Die dosisdominierende Rolle dieser Radionuklide steht in grossem Kontrast zu ihrem kleinen Anteil am gesamten radioaktiven Inventar resp. zu ihrer vergleichsweise geringen Radiotoxizität. Die übrigen Radionuklide tragen wesentlich weniger zur Dosis bei, weil sie im Nahfeld, aber auch in der Geosphäre (Wirtgestein) chemisch wirkungsvoll zurückgehalten werden.

Auf die Rückhaltung von nicht sorbierenden Radionukliden haben die geochemischen Bedingungen geringen Einfluss. Die Anforderungen an die geochemischen Bedingungen und Bewertungsskalen zielen auf die bezüglich Radiotoxizität überwiegenden, aber – abhängig von den chemischen Bedingungen – weniger mobilen Radionuklide, um deren Beitrag zur Dosis zu beschränken.

Die Rückhaltung der Radionuklide ist nicht nur chemischer Natur (Sorption), sondern hängt auch von den Transporteigenschaften des Wirtgesteins ab (vgl. auch Indikatoren 'Hydraulische Durchlässigkeit' sowie 'Art der Transportpfade und Ausbildung des Porenraums').

3. Erläuterung der Anforderungen und Bewertungsskalen

Für den Indikator 'pH' werden Bewertungsskalen für die Schritte 4.3 und 5.3 festgelegt (s. oben). Die Bewertungsskalen für SMA und HAA werden als identisch angenommen. Es werden keine Mindestanforderungen und verschärfte Anforderungen verwendet.

- **Bewertungsskalen für SMA und HAA** (Schritte 4.3 und 5.3) – Obwohl Karbonat die Radionuklidsorption verringert, wird hier nur der pH-Wert als Indikator verwendet. Im pH-Bereich 7 – 9 (*sehr günstig*) sorbieren Kationen tendenziell besser als bei tieferem pH. Allerdings wird dabei in Kauf genommen, dass die ohnehin schwache Sorption von Anionen bei zunehmendem pH abnimmt. Der pH-Bereich 6 – 7 wird als *günstig* beurteilt. Allgemein liegt der pH-Wert von Schweizer Grundwässern in der Regel zwischen 6 und 9. Ein pH-Wert ausserhalb dieses Bereichs wird als *ungünstig* taxiert, weil die hier gemachten pauschalen Aussagen über die geochemischen Bedingungen nur für diesen Bereich gelten.

  Im pH-Bereich 6 – 9 sind die Einflüsse auf die technischen Barrieren gemäss Tab. A1.12-1 insbesondere wegen der Pufferung im Nahfeld sekundär und fliessen deshalb nicht in die Beurteilung ein.

  Neuere Erkenntnisse deuten darauf hin, dass in Ton- resp. Mergel-Gesteinen der pH-Wert durch das Calcit/Karbonatsystem und die Silikate bestimmt ist, jedoch nicht durch das von ausserhalb in das Wirtgestein gelangende CO_2. Folglich dürften die Porenwässer solcher Gesteine vergleichbare pH-Werte aufweisen. Für das am besten untersuchte Opalinuston-Porenwasser liegt der Wert knapp über 7; er kann auf andere tonhaltige Gesteine übertragen werden. Dies gilt z.B. auch für das NaCl-Wasser des Wellenbergmergels, für welches früher ein tieferer, aber mit höherer Unsicherheit behafteter Wert angenommen wurde (Nagra 1997).

A1.13 Redox-Bedingungen

Festlegung der Anforderungen und Bewertungsskalen

Schritt/ Kriterium	Attribut	Anforderungen und Bewertungsskalen	
		SMA	**HAA**
4.3/1.3	Sehr günstig	Reduzierende Bedingungen gepuffert durch Minerale (z.B. Pyrit, Siderit)	
	Günstig	–	
	Bedingt günstig	Reduzierende Bedingungen, aber keine puffernden Minerale	
	Ungünstig	Nitrat > 1 g/L	
5.1/1.3	Mindest-anforderung (MA)	Keine ungesättigten (oxidierenden) Bedingungen, basierend auf Wirtgesteinseigenschaften bzw. hydrogeologischer Situation.	
5.3/1.3	Bewertungs-skala	Bewertungsstufen wie in Schritt 4.3/Kriterium 1.3	

Hintergrundinformationen

1. Relevanz für Langzeitsicherheit bzw. bautechnische Machbarkeit

Der vorliegende Indikator dient der Beurteilung der Einflüsse der Redox-Bedingungen im Wirtgestein bzw. einschlusswirksamen Gebirgsbereich auf die Langzeitsicherheit der geologischen Tiefenlager. Die Redox-Bedingungen beeinflussen:

- die Dauerhaftigkeit und somit das Langzeitverhalten der folgenden Nahfeldkomponenten: Abfallmatrix, Endlagerbehälter (z.B. Stahlbehälter)
- die Rückhaltung und die Transporteigenschaften der Radionuklide in den technischen und geologischen Barrieren

Relevante Sicherheitsfunktionen:	Einschluss Verzögerte Freisetzung Rückhaltung Kleine Freisetzungsraten
Relevante Elemente des Barrierensystems:	Abfallmatrix Endlagerbehälter Verfüllung & Versiegelung WG/EG
Sicherheitsrelevante Eigenschaften:	Korrosionsbeständigkeit der Abfallmatrix und der Endlagerbehälter Radionuklid-Rückhaltung im degradierten Endlagerbehälter (Korrosionsprodukte), in der Verfüllung/Versiegelung und im WG/EG

2. Beschreibung und zugehörige Grundlagen[97]

Die geochemischen Bedingungen im Wirtgestein werden anhand der folgenden Parameter beurteilt:

- Mineralogie, d.h. die in einem Gestein vorkommenden Mineralien;
- Porenwasserzusammensetzung charakterisiert durch:
  - pH/p_{CO2}, pH-Wert mit dem damit gekoppelten Karbonatsystem
  - Eh, Redox-Eigenschaften (reduzierend, oxidierend)
  - Salinität (bzw. Ionenstärke)
- Mikrobielle Prozesse
- Kolloide

Einfluss der Porenwasserzusammensetzung auf das Nahfeld

Das Porenwasser im Nahfeld eines Lagers für hochaktive Abfälle und abgebrannte Brennelemente wird durch den Bentonit, dasjenige im LMA- und SMA-Nahfeld durch Zement gepuffert. Die geochemischen Bedingungen im Nahfeld sind also gegen Einflüsse der Geosphäre stabilisiert. Trotzdem wird das Porenwasser des Wirtgesteins vor allem über längere Zeiträume die chemischen und physikalischen Prozesse im Nahfeld beeinflussen. Solche Einflüsse sind in Tab. A1.13-1 zusammengestellt.

Einfluss der geochemischen Bedingungen auf die chemische Radionuklidrückhaltung in der Geosphäre

Die Rückhaltung von Radionukliden durch das Gestein wird in der Regel mit Sorptionsmechanismen beschrieben (vgl. detaillierte Diskussion in Bradbury et al. 2008). Damit wird diese Rückhaltung tendenziell unterschätzt weil in der Folge einer Sorption oft weitere Prozesse wie Oberflächenpräzipitation und die Bildung von Mischphasen ablaufen. Bei den Sorptionsprozessen unterscheidet man zwischen Kationenaustausch und Oberflächenkomplexierung.

---

[97] Wegen des Zusammenspiels der Einflüsse der verschiedenen geochemischen Parameter auf das Nahfeld und auf die Radionuklidrückhaltung im Wirtgestein, ist diese Beschreibung übergeordnet und deshalb bezüglich Nahfeld in Anhang A1.12 bis A1.14 und bezüglich Radionuklidrückhaltung im Wirtgestein in Anhang A1.11 bis A1.16 identisch. Vertiefende Informationen über den vorliegenden Indikator finden sich in Pearson et al. (2003) und Hummel et al. (2002).

Tab. A1.13-1: Einfluss der Porenwasserzusammensetzung auf das Nahfeld (Redox-Bedingungen).

	BE & HAA			**LMA & SMA**	
	Bentonit	**Stahlbehälter**	**Abfallmatrix**	**Zement**	**Bentonit/Sand**
pH/p_{CO2}	–	Beschleunigung der Korrosion bei tiefem pH	Glas: Beschleunigung der Korrosion bei pH-Werten > 10 (und evtl. < 4)	Leicht beschleunigte Degradation bei tiefem pH/ hohem p_{CO2}	–
Eh/Redox-Reaktionen	–	Oxidation durch O_2 NO_3^- (mikrobiell) SO_4^{2-} (mikrobiell)	UO_2: oxidative Auflösung	–	–
Salinität (Ionenstärke):					
sehr tief	Auswaschen/ Kolloidbildung	–	–	–	Auswaschen/ Kolloidbildung
sehr hoch	(Verlust der Quellfähigkeit, falls Trockendichte < 0.9 Mg/m^3)	Beschleunigung der Korrosion durch Cl^-	Glas: Wasserinhaltsstoffe, wie z.B. Mg^{2+}, können Korrosion beschleunigen		Erhöhung der hydraulischen Durchlässigkeit

Kationenaustausch:

Gesteinsbildende Minerale, wie z.B. Tonminerale, weisen negativ geladene Oberflächen auf. Letztere werden durch die Aufnahme von Kationen aus dem Porenwasser elektrisch neutralisiert. Solche Minerale binden auch positiv geladene Radionuklide, indem diese gegen die am Mineral gebundenen Kationen (Na^+, K^+, Ca^{2+} etc.) ausgetauscht werden. Die Kationenaustauschkapazität (CEC) eines Minerals entspricht der Anzahl der Ladungen, welche für den Austausch zur Verfügung stehen und ist deshalb ein Mass für die Fähigkeit, Kationen nach diesem Sorptionsmechanismus zu binden. Der Kationenaustauschmechanismus ist charakterisiert durch seine Unabhängigkeit vom pH-Wert und seine starke Abhängigkeit von der Art der Ionen im Porenwasser und generell von der Ionenstärke. Mit zunehmender Ionenstärke wächst die Konkurrenz um die Austauschplätze der Minerale, d.h., die Sorption von Radionukliden, welche mittels Kationenaustausch sorbieren, sinkt. Als gegenläufiger Trend bezüglich Radionuklid-Mobilität wird zumindest in Opalinuston für Kationen eine Abnahme der effektiven Diffusivität mit zunehmender Ionenstärke beobachtet. Die elektrische Doppelschicht an den geladenen Tonoberflächen scheint ein Haupttransportweg für Kationen zu sein, welcher mit zunehmender Ionenstärke enger wird (dünnere elektrische Doppelschicht).

Oberflächenkomplexierung:

Bei der Oberflächenkomplexierung werden Radionuklide durch chemische Bindung an aktiven Stellen der Mineraloberfläche sorbiert. Der Mechanismus zeichnet sich durch seine schwache Abhängigkeit von der Ionenstärke, aber seine starke pH-Abhängigkeit aus. Die Affinität von Anionen zu den Sorptionsstellen der Mineraloberfläche nimmt mit zunehmendem pH-Wert ab, diejenige von Kationen zu. Erfahrungsgemäss ist die Anzahl der Sorptionsstellen, und somit die Fähigkeit des Minerals, Radionuklide zu sorbieren, ungefähr proportional zur Mineraloberfläche und zur Kationenaustauschkapazität CEC.

Im Folgenden sind die Bereiche der für die Sorption von Radionukliden wichtigen Parameter "Oberfläche" und "Kationenaustauschkapazität" für Mineralgruppen aufgelistet.

Mineralgruppe	**Oberfläche**	**Kationenaustauschkapazität**
Tonminerale	gross	hoch
Glimmerminerale	mittel	hoch
Zeolithe	gross	hoch
Feldspäte und andere Silikate	klein	klein
Karbonate	sehr klein	sehr klein
Quarz	sehr klein	sehr klein
Aluminium-/Mangan-/Eisenoxide	klein bis mittel [1)]	klein
Sulfide	klein	klein
Sulfate und Halogenide	sehr klein	sehr klein

[1)] Eisen(III)oxy-hydroxide können zwar eine sehr grosse Oberfläche haben, kommen aber unter reduzierenden Bedingungen nicht vor.

Die Mineralgruppen sind in der Tabelle entsprechend ihrer Oberfläche und Kationenaustauschkapazität, d.h. nach ihrer Fähigkeit, Radionuklide zu sorbieren, geordnet. Zwar können gewisse Oxide und Sulfide bessere Sorptionseigenschaften besitzen als z.B. Quarz oder Karbonate, sind aber meist in so geringen Mengen vorhanden, dass sie nicht ins Gewicht fallen. Evaporite (Sulfate und Halogenide, meist als Anhydrit und Steinsalz vorhanden) eignen sich als Wirtgestein nur, wenn sie einen Einschluss gewährleisten, wenn also die geochemischen Eigenschaften keine Rolle spielen.

Die Elemente U, Pu, Np, Tc sind in ihren tiefsten erreichbaren Oxidationsstufen am wenigsten mobil, reduzierende Bedingungen sind also von Vorteil. Dies gilt bedingt auch für Se; die Mobilität als Funktion der Oxidationsstufe ist bei diesem Element aber komplizierter.

Um die Rückhaltung der Radionuklide durch Sorption (K_d-Werte) für alle zu beurteilenden Wirtgesteine quantifizieren zu können, wurden von Bradbury et al. (2008) Sorptionsdatensätze für Tonsteine, kristallines Gestein und Calcit bei pH-Werten zwischen 6 und 9 und verschiedenen Ionenstärken hergeleitet.

Mikroorganismen katalysieren durch ihre Aktivität chemische Reaktionen. Vor allem die reduzierenden Bedingungen, welche in der Regel im Wirtgestein herrschen, werden vermutlich durch mikrobiologische Aktivität unterstützt. In Tonsteinen ist diese Aktivität oft wegen zu kleinen Poren und zu tiefer Wasseraktivität sehr niedrig. In Gesteinen mit grösseren Poren und

Klüften sind oft die für mikrobiologische Aktivität notwendigen Nährstoffen (z.B. degradierbare organische Stoffe) verbraucht oder von vornherein nur in kleinsten Mengen vorhanden, und/oder es fehlt ein Elektronenakzeptor wie Sauerstoff oder Sulfat. Sind in seltenen Fällen die Bedingungen für mikrobiologische Aktivität aber gut, so bilden sich Biofilme, welche die Sorption und Präzipitation von Radionukliden beeinflussen. Die Rückhaltung der Radionuklide kann dadurch grösser oder kleiner werden. Die Bildung von Biofilmen erhöht also die Ungewissheit.

Kolloide können Radionuklide transportieren und so deren Mobilität erhöhen. Kolloide spielen in geklüfteten Gesteinen mit advektivem Transport eine viel grössere Rolle als in Gesteinen mit diffusionskontrolliertem Transport. Bestehen die Kolloide aus Mineralen, so haben die Radionuklide zu diesen eine vergleichbare Affinität wie zur Gesteinsmatrix. Es braucht daher eine relativ hohe Kolloidkonzentration im Porenwasser, um eine wesentliche Erhöhung der Radionuklidmobilität zu bewirken, es sei denn, die Radionuklide werden irreversibel an die Kolloide gebunden (und werden nicht filtriert). Im Porenwasser gelöste Ionen destabilisieren Kolloide durch Ladungsneutralisierung; kleine Ionenstärken begünstigen also die Kolloidmobilität. Kolloide können auch aus organischem Material wie Huminstoffen bestehen, welche die Radionuklidmobilität erhöhen (Glaus et al. 1997). Nur aus Aktinidverbindungen bestehende Kolloide verlassen bei geeigneten technischen Barrieren das Nahfeld nicht.

Die durch ein geologisches Tiefenlager verursachte Dosis wird in den allermeisten Fällen durch Radionuklide bestimmt, welche in den technischen und geologischen Barrieren chemisch nicht zurückgehalten werden. Solche mobile Radionuklide, z.B. ^{129}I, ^{79}Se, $^{14}C_{org}$ und ^{36}Cl, sind im Nahfeld nicht löslichkeitslimitiert und sorbieren im Nahfeld und im Wirtgestein nicht oder nur sehr schwach. Die dosisdominierende Rolle dieser Radionuklide steht in grossem Kontrast zu ihrem kleinen Anteil am gesamten radioaktiven Inventar resp. zu ihrer vergleichsweise geringen Radiotoxizität. Die übrigen Radionuklide tragen wesentlich weniger zur Dosis bei, weil sie im Nahfeld, aber auch in der Geosphäre (Wirtgestein) chemisch wirkungsvoll zurückgehalten werden.

Auf die Rückhaltung von nicht sorbierenden Radionukliden haben die geochemischen Bedingungen geringen Einfluss. Die Anforderungen an die geochemischen Bedingungen und Bewertungsskalen zielen auf die bezüglich Radiotoxizität überwiegenden, aber – abhängig von den chemischen Bedingungen – weniger mobilen Radionuklide, um deren Beitrag zur Dosis zu beschränken.

Die Rückhaltung der Radionuklide ist nicht nur chemischer Natur (Sorption), sondern hängt auch von den Transporteigenschaften des Wirtgesteins ab (vgl. auch Indikatoren 'Hydraulische Durchlässigkeit' sowie 'Art der Transportpfade und Ausbildung des Porenraums').

3. Erläuterung der Anforderungen und Bewertungsskalen

Der Indikator 'Redox-Bedingungen' fliesst in die Evaluation der Wirtgesteine in Schritt 4 und der Konfigurationen in Schritt 5 ein (s. oben). Für den Indikator werden eine Mindestanforderung (Schritt 5.1) und Bewertungsskalen (Schritte 4.3 und 5.3) festgelegt. Die Anforderungen und Bewertungsskalen für SMA und HAA sind identisch. Es werden keine verschärften Anforderungen verwendet.

- **Mindestanforderung für SMA und HAA** (Schritt 5.1) – Nach dem Verschluss des Lagers soll dieses und dessen Umgebung in einen reduzierenden Zustand übergehen (vgl. Mindestanforderung, Schritt 5.1); es sollten weder ungesättigte hydrologische Bedingungen herrschen, noch sollte O_2-haltiges Wasser infiltrieren. Neben einer schlechten Rückhaltung für Redox-sensitive Radionuklide beschleunigen oxidierende Bedingungen die Stahlkorrosion und Brennelementauflösung (vgl. Tab. A1.13-1).
- **Bewertungsskalen für SMA und HAA** (Schritte 4.3 und 5.3) – Nachhaltige reduzierende Bedingungen werden durch die Anwesenheit von puffernden Mineralen (s. auch Indikator 'Mineralogie') erreicht. Dies wird als *sehr günstig* taxiert. Die Bedingungen sind nur *bedingt günstig*, wenn zwar anoxische Verhältnisse herrschen, das Redox-Potenzial aber nicht durch Minerale gepuffert ist. Ähnlich hohe Redox-Potenziale wie Sauerstoff kann Nitrat, mikrobiologisch katalysiert, bewirken; eine erhöhte Konzentration von Nitrat im Porenwasser wird als *ungünstig* taxiert.

A1.14 Salinität

Festlegung der Anforderungen und Bewertungsskalen

Schritt/ Kriterium	Attribut	Anforderungen und Bewertungsskalen	
		SMA	**HAA**
4.3/1.3	Sehr günstig	Ionenstärke 0.005 – 0.01 Mol/L	
	Günstig	Ionenstärke 0.01 – 0.7 Mol/L	
	Bedingt günstig	–	
	Ungünstig	Ionenstärke < 0.005 oder > 0.7 Mol/L	
5.3/1.3	Bewertungs-skala	Bewertungsstufen wie in Schritt 4.3/Kriterium 1.3	

Hintergrundinformationen

1. Relevanz für Langzeitsicherheit bzw. bautechnische Machbarkeit

Der vorliegende Indikator dient der Beurteilung der Einflüsse der Salinität im Wirtgestein bzw. einschlusswirksamen Gebirgsbereich auf die Langzeitsicherheit der geologischen Tiefenlager. Die Salinität beeinflusst:

- die Dauerhaftigkeit und somit das Langzeitverhalten der folgenden Nahfeldkomponenten: Abfallmatrix, Endlagerbehälter (z.B. Stahlbehälter), Bentonit (einschliesslich Bentonit/ Sand-Gemische)
- die Rückhaltung und die Transporteigenschaften der Radionuklide in den technischen und geologischen Barrieren

Relevante Sicherheitsfunktionen:	Einschluss Verzögerte Freisetzung Rückhaltung Kleine Freisetzungsraten
Relevante Elemente des Barrierensystems:	Abfallmatrix Endlagerbehälter Verfüllung & Versiegelung WG/EG
Sicherheitsrelevante Eigenschaften:	Korrosionsbeständigkeit der Abfallmatrix und der Endlagerbehälter Stabilität der Verfüll- und Versiegelungs-materialien Radionuklid-Rückhaltung im degradierten Endlagerbehälter (Korrosionsprodukte), in der Verfüllung/Versiegelung und im WG/EG

2. Beschreibung und zugehörige Grundlagen[98]

Die geochemischen Bedingungen im Wirtgestein werden anhand der folgenden Parameter beurteilt:

- Mineralogie, d.h. die in einem Gestein vorkommenden Mineralien;
- Porenwasserzusammensetzung charakterisiert durch:
  - pH/p_{CO2}, pH-Wert mit dem damit gekoppelten Karbonatsystem
  - Eh, Redox-Eigenschaften (reduzierend, oxidierend)
  - Salinität (bzw. Ionenstärke)
- Mikrobielle Prozesse
- Kolloide

Einfluss der Porenwasserzusammensetzung auf das Nahfeld

Das Porenwasser im Nahfeld eines Lagers für hochaktive Abfälle und abgebrannte Brennelemente wird durch den Bentonit, dasjenige im LMA- und SMA-Nahfeld durch Zement gepuffert. Die geochemischen Bedingungen im Nahfeld sind also gegen Einflüsse der Geosphäre stabilisiert. Trotzdem wird das Porenwasser des Wirtgesteins vor allem über längere Zeiträume die chemischen und physikalischen Prozesse im Nahfeld beeinflussen. Solche Einflüsse sind in Tab. A1.14-1 zusammengestellt.

Einfluss der geochemischen Bedingungen auf die chemische Radionuklidrückhaltung in der Geosphäre

Die Rückhaltung von Radionukliden durch das Gestein wird in der Regel mit Sorptionsmechanismen beschrieben (vgl. detaillierte Diskussion in Bradbury et al. 2008). Damit wird diese Rückhaltung tendenziell unterschätzt weil in der Folge einer Sorption oft weitere Prozesse wie Oberflächenpräzipitation und die Bildung von Mischphasen ablaufen. Bei den Sorptionsprozessen unterscheidet man zwischen Kationenaustausch und Oberflächenkomplexierung.

---

[98] Wegen des Zusammenspiels der Einflüsse der verschiedenen geochemischen Parameter auf das Nahfeld und auf die Radionuklidrückhaltung im Wirtgestein, ist diese Beschreibung übergeordnet und deshalb bezüglich Nahfeld in Anhang A1.12 bis A1.14 und bezüglich Radionuklidrückhaltung im Wirtgestein in Anhang A1.11 bis A1.16 identisch. Vertiefende Informationen über den vorliegenden Indikator finden sich in Bradbury & Baeyens (2000), Glaus et al. (2007) und Van Loon et al. (2007).

Tab. A1.14-1: Einfluss der Porenwasserzusammensetzung auf das Nahfeld (Salinität).

	BE & HAA			**LMA & SMA**	
	Bentonit	**Stahlbehälter**	**Abfallmatrix**	**Zement**	**Bentonit/Sand**
pH/p_{CO2}	–	Beschleunigung der Korrosion bei tiefem pH	Glas: Beschleunigung der Korrosion bei pH-Werten > 10 (und evtl. < 4)	Leicht beschleunigte Degradation bei tiefem pH/ hohem p_{CO2}	–
Eh/Redox-Reaktionen	–	Oxidation durch O_2 NO_3^- (mikrobiell) SO_4^{2-} (mikrobiell)	UO_2: oxidative Auflösung	–	–
Salinität (Ionenstärke): sehr tief sehr hoch	Auswaschen/ Kolloidbildung (Verlust der Quellfähigkeit, falls Trockendichte < 0.9 Mg/m^3)	– Beschleunigung der Korrosion durch Cl^-	– Glas: Wasserinhaltsstoffe, wie z.B. Mg^{2+}, können Korrosion beschleunigen	–	Auswaschen/ Kolloidbildung Erhöhung der hydraulischen Durchlässigkeit

Kationenaustausch:

Gesteinsbildende Minerale, wie z.B. Tonminerale, weisen negativ geladene Oberflächen auf. Letztere werden durch die Aufnahme von Kationen aus dem Porenwasser elektrisch neutralisiert. Solche Minerale binden auch positiv geladene Radionuklide, indem diese gegen die am Mineral gebundenen Kationen (Na^+, K^+, Ca^{2+} etc.) ausgetauscht werden. Die Kationenaustauschkapazität (CEC) eines Minerals entspricht der Anzahl der Ladungen, welche für den Austausch zur Verfügung stehen und ist deshalb ein Mass für die Fähigkeit, Kationen nach diesem Sorptionsmechanismus zu binden. Der Kationenaustauschmechanismus ist charakterisiert durch seine Unabhängigkeit vom pH-Wert und seine starke Abhängigkeit von der Art der Ionen im Porenwasser und generell von der Ionenstärke. Mit zunehmender Ionenstärke wächst die Konkurrenz um die Austauschplätze der Minerale, d.h., die Sorption von Radionukliden, welche mittels Kationenaustausch sorbieren, sinkt. Als gegenläufiger Trend bezüglich Radionuklid-Mobilität wird zumindest in Opalinuston für Kationen eine Abnahme der effektiven Diffusivität mit zunehmender Ionenstärke beobachtet. Die elektrische Doppelschicht an den geladenen Tonoberflächen scheint ein Haupttransportweg für Kationen zu sein, welcher mit zunehmender Ionenstärke enger wird (dünnere elektrische Doppelschicht).

Oberflächenkomplexierung:

Bei der Oberflächenkomplexierung werden Radionuklide durch chemische Bindung an aktiven Stellen der Mineraloberfläche sorbiert. Der Mechanismus zeichnet sich durch seine schwache Abhängigkeit von der Ionenstärke, aber seine starke pH-Abhängigkeit aus. Die Affinität von Anionen zu den Sorptionsstellen der Mineraloberfläche nimmt mit zunehmendem pH-Wert ab, diejenige von Kationen zu. Erfahrungsgemäss ist die Anzahl der Sorptionsstellen, und somit die Fähigkeit des Minerals, Radionuklide zu sorbieren, ungefähr proportional zur Mineraloberfläche und zur Kationenaustauschkapazität CEC.

Im Folgenden sind die Bereiche der für die Sorption von Radionukliden wichtigen Parameter "Oberfläche" und "Kationenaustauschkapazität" für Mineralgruppen aufgelistet.

Mineralgruppe	**Oberfläche**	**Kationenaustauschkapazität**
Tonminerale	gross	hoch
Glimmerminerale	mittel	hoch
Zeolithe	gross	hoch
Feldspäte und andere Silikate	klein	klein
Karbonate	sehr klein	sehr klein
Quarz	sehr klein	sehr klein
Aluminium-/Mangan-/Eisenoxide	klein bis mittel [1)]	klein
Sulfide	klein	klein
Sulfate und Halogenide	sehr klein	sehr klein

[1)] Eisen(III)oxy-hydroxide können zwar eine sehr grosse Oberfläche haben, kommen aber unter reduzierenden Bedingungen nicht vor.

Die Mineralgruppen sind in der Tabelle entsprechend ihrer Oberfläche und Kationenaustauschkapazität, d.h. nach ihrer Fähigkeit, Radionuklide zu sorbieren, geordnet. Zwar können gewisse Oxide und Sulfide bessere Sorptionseigenschaften besitzen als z.B. Quarz oder Karbonate, sind aber meist in so geringen Mengen vorhanden, dass sie nicht ins Gewicht fallen. Evaporite (Sulfate und Halogenide, meist als Anhydrit und Steinsalz vorhanden) eignen sich als Wirtgestein nur, wenn sie einen Einschluss gewährleisten, wenn also die geochemischen Eigenschaften keine Rolle spielen.

Die Elemente U, Pu, Np, Tc sind in ihren tiefsten erreichbaren Oxidationsstufen am wenigsten mobil, reduzierende Bedingungen sind also von Vorteil. Dies gilt bedingt auch für Se; die Mobilität als Funktion der Oxidationsstufe ist bei diesem Element aber komplizierter.

Um die Rückhaltung der Radionuklide durch Sorption (K_d-Werte) für alle zu beurteilenden Wirtgesteine quantifizieren zu können, wurden von Bradbury et al. (2008) Sorptionsdatensätze für Tonsteine, kristallines Gestein und Calcit bei pH-Werten zwischen 6 und 9 und verschiedenen Ionenstärken hergeleitet.

Mikroorganismen katalysieren durch ihre Aktivität chemische Reaktionen. Vor allem die reduzierenden Bedingungen, welche in der Regel im Wirtgestein herrschen, werden vermutlich durch mikrobiologische Aktivität unterstützt. In Tonsteinen ist diese Aktivität oft wegen zu kleinen Poren und zu tiefer Wasseraktivität sehr niedrig. In Gesteinen mit grösseren Poren und

Klüften sind oft die für mikrobiologische Aktivität notwendigen Nährstoffen (z.B. degradierbare organische Stoffe) verbraucht oder von vornherein nur in kleinsten Mengen vorhanden, und/oder es fehlt ein Elektronenakzeptor wie Sauerstoff oder Sulfat. Sind in seltenen Fällen die Bedingungen für mikrobiologische Aktivität aber gut, so bilden sich Biofilme, welche die Sorption und Präzipitation von Radionukliden beeinflussen. Die Rückhaltung der Radionuklide kann dadurch grösser oder kleiner werden. Die Bildung von Biofilmen erhöht also die Ungewissheit.

Kolloide können Radionuklide transportieren und so deren Mobilität erhöhen. Kolloide spielen in geklüfteten Gesteinen mit advektivem Transport eine viel grössere Rolle als in Gesteinen mit diffusionskontrolliertem Transport. Bestehen die Kolloide aus Mineralen, so haben die Radionuklide zu diesen eine vergleichbare Affinität wie zur Gesteinsmatrix. Es braucht daher eine relativ hohe Kolloidkonzentration im Porenwasser, um eine wesentliche Erhöhung der Radionuklidmobilität zu bewirken, es sei denn, die Radionuklide werden irreversibel an die Kolloide gebunden (und werden nicht filtriert). Im Porenwasser gelöste Ionen destabilisieren Kolloide durch Ladungsneutralisierung; kleine Ionenstärken begünstigen also die Kolloidmobilität. Kolloide können auch aus organischem Material wie Huminstoffen bestehen, welche die Radionuklidmobilität erhöhen (Glaus et al. 1997). Nur aus Aktinidverbindungen bestehende Kolloide verlassen bei geeigneten technischen Barrieren das Nahfeld nicht.

Die durch ein geologisches Tiefenlager verursachte Dosis wird in den allermeisten Fällen durch Radionuklide bestimmt, welche in den technischen und geologischen Barrieren chemisch nicht zurückgehalten werden. Solche mobile Radionuklide, z.B. ^{129}I, ^{79}Se, $^{14}C_{org}$ und ^{36}Cl, sind im Nahfeld nicht löslichkeitslimitiert und sorbieren im Nahfeld und im Wirtgestein nicht oder nur sehr schwach. Die dosisdominierende Rolle dieser Radionuklide steht in grossem Kontrast zu ihrem kleinen Anteil am gesamten radioaktiven Inventar resp. zu ihrer vergleichsweise geringen Radiotoxizität. Die übrigen Radionuklide tragen wesentlich weniger zur Dosis bei, weil sie im Nahfeld, aber auch in der Geosphäre (Wirtgestein) chemisch wirkungsvoll zurückgehalten werden.

Auf die Rückhaltung von nicht sorbierenden Radionukliden haben die geochemischen Bedingungen geringen Einfluss. Die Anforderungen an die geochemischen Bedingungen und Bewertungsskalen zielen auf die bezüglich Radiotoxizität überwiegenden, aber – abhängig von den chemischen Bedingungen – weniger mobilen Radionuklide, um deren Beitrag zur Dosis zu beschränken.

Die Rückhaltung der Radionuklide ist nicht nur chemischer Natur (Sorption), sondern hängt auch von den Transporteigenschaften des Wirtgesteins ab (vgl. auch Indikatoren 'Hydraulische Durchlässigkeit' sowie 'Art der Transportpfade und Ausbildung des Porenraums').

3. Erläuterung der Anforderungen und Bewertungsskalen

Für den Indikator 'Salinität' werden Bewertungsskalen für die Schritte 4.3 und 5.3 festgelegt (s. oben). Die Bewertungsskalen für SMA und HAA werden als identisch angenommen. Es werden keine Mindestanforderungen und verschärfte Anforderungen verwendet.

- **Bewertungsskalen für SMA und HAA** (Schritte 4.3 und 5.3) – Bei sehr tiefen Ionenstärken ($I < 0.005$ Mol/L) werden Kolloide im Porenwasser stabilisiert. An Kolloiden sorbierte Nuklide können so mobilisiert werden (s. auch Indikator 'Kolloide'). Bentonit-Barrieren (BE/HAA-Lagerstollen, Versiegelungen) können durch Kolloidbildung bei Ionenstärken $I < 0.005$ Mol/L erodiert werden, insbesondere bei kleinen Konzentrationen an Ca^{2+} oder anderen divalenten Kationen (Liu und Neretnieks 2006). Eine sehr tiefe Salinität wird daher

als *ungünstig* taxiert. Bei Gesteinen, bei welchen der Transport diffusionskontrolliert ist, spielt die Kolloidstabilisierung eine kleine Rolle, da nur Kolloide kleiner als die Poren mobil sind.

Eine sehr hohe Ionenstärke (I > 0.7 Mol/L, etwa die Ionenstärke von Meerwasser) muss als *ungünstig* taxiert werden. Durch hohe Ionenstärken kann die Quellfähigkeit von Bentonit reduziert und dessen hydraulische Durchlässigkeit erhöht werden (Dixon 2000). Die Quellfähigkeit ist vor allem für die Bentonit-Verfüllung in einem HAA-Lager sehr wichtig; ein Einfluss hoher Ionenstärke wird aber nur für Trockendichten unter 0.9 Mg/m^3 beobachtet.

Quellfähigkeit und hydraulische Durchlässigkeit von Bentonit-Sand-Verfüllungen mit kleinem Kompaktierungsgrad werden schon ab tieferen Ionenstärken beeinflusst. Solche Bentonit-Sand-Mischungen können für die Verfüllung von (Teilen der) untertägigen Bauwerke sowohl bei SMA- als auch bei HAA-Lagern verwendet werden. Die Anforderungen an solche Verfüllungen sind noch nicht spezifiziert; sicher ist eine kleine hydraulische Durchlässigkeit (s. Tab. A1.14-1) wichtig, eventuell aber auch ein minimaler Quelldruck. Es wird hier davon ausgegangen, dass die Anforderungen nicht höher liegen als für Verfüllmaterial, welches im finnischen oder schwedischen Konzept für die Stollen über den Brennelement-Schächten zur Anwendung kommen soll. Bis zur Höhe der Meerwassersalinität (Ionenstärke ca. 0.7 Mol/L) scheint dies technisch machbar zu sein (z.B. durch Variation der Zusammensetzung des Verfüllmaterials, s. z.B. Johannesson & Nilsson 2006), so dass Salzgehalte bis zu einer Meerwassersalinität als *günstig* taxiert werden. Bezüglich solcher Bentonit-Sand-Verfüllungen sind Wirtgesteine umso vorteilhafter, je tiefer die Salinität ihrer Porenwässer ist.

Hohe Chlorid-Gehalte können die Korrosion der Endlagerbehälter beschleunigen.

Ionenstärken unter 0.1 Mol/L sind für Radionuklide, welche mittels Kationenaustausch sorbieren, bezüglich Retention *sehr günstig*.

A1.15 Mikrobielle Prozesse

Festlegung der Anforderungen und Bewertungsskalen

Schritt/ Kriterium	Attribut	Anforderungen und Bewertungsskalen	
		SMA	**HAA**
4.3/1.3	Günstig bis sehr günstig (graduelle Abstufung)	Ungünstige Bedingungen für hohe mikrobiologische Aktivität, d.h. Poren wesentlich kleiner als 1 μm, keine offenen Klüfte und ein knappes Nährstoffangebot	
	Bedingt günstig	Grössere Poren (μm bis mm) oder Klüfte und hohes Nährstoffangebot inkl. Elektronenakzeptor (z.B. Sulfat)	
	Ungünstig	–	
5.3/1.3	Bewertungs-skala	Bewertungsstufen wie in Schritt 4.3/Kriterium 1.3	

Hintergrundinformationen

1. Relevanz für Langzeitsicherheit bzw. bautechnische Machbarkeit

Der vorliegende Indikator dient der Beurteilung der Einflüsse von mikrobiellen Prozessen im Wirtgestein bzw. einschlusswirksamen Gebirgsbereich auf die Langzeitsicherheit der geologischen Tiefenlager. Diese mikrobiellen Prozesse beeinflussen die Rückhaltung und die Transporteigenschaften der Radionuklide in den geologischen Barrieren.

Relevante Sicherheitsfunktionen:	Rückhaltung Kleine Freisetzungsraten
Relevante Elemente des Barrierensystems:	WG/EG
Sicherheitsrelevante Eigenschaften:	Rückhaltung durch Sorption, beeinflusst durch mikrobielle Prozesse

2. Beschreibung und zugehörige Grundlagen[99]

Die geochemischen Bedingungen im Wirtgestein werden anhand der folgenden Parameter beurteilt:

- Mineralogie, d.h. die in einem Gestein vorkommenden Mineralien
- Porenwasserzusammensetzung charakterisiert durch:
  - pH/p_{CO2}, pH-Wert mit dem damit gekoppelten Karbonatsystem
  - Eh, Redox-Eigenschaften (reduzierend, oxidierend)
  - Salinität (bzw. Ionenstärke)
- Mikrobielle Prozesse
- Kolloide

Einfluss der geochemischen Bedingungen auf die chemische Radionuklidrückhaltung in der Geosphäre

Die Rückhaltung von Radionukliden durch das Gestein wird in der Regel mit Sorptionsmechanismen beschrieben (vgl. detaillierte Diskussion in Bradbury et al. 2008). Damit wird diese Rückhaltung tendenziell unterschätzt weil in der Folge einer Sorption oft weitere Prozesse wie Oberflächenpräzipitation und die Bildung von Mischphasen ablaufen. Bei den Sorptionsprozessen unterscheidet man zwischen Kationenaustausch und Oberflächenkomplexierung.

Kationenaustausch:

Gesteinsbildende Minerale, wie z.B. Tonminerale, weisen negativ geladene Oberflächen auf. Letztere werden durch die Aufnahme von Kationen aus dem Porenwasser elektrisch neutralisiert. Solche Minerale binden auch positiv geladene Radionuklide, indem diese gegen die am Mineral gebundenen Kationen (Na^+, K^+, Ca^{2+} etc.) ausgetauscht werden. Die Kationenaustauschkapazität (CEC) eines Minerals entspricht der Anzahl der Ladungen, welche für den Austausch zur Verfügung stehen und ist deshalb ein Mass für die Fähigkeit, Kationen nach diesem Sorptionsmechanismus zu binden. Der Kationenaustauschmechanismus ist charakterisiert durch seine Unabhängigkeit vom pH-Wert und seine starke Abhängigkeit von der Art der Ionen im Porenwasser und generell von der Ionenstärke. Mit zunehmender Ionenstärke wächst die Konkurrenz um die Austauschplätze der Minerale, d.h., die Sorption von Radionukliden, welche mittels Kationenaustausch sorbieren, sinkt. Als gegenläufiger Trend bezüglich Radionuklid-Mobilität wird zumindest in Opalinuston für Kationen eine Abnahme der effektiven Diffusivität mit zunehmender Ionenstärke beobachtet. Die elektrische Doppelschicht an den geladenen Tonoberflächen scheint ein Haupttransportweg für Kationen zu sein, welcher mit zunehmender Ionenstärke enger wird (dünnere elektrische Doppelschicht).

Oberflächenkomplexierung:

Bei der Oberflächenkomplexierung werden Radionuklide durch chemische Bindung an aktiven Stellen der Mineraloberfläche sorbiert. Der Mechanismus zeichnet sich durch seine schwache Abhängigkeit von der Ionenstärke, aber seine starke pH-Abhängigkeit aus. Die Affinität von

---

[99] Wegen des Zusammenspiels der Einflüsse der verschiedenen geochemischen Parameter auf die Radionuklidrückhaltung im Wirtgestein ist diese Beschreibung übergeordnet und deshalb in Anhang A1.11 bis A1.16 identisch. Vertiefende Informationen über den vorliegenden Indikator finden sich in Stroes-Gascoyne et al. (2007) und Pedersen (2000).

Anionen zu den Sorptionsstellen der Mineraloberfläche nimmt mit zunehmendem pH-Wert ab, diejenige von Kationen zu. Erfahrungsgemäss ist die Anzahl der Sorptionsstellen, und somit die Fähigkeit des Minerals, Radionuklide zu sorbieren, ungefähr proportional zur Mineraloberfläche und zur Kationenaustauschkapazität CEC.

Im Folgenden sind die Bereiche der für die Sorption von Radionukliden wichtigen Parameter "Oberfläche" und "Kationenaustauschkapazität" für Mineralgruppen aufgelistet.

Mineralgruppe	**Oberfläche**	**Kationenaustauschkapazität**
Tonminerale	gross	hoch
Glimmerminerale	mittel	hoch
Zeolithe	gross	hoch
Feldspäte und andere Silikate	klein	klein
Karbonate	sehr klein	sehr klein
Quarz	sehr klein	sehr klein
Aluminium-/Mangan-/Eisenoxide	klein bis mittel [1)]	klein
Sulfide	klein	klein
Sulfate und Halogenide	sehr klein	sehr klein

[1)] Eisen(III)oxy-hydroxide können zwar eine sehr grosse Oberfläche haben, kommen aber unter reduzierenden Bedingungen nicht vor.

Die Mineralgruppen sind in der Tabelle entsprechend ihrer Oberfläche und Kationenaustauschkapazität, d.h. nach ihrer Fähigkeit, Radionuklide zu sorbieren, geordnet. Zwar können gewisse Oxide und Sulfide bessere Sorptionseigenschaften besitzen als z.B. Quarz oder Karbonate, sind aber meist in so geringen Mengen vorhanden, dass sie nicht ins Gewicht fallen. Evaporite (Sulfate und Halogenide, meist als Anhydrit und Steinsalz vorhanden) eignen sich als Wirtgestein nur, wenn sie einen Einschluss gewährleisten, wenn also die geochemischen Eigenschaften keine Rolle spielen.

Die Elemente U, Pu, Np, Tc sind in ihren tiefsten erreichbaren Oxidationsstufen am wenigsten mobil, reduzierende Bedingungen sind also von Vorteil. Dies gilt bedingt auch für Se; die Mobilität als Funktion der Oxidationsstufe ist bei diesem Element aber komplizierter.

Um die Rückhaltung der Radionuklide durch Sorption (K_d-Werte) für alle zu beurteilenden Wirtgesteine quantifizieren zu können, wurden von Bradbury et al. (2008) Sorptionsdatensätze für Tonsteine, kristallines Gestein und Calcit bei pH-Werten zwischen 6 und 9 und verschiedenen Ionenstärken hergeleitet.

Mikroorganismen katalysieren durch ihre Aktivität chemische Reaktionen. Vor allem die reduzierenden Bedingungen, welche in der Regel im Wirtgestein herrschen, werden vermutlich durch mikrobiologische Aktivität unterstützt. In Tonsteinen ist diese Aktivität oft wegen zu kleinen Poren und zu tiefer Wasseraktivität sehr niedrig. In Gesteinen mit grösseren Poren und Klüften sind oft die für mikrobiologische Aktivität notwendigen Nährstoffen (z.B. degradierbare organische Stoffe) verbraucht oder von vornherein nur in kleinsten Mengen vorhanden, und/oder es fehlt ein Elektronenakzeptor wie Sauerstoff oder Sulfat. Sind in seltenen Fällen die

Bedingungen für mikrobiologische Aktivität aber gut, so bilden sich Biofilme, welche die Sorption und Präzipitation von Radionukliden beeinflussen. Die Rückhaltung der Radionuklide kann dadurch grösser oder kleiner werden. Die Bildung von Biofilmen erhöht also die Ungewissheit.

Kolloide können Radionuklide transportieren und so deren Mobilität erhöhen. Kolloide spielen in geklüfteten Gesteinen mit advektivem Transport eine viel grössere Rolle als in Gesteinen mit diffusionskontrolliertem Transport. Bestehen die Kolloide aus Mineralen, so haben die Radionuklide zu diesen eine vergleichbare Affinität wie zur Gesteinsmatrix. Es braucht daher eine relativ hohe Kolloidkonzentration im Porenwasser, um eine wesentliche Erhöhung der Radionuklidmobilität zu bewirken, es sei denn, die Radionuklide werden irreversibel an die Kolloide gebunden (und werden nicht filtriert). Im Porenwasser gelöste Ionen destabilisieren Kolloide durch Ladungsneutralisierung; kleine Ionenstärken begünstigen also die Kolloidmobilität. Kolloide können auch aus organischem Material wie Huminstoffen bestehen, welche die Radionuklidmobilität erhöhen (Glaus et al. 1997). Nur aus Aktinidverbindungen bestehende Kolloide verlassen bei geeigneten technischen Barrieren das Nahfeld nicht.

Die durch ein geologisches Tiefenlager verursachte Dosis wird in den allermeisten Fällen durch Radionuklide bestimmt, welche in den technischen und geologischen Barrieren chemisch nicht zurückgehalten werden. Solche mobile Radionuklide, z.B. ^{129}I, ^{79}Se, $^{14}C_{org}$ und ^{36}Cl, sind im Nahfeld nicht löslichkeitslimitiert und sorbieren im Nahfeld und im Wirtgestein nicht oder nur sehr schwach. Die dosisdominierende Rolle dieser Radionuklide steht in grossem Kontrast zu ihrem kleinen Anteil am gesamten radioaktiven Inventar resp. zu ihrer vergleichsweise geringen Radiotoxizität. Die übrigen Radionuklide tragen wesentlich weniger zur Dosis bei, weil sie im Nahfeld, aber auch in der Geosphäre (Wirtgestein) chemisch wirkungsvoll zurückgehalten werden.

Auf die Rückhaltung von nicht sorbierenden Radionukliden haben die geochemischen Bedingungen geringen Einfluss. Die Anforderungen an die geochemischen Bedingungen und Bewertungsskalen zielen auf die bezüglich Radiotoxizität überwiegenden, aber – abhängig von den chemischen Bedingungen – weniger mobilen Radionuklide, um deren Beitrag zur Dosis zu beschränken.

Die Rückhaltung der Radionuklide ist nicht nur chemischer Natur (Sorption), sondern hängt auch von den Transporteigenschaften des Wirtgesteins ab (vgl. auch Indikatoren 'Hydraulische Durchlässigkeit' sowie 'Art der Transportpfade und Ausbildung des Porenraums').

3. Erläuterung der Anforderungen und Bewertungsskalen

Für den Indikator 'Mikrobielle Prozesse' werden Bewertungsskalen für die Schritte 4.3 und 5.3 festgelegt (s. oben). Die Bewertungsskalen für SMA und HAA werden als identisch angenommen. Es werden keine Mindestanforderungen und verschärfte Anforderungen verwendet.

- **Bewertungsskalen für SMA und HAA** (Schritte 4.3 und 5.3) – Bedingungen, die eine hohe mikrobiologische Aktivität erlauben, werden wegen der damit verbundenen hohen Ungewissheit als *bedingt günstig* taxiert. Wirtgesteinen gibt man das Attribut *günstig* bis *sehr günstig* abhängig davon, ob neben einem knappen Nährstoffangebot die Poren so eng sind (wesentlich kleiner als 1 μm), dass eine mikrobiologische Aktivität praktisch unterbunden ist, oder ob grössere Hohlräume, wie Klüfte, längerfristig vorhanden sein könnten. Durch den Lagerbau induzierte mikrobiologische Aktivität im Nahfeld wird hier nicht beurteilt; diese muss mit technischen Massnahmen unter Kontrolle gehalten werden.

A1.16 Kolloide

Festlegung der Anforderungen und Bewertungsskalen

Schritt/ Kriterium	Attribut	Anforderungen und Bewertungsskalen	
		SMA	**HAA**
4.3/1.3	Sehr günstig	Kolloide sind immobil (Filtration) und Ionenstärke > 0.005 Mol/L (geringe Kolloidstabilität)	
	Günstig	Graduelle Abstufung zwischen *sehr günstig* und *bedingt günstig*	
	Bedingt günstig	**S**chlechte Kolloidfiltration und kleine Huminstoffkonzentrationen im Porenwasser (10^{-6} – 10^{-4} g/L)	
	Ungünstig	**S**chlechte Kolloidfiltration und Ionenstärke < 0.005 Mol/L (hohe Kolloidstabilität), Huminstoffe im Porenwasser > 10^{-4} g/L	
5.3/1.3	Bewertungs-skala	Bewertungsstufen wie in Schritt 4.3/Kriterium 1.3	

Hintergrundinformationen

1. Relevanz für Langzeitsicherheit bzw. bautechnische Machbarkeit

Der vorliegende Indikator dient der Beurteilung der Einflüsse von Kolloiden im Wirtgestein bzw. einschlusswirksamen Gebirgsbereich auf die Langzeitsicherheit der geologischen Tiefenlager. Kolloide beeinflussen die Rückhaltung und die Transporteigenschaften der Radionuklide in den technischen und geologischen Barrieren.

Relevante Sicherheitsfunktionen:	Rückhaltung Kleine Freisetzungsraten
Relevante Elemente des Barrierensystems:	WG/EG
Sicherheitsrelevante Eigenschaften:	Rückhaltung durch Sorption, beeinflusst durch Kolloide

2. Beschreibung und zugehörige Grundlagen[100]

Die geochemischen Bedingungen im Wirtgestein werden anhand der folgenden Parameter beurteilt:

- Mineralogie, d.h. die in einem Gestein vorkommenden Mineralien
- Porenwasserzusammensetzung charakterisiert durch:
  - pH/p_{CO2}, pH-Wert mit dem damit gekoppelten Karbonatsystem
  - Eh, Redox-Eigenschaften (reduzierend, oxidierend)
  - Salinität (bzw. Ionenstärke)
- Mikrobielle Prozesse
- Kolloide

Einfluss der geochemischen Bedingungen auf die chemische Radionuklidrückhaltung in der Geosphäre

Die Rückhaltung von Radionukliden durch das Gestein wird in der Regel mit Sorptionsmechanismen beschrieben (vgl. detaillierte Diskussion in Bradbury et al. 2008). Damit wird diese Rückhaltung tendenziell unterschätzt weil in der Folge einer Sorption oft weitere Prozesse wie Oberflächenpräzipitation und die Bildung von Mischphasen ablaufen. Bei den Sorptionsprozessen unterscheidet man zwischen Kationenaustausch und Oberflächenkomplexierung.

Kationenaustausch:

Gesteinsbildende Minerale, wie z.B. Tonminerale, weisen negativ geladene Oberflächen auf. Letztere werden durch die Aufnahme von Kationen aus dem Porenwasser elektrisch neutralisiert. Solche Minerale binden auch positiv geladene Radionuklide, indem diese gegen die am Mineral gebundenen Kationen (Na^+, K^+, Ca^{2+} etc.) ausgetauscht werden. Die Kationenaustauschkapazität (CEC) eines Minerals entspricht der Anzahl der Ladungen, welche für den Austausch zur Verfügung stehen und ist deshalb ein Mass für die Fähigkeit, Kationen nach diesem Sorptionsmechanismus zu binden. Der Kationenaustauschmechanismus ist charakterisiert durch seine Unabhängigkeit vom pH-Wert und seine starke Abhängigkeit von der Art der Ionen im Porenwasser und generell von der Ionenstärke. Mit zunehmender Ionenstärke wächst die Konkurrenz um die Austauschplätze der Minerale, d.h., die Sorption von Radionukliden, welche mittels Kationenaustausch sorbieren, sinkt. Als gegenläufiger Trend bezüglich Radionuklid-Mobilität wird zumindest in Opalinuston für Kationen eine Abnahme der effektiven Diffusivität mit zunehmender Ionenstärke beobachtet. Die elektrische Doppelschicht an den geladenen Tonoberflächen scheint ein Haupttransportweg für Kationen zu sein, welcher mit zunehmender Ionenstärke enger wird (dünnere elektrische Doppelschicht).

Oberflächenkomplexierung:

Bei der Oberflächenkomplexierung werden Radionuklide durch chemische Bindung an aktiven Stellen der Mineraloberfläche sorbiert. Der Mechanismus zeichnet sich durch seine schwache Abhängigkeit von der Ionenstärke, aber seine starke pH-Abhängigkeit aus. Die Affinität von

[100] Wegen des Zusammenspiels der Einflüsse der verschiedenen geochemischen Parameter auf die Radionuklidrückhaltung im Wirtgestein ist diese Beschreibung übergeordnet und deshalb in Anhang A1.11 bis A1.16 identisch. Vertiefende Informationen über den vorliegenden Indikator finden sich in Voegelin & Kretzschmar (2002) und Kosakowski (2004).

Anionen zu den Sorptionsstellen der Mineraloberfläche nimmt mit zunehmendem pH-Wert ab, diejenige von Kationen zu. Erfahrungsgemäss ist die Anzahl der Sorptionsstellen, und somit die Fähigkeit des Minerals, Radionuklide zu sorbieren, ungefähr proportional zur Mineraloberfläche und zur Kationenaustauschkapazität CEC.

Im Folgenden sind die Bereiche der für die Sorption von Radionukliden wichtigen Parameter "Oberfläche" und "Kationenaustauschkapazität" für Mineralgruppen aufgelistet.

Mineralgruppe	**Oberfläche**	**Kationenaustauschkapazität**
Tonminerale	gross	hoch
Glimmerminerale	mittel	hoch
Zeolithe	gross	hoch
Feldspäte und andere Silikate	klein	klein
Karbonate	sehr klein	sehr klein
Quarz	sehr klein	sehr klein
Aluminium-/Mangan-/Eisenoxide	klein bis mittel [1)]	klein
Sulfide	klein	klein
Sulfate und Halogenide	sehr klein	sehr klein

[1)] Eisen(III)oxy-hydroxide können zwar eine sehr grosse Oberfläche haben, kommen aber unter reduzierenden Bedingungen nicht vor.

Die Mineralgruppen sind in der Tabelle entsprechend ihrer Oberfläche und Kationenaustauschkapazität, d.h. nach ihrer Fähigkeit, Radionuklide zu sorbieren, geordnet. Zwar können gewisse Oxide und Sulfide bessere Sorptionseigenschaften besitzen als z.B. Quarz oder Karbonate, sind aber meist in so geringen Mengen vorhanden, dass sie nicht ins Gewicht fallen. Evaporite (Sulfate und Halogenide, meist als Anhydrit und Steinsalz vorhanden) eignen sich als Wirtgestein nur, wenn sie einen Einschluss gewährleisten, wenn also die geochemischen Eigenschaften keine Rolle spielen.

Die Elemente U, Pu, Np, Tc sind in ihren tiefsten erreichbaren Oxidationsstufen am wenigsten mobil, reduzierende Bedingungen sind also von Vorteil. Dies gilt bedingt auch für Se; die Mobilität als Funktion der Oxidationsstufe ist bei diesem Element aber komplizierter.

Um die Rückhaltung der Radionuklide durch Sorption (K_d-Werte) für alle zu beurteilenden Wirtgesteine quantifizieren zu können, wurden von Bradbury et al. (2008) Sorptionsdatensätze für Tonsteine, kristallines Gestein und Calcit bei pH-Werten zwischen 6 und 9 und verschiedenen Ionenstärken hergeleitet.

Mikroorganismen katalysieren durch ihre Aktivität chemische Reaktionen. Vor allem die reduzierenden Bedingungen, welche in der Regel im Wirtgestein herrschen, werden vermutlich durch mikrobiologische Aktivität unterstützt. In Tonsteinen ist diese Aktivität oft wegen zu kleinen Poren und zu tiefer Wasseraktivität sehr niedrig. In Gesteinen mit grösseren Poren und Klüften sind oft die für mikrobiologische Aktivität notwendigen Nährstoffen (z.B. degradierbare organische Stoffe) verbraucht oder von vornherein nur in kleinsten Mengen vorhanden, und/oder es fehlt ein Elektronenakzeptor wie Sauerstoff oder Sulfat. Sind in seltenen Fällen die Bedingungen für mikrobiologische Aktivität aber gut, so bilden sich Biofilme, welche die Sorption und Präzipitation von Radionukliden beeinflussen. Die Rückhaltung der Radionuklide kann dadurch grösser oder kleiner werden. Die Bildung von Biofilmen erhöht also die Ungewissheit.

Kolloide können Radionuklide transportieren und so deren Mobilität erhöhen. Kolloide spielen in geklüfteten Gesteinen mit advektivem Transport eine viel grössere Rolle als in Gesteinen mit diffusionskontrolliertem Transport. Bestehen die Kolloide aus Mineralen, so haben die Radionuklide zu diesen eine vergleichbare Affinität wie zur Gesteinsmatrix. Es braucht daher eine relativ hohe Kolloidkonzentration im Porenwasser, um eine wesentliche Erhöhung der Radionuklidmobilität zu bewirken, es sei denn, die Radionuklide werden irreversibel an die Kolloide gebunden (und werden nicht filtriert). Im Porenwasser gelöste Ionen destabilisieren Kolloide durch Ladungsneutralisierung; kleine Ionenstärken begünstigen also die Kolloidmobilität. Kolloide können auch aus organischem Material wie Huminstoffen bestehen, welche die Radionuklidmobilität erhöhen (Glaus et al. 1997). Nur aus Aktinidverbindungen bestehende Kolloide verlassen bei geeigneten technischen Barrieren das Nahfeld nicht.

Die durch ein geologisches Tiefenlager verursachte Dosis wird in den allermeisten Fällen durch Radionuklide bestimmt, welche in den technischen und geologischen Barrieren chemisch nicht zurückgehalten werden. Solche mobile Radionuklide, z.B. ^{129}I, ^{79}Se, $^{14}C_{org}$ und ^{36}Cl, sind im Nahfeld nicht löslichkeitslimitiert und sorbieren im Nahfeld und im Wirtgestein nicht oder nur sehr schwach. Die dosisdominierende Rolle dieser Radionuklide steht in grossem Kontrast zu ihrem kleinen Anteil am gesamten radioaktiven Inventar resp. zu ihrer vergleichsweise geringen Radiotoxizität. Die übrigen Radionuklide tragen wesentlich weniger zur Dosis bei, weil sie im Nahfeld, aber auch in der Geosphäre (Wirtgestein) chemisch wirkungsvoll zurückgehalten werden.

Auf die Rückhaltung von nicht sorbierenden Radionukliden haben die geochemischen Bedingungen geringen Einfluss. Die Anforderungen an die geochemischen Bedingungen und Bewertungsskalen zielen auf die bezüglich Radiotoxizität überwiegenden, aber – abhängig von den chemischen Bedingungen – weniger mobilen Radionuklide, um deren Beitrag zur Dosis zu beschränken.

Die Rückhaltung der Radionuklide ist nicht nur chemischer Natur (Sorption), sondern hängt auch von den Transporteigenschaften des Wirtgesteins ab (vgl. auch Indikatoren 'Hydraulische Durchlässigkeit' sowie 'Art der Transportpfade und Ausbildung des Porenraums').

3. Erläuterung der Anforderungen und Bewertungsskalen

Für den Indikator 'Kolloide' werden Bewertungsskalen für die Schritte 4.3 und 5.3 festgelegt (s. oben). Die Bewertungsskalen für SMA und HAA werden als identisch angenommen. Es werden keine Mindestanforderungen und verschärfte Anforderungen verwendet.

- **Bewertungsskalen für SMA und HAA** (Schritte 4.3 und 5.3) – Kolloide werden bei sehr tiefer Ionenstärken ($I < 0.005$ Mol/L) im Porenwasser stabilisiert (vgl. auch Indikator 'Salinität'). Kolloide mobilisieren Radionuklide, wenn sie an den Gesteinsoberflächen schlecht zurückgehalten werden (Filtration), insbesondere wenn Radionuklide irreversibel an die Kolloide gebunden werden (*bedingt günstig*). Die Kolloidfiltration ist in diffusionsdominierten Wirtgesteinen in der Regel gewährleistet; Kolloide sind also immobil (Bewertung *günstig* bis *sehr günstig*). In geklüfteten Wirtgesteinen dagegen sollte die Kolloidkonzentration im Porenwasser möglichst klein sein. *Ungünstig* ist, wenn es sich bei mobilen (schlecht filtrierten) Kolloiden um Huminstoffe handelt, welche zu einigen Radionukliden, wie etwa dreiwertigen Aktiniden und Lanthaniden, eine hohe Affinität haben. Die Sorption der letzteren könnte sich bei über 0.1 mg/L mobiler Huminstoffe um bis zu einem Faktor 1000 verringern (Glaus et al. 1997). Die Anforderungen und Bewertungsskala werden für SMA und HAA, inkl. LMA, als identisch angenommen.

A1.17 Art der Transportpfade und Ausbildung des Porenraums

Festlegung der Anforderungen und Bewertungsskalen

Schritt/ Kriterium	Attribut	Anforderungen und Bewertungsskalen	
		SMA	**HAA**
4.3/1.4	Sehr günstig	(äquivalent) poröses Medium	
	Günstig	Wasserführung in Diskontinuitäten mit beschränktem Channeling und günstigen Bedingungen für Matrixdiffusion	
	Bedingt günstig	Wasserführung in Diskontinuitäten mit ausgeprägtem Channeling und mässigen Bedingungen für Matrixdiffusion	
	Ungünstig	Wasserführung in Diskontinuitäten mit ausgeprägtem Channeling und ungünstigen Bedingungen für Matrixdiffusion	
5.3/1.4	Bewertungs-skala	Bewertungsstufen wie in Schritt 4.3/Kriterium 1.4	

Hintergrundinformationen

1. Relevanz für Langzeitsicherheit bzw. bautechnische Machbarkeit

Der Indikator 'Art der Transportpfade und Ausbildung des Porenraums' beeinflusst das Transportverhalten von Radionukliden im Wirtgestein bzw. im einschlusswirksamen Gebirgsbereich. Von besonderer Bedeutung für die Langzeitsicherheit sind Kluftnetzwerke (mit oder ohne 'Channels'), die präferenzielle Freisetzungspfade für Radionuklide bilden können.

Relevante Sicherheitsfunktionen:	Rückhaltung Kleine Freisetzungsraten
Relevante Elemente des Barrierensystems:	WG/EG
Sicherheitsrelevante Eigenschaften:	Rückhaltung und kleine Freisetzungsraten dank günstigen Transporteigenschaften (Kluftsystem vs. äquivalent-poröses Medium)

2. Beschreibung und zugehörige Grundlagen

Der Indikator 'Art der Transportpfade und Ausbildung des Porenraums' dient der wirtgesteinsspezifischen Bewertung möglicher präferenzieller Freisetzungspfade. Primär wird unterschieden zwischen (äquivalent) porösem Medium und Kluftnetzwerken (kleinräumige Klüftung mit/ohne Matrixdiffusion). Die kleinräumige Klüftung des Wirtgesteins (Kluftabstände im Dezi- bis Dekameterbereich) beeinflusst das Rückhaltevermögen des Wirtgesteins. Bei den Festlegungen werden die Resultate von orientierenden Sicherheitsbetrachtungen sowie Erfahrungen aus früheren Sicherheitsanalysen für geklüftete und homogen-poröse Wirtgesteine (z.B. Nagra 1994a-b, Nagra 2002c-d) berücksichtigt.

Störungszonen mit Abständen von einigen Deka- bis einigen Hektometern, denen mit den Lagerkammern nicht ausgewichen werden kann und die somit den Wasserfluss durch die Lagerkammern und den Radionuklidtransport in den technischen und geologischen Barrieren mitbestimmen, werden separat durch den Indikator 'Transmissivität präferenzieller Freisetzungspfade' erfasst. Auslegungsbestimmenden Störungszonen wird bei der Platzierung der Lagerkammern ausgewichen (vgl. Indikator 'Platzangebot untertags'), während regionale Störungszonen bei der Bereichsbegrenzung gemieden werden (vgl. Indikator 'Abstand zu regionalen Störungszonen').

3. Erläuterung der Anforderungen und Bewertungsskalen

Der Indikator 'Art der Transportpfade und Ausbildung des Porenraums' fliesst in die Bewertung der bevorzugten Wirtgesteine in Schritt 4.3 und der bevorzugten Bereiche in Schritt 5.3 ein (s. oben). Die Bewertungsskalen für SMA und HAA sind identisch. Es werden keine Mindestanforderungen und verschärften Anforderungen an den Indikator gestellt.

- **Bewertungsskalen für SMA und HAA** (Schritte 4.3 und 5.3) – Bei der Festlegung der Bewertungsstufen werden die Resultate von orientierenden Sicherheitsbetrachtungen (Fig. A5.5-21 in Anhang 5) sowie Erfahrungen aus früheren Sicherheitsanalysen für homogen-poröse und geklüftete Wirtgesteine (z.B. Nagra 1994a-b, Nagra 2002c-d) berücksichtigt. Gemäss diesen Resultaten und Erfahrungen verringert sich das Radionuklidrückhaltevermögen der Geosphäre generell bei zunehmender Advektionsgeschwindigkeit sowie bei abnehmender Matrixdiffusion und Sorption. Als *sehr günstig* werden deshalb ungeklüftete Gesteine eingestuft. Solche Gesteine weisen einen grossen Transportquerschnitt mit häufig niedrigen bis sehr niedrigen Advektionsgeschwindigkeiten auf und gewährleisten eine sehr gute Barrierenwirkung. Als *günstig* werden geklüftete Gesteine eingestuft, in denen die Wasserführung entlang von Diskontinuitäten mit beschränktem 'Channeling' (beschränkte Advektionsgeschwindigkeiten) erfolgt und die günstige Bedingungen für die Matrixdiffusion von Radionukliden aufweisen. Geklüftete Gesteine, in denen die Wasserführung entlang von Diskontinuitäten mit ausgeprägtem Channeling (erhöhte Advektionsgeschwindigkeiten) erfolgt, werden als *bedingt günstig* (bzw. *ungünstig*) eingestuft, falls mässige (bzw. ungünstige) Bedingungen für die Matrixdiffusion von Radionukliden vorliegen. Diese Gesteine tragen nur in geringem Masse zur Radionuklidrückhaltung im gesamten Barrierensystem bei.

A1.18 Homogenität des Gesteinsaufbau

Festlegung der Anforderungen und Bewertungsskalen

Schritt/ Kriterium	Attribut	Anforderungen und Bewertungsskalen	
		SMA	**HAA**
4.2/1.4	Verschärfte Anforderung (VA)	–	Homogener Aufbau des Wirtgesteins; Wirtgestein enthält keine mehrere Meter mächtige und über hunderte von Metern ausgedehnte Elemente mit gegenüber dem restlichen Gestein klar reduzierten Barriereneigenschaften
4.3/1.4	Günstig bis sehr günstig (graduelle Abstufung)	VA für HAA erfüllt	Graduelle Abstufung bezogen auf V
	Ungünstig bis bedingt günstig (graduelle Abstufung)	VA für HAA nicht erfüllt	– [1)]
5.3/1.4	Bewertungs-skala	Bewertungsstufen wie in Schritt 4.3/Kriterium 1.4	

[1)] Diese Bewertungsstufen sind nicht erforderlich, da alle bewerteten Varianten die verschärften Anforderungen erfüllen müssen und damit als mindestens *günstig* beurteilt werden.

Hintergrundinformationen

1. Relevanz für Langzeitsicherheit bzw. bautechnische Machbarkeit

Der Indikator 'Homogenität des Gesteinsaufbaus' bezieht sich auf Elemente im Wirtgestein bzw. einschlusswirksamen Gebirgsbereich, die eine Mächtigkeit von einigen Metern und eine laterale Ausdehnung von Hunderten von Metern mit signifikant reduzierter Barrierenwirkung aufweisen. Solche Elemente schränken die Möglichkeiten zur vertikalen Platzierung der Lagerebene ein und wirken sich ungünstig auf die Länge der Freisetzungspfade sowie auf das Transportverhalten von Radionukliden im Wirtgestein bzw. im einschlusswirksamen Gebirgsbereich aus.

Relevante Sicherheitsfunktionen:	Rückhaltung Kleine Freisetzungsraten
Relevante Elemente des Barrierensystems:	WG/EG
Sicherheitsrelevante Eigenschaften:	Rückhaltung und kleine Freisetzungsraten dank günstigen Transporteigenschaften

2. Beschreibung und zugehörige Grundlagen

Beurteilt wird der grossräumige Aufbau des Wirtgesteins bzw. einschlusswirksamen Gebirgsbereichs, insbesondere bezüglich regional vorhandener Einschlüsse und Heterogenitäten (z.B. mehrere Meter mächtige Sandsteinlagen oder Kalkbänke). Die Anforderungen und Bewertungsskalen beziehen sich auf lithologische Elemente von einigen Metern Mächtigkeit und mit Hunderten von Metern lateraler Ausdehnung (Kontinuität) mit signifikant reduzierter Barrierenwirkung. Für das HAA-Lager werden nur Wirtgesteine weiter betrachtet, die in ihrer Barrierenwirkung auf grösserem Massstab homogen sind; dies entspricht auch den internationalen Gepflogenheiten für ein HAA-Lager.

Der Indikator 'Homogenität des Gesteinsaufbaus' ist mit den Indikatoren 'Mächtigkeit' und 'Länge der Freisetzungspfade' gekoppelt. Die Mächtigkeit betrifft primär die geologischen Verhältnisse, während die Transportpfadlänge und die Homogenität des Gesteinsaufbaus auch bautechnische Aspekte beinhalten (vertikale Platzierung der Lagerebene, Durchmesser der Lagerkammern und Auflockerungszone).

3. Erläuterung der Anforderungen und Bewertungsskalen

Für den Indikator 'Homogenität des Gesteinsaufbaus' wird im Falle des HAA-Lagers eine verschärfte Anforderung bzgl. der Homogenität des Gesteinsaufbaus im Wirtgestein in Schritt 4.2 verwendet. Er fliesst ferner in die Bewertung der bevorzugten Varianten für SMA und HAA i Schritt 4.3 und 5.3 ein (s. oben).

- **Verschärfte Anforderungen für HAA** (Schritt 4.2) – Für das HAA-Lager werden Wirtgesteine bevorzugt, deren Aufbau homogen ist, d.h. die keine mehrere Meter mächtige und über Hunderte von Metern ausgedehnte Elemente enthalten mit gegenüber dem restlichen Gestein klar reduzierten Barriereneigenschaften. Solche Elemente könnten die Auslegung der HAA-Lagerstollen erschweren und zu einer unerwünschten Verkürzung der Länge der Freisetzungspfade führen. Diese Anforderung steht in Übereinstimmung mit dem Vorgehen anderer Länder bezüglich der Auswahl von Wirtgesteinen für das HAA-Lager. An die Wirtgesteine für das SMA-Lager wird keine entsprechende verschärfte Anforderung gestellt, da vergleichsweise geringere Anforderungen an die Barrierenwirkung des Wirtgesteins gestellt werden.
- **Bewertungsskalen für SMA und HAA** (Schritte 4.3 und 5.3) – Für das SMA- und HAA-Lager wird die Homogenität des Gesteinsaufbaus als mindestens *günstig* eingestuft, wenn die verschärfte Anforderung für HAA erfüllt ist (graduelle Abstufung zwischen den Bewertungsstufen *günstig* und *sehr günstig*, je nach geologischen Verhältnissen). Als *ungünstig* bzw. *bedingt günstig* werden nur diejenigen Varianten für das SMA-Lager eingestuft, welche die verschärfte Anforderung für das HAA-Lager nicht erfüllen. Diese Bewertungsstufen entfallen für das HAA-Lager, da alle Varianten zumindest die verschärften Anforderungen erfüllen.

A1.19 Länge der Freisetzungspfade

Festlegung der Anforderungen und Bewertungsskalen

Schritt/ Kriterium	Attribut	Anforderungen und Bewertungsskalen	
		SMA	**HAA**
5.3/1.4		Beurteilung primär des vertikalen Transportpfads durch das Wirtgestein (WG) und die Rahmengesteine (RG; zusammen einschlusswirksamer Gebirgsbereich, EG), unter vereinfachter Berücksichtigung der vertikalen Ausdehnung der SMA-Lagerkammern (inkl. Auflockerungszone) von 20 m; bei allenfalls existierenden, horizontalen Fliesspfaden, welche die vertikale Transportdistanz reduzieren, wird deren Beitrag bewertet: Bei horizontalen Migrationsdistanzen im km-Bereich erfolgt kein Abzug, bei signifikant kleineren Migrationsdistanzen: Abzug	Wie bei Opalinuston für SMA, aber unter vereinfachter Berücksichtigung der vertikalen Ausdehnung der HAA-Lagerstollen (inkl. Auflockerungszone) von 5 m
	Sehr günstig	Opalinuston: ≥ 50 m im nutzbaren EG (WG + RG) Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger': ≥ 75 m im nutzbaren EG (WG + RG) Effinger Schichten und Mergel: ≥ 100 m im nutzbaren WG	
	Günstig	Opalinuston: ≥ 40 m im nutzbaren EG (WG + RG) Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger': ≥ 50 m im nutzbaren EG (WG + RG) Effinger Schichten und Mergel: ≥ 75 m im nutzbaren WG	
	Ungünstig bis bedingt günstig (graduelle Abstufung)	Opalinuston: < 40 m im nutzbaren EG (WG + RG) Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger': < 50 m im nutzbaren EG (WG + RG) Effinger Schichten und Mergel: < 75 m im nutzbaren WG	

Hintergrundinformationen

1. Relevanz für Langzeitsicherheit bzw. bautechnische Machbarkeit

Die Länge des Transportpfads hat einen massgeblichen Einfluss auf die Radionuklid-Freisetzung aus dem Tiefenlager, da ein grosser Teil der Radionuklide während ihres Transports durch das Wirtgestein und durch allenfalls vorhandene Rahmengesteine zerfällt.

Relevante Sicherheitsfunktionen:	Rückhaltung Kleine Freisetzungsraten
Relevante Elemente des Barrierensystems:	WG/EG
Sicherheitsrelevante Eigenschaften:	Transporteigenschaften der Freisetzungspfade (im Hinblick auf den Zerfall von Radionukliden)

2. Beschreibung und zugehörige Grundlagen

Mit dem Indikator 'Länge der Freisetzungspfade' wird die Transportpfadlänge im Hinblick auf die Barrierenwirkung des Wirtgesteins und allenfalls vorhandener Rahmengesteine beurteilt. Die Transportpfadlänge bezieht sich auf den nutzbaren Teil des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs, d.h. auf denjenigen Teil, der die verschärften Anforderungen (Schritt 5.2) bzgl. der Tiefenlage[101] erfüllt. Mit dem vorliegenden Indikator wird die vertikale (in der Regel minimale) Distanz von den Lagerkammern zur Ober- oder Untergrenze des nutzbaren einschlusswirksamen Gebirgsbereichs beurteilt. Die Länge horizontaler Freisetzungspfade in der Lagerebene (von Lagerkammern zu bereichsbegrenzenden geologischen Elementen) fliesst hingegen nicht in die Bewertung ein, da diese Transportpfadlänge überall mindestens 100 m beträgt. Dies wird durch die Anforderungen an den Indikator 'Platzangebot untertags' sichergestellt.

Die vertikale Transportpfadlänge setzt sich aus dem Anteil innerhalb des Wirtgesteins (bestimmt durch die halbe Schichtmächtigkeit abzüglich des Radius der Lagerkammern inkl. Auflockerungszone) und aus den wirksamen Anteilen innerhalb der oberen bzw. unteren Rahmengesteine zusammen. Für den Durchmesser der Lagerkammern inkl. Auflockerungszone[102] wird vereinfacht ein Wert von 20 m (für SMA-Lagerkavernen) bzw. 5 m (für HAA-Lagerstollen) angenommen. In der Bewertung wird eine allfällige Radionuklidfreisetzung horizontal entlang höher durchlässiger Schichten in den Rahmengesteinen bis zu den entsprechenden Exfiltrationsorten (in der Form eines möglichen Abzugs in der Bewertung) berücksichtigt.

Der Indikator 'Länge der Freisetzungspfade' ist mit den Indikatoren 'Mächtigkeit' und 'Homogenität des Gesteinsaufbaus' gekoppelt. Die Mächtigkeit betrifft primär die geologischen Verhältnisse, während die Transportpfadlänge und die Homogenität des Gesteinsaufbaus auch bautechnische Aspekte beinhalten (Durchmesser der Lagerkammern und Auflockerungszone, vertikale Platzierung der Lagerebene).

---

[101] Dabei handelt es sich um die Anforderungen für die Indikatoren 'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit', 'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteins-Dekompaktion' und 'Tiefenlage unter Oberfläche Fels im Hinblick auf glaziale Tiefenerosion'.

[102] Unter der vereinfachenden Annahme eines Durchmessers der SMA-Lagerkavernen von ca. 10 m bzw. der HAA-Lagerstollen von ca. 2.5 m sowie eines Durchmessers der Auflockerungszone, der dem Radius der jeweiligen Lagerkammern entspricht.

Die in der Bewertungsskala verwendeten Werte für die Transportpfadlänge basieren auf Erfahrungswerten, die in zahlreichen Untersuchungen von Tiefenlagern in unterschiedlichen Wirtgesteinstypen gewonnen wurden, insbesondere in den Projekten Entsorgungsnachweis/Opalinuston (Nagra 2002c), Kristallin-I (Nagra 1994a) und SMA/Wellenberg (Nagra 1994b). Zusätzlich wurden orientierende Sicherheitsbetrachtungen für das SMA- und HAA-Lager durchgeführt, um den Einfluss der Transportpfadlänge auf die Radionuklid-Freisetzungsraten zu illustrieren (vgl. Anhang A5.3). Dazu wurden nebst der Transportpfadlänge auch andere transportrelevante Einflussgrössen (insbesondere hydraulische Durchlässigkeit, hydraulischer Gradient, Art der Transportpfade und Ausbildung des Porenraums, Transmissivität allenfalls vorhandener präferenzieller Freisetzungspfade sowie hydrodynamische Dispersion[103]) berücksichtigt. Die Resultate dieser orientierenden Sicherheitsbetrachtungen zeigen, dass die maximalen Summendosen mit zunehmender Transportpfadlänge erwartungsgemäss abnehmen. Die erzielbaren Dosisreduktionen im relevanten Wertebereich der Transportpfadlänge (Dekameterbereich) sind vergleichsweise gering: In homogen-porösen Wirtgesteinen mit sehr niedriger Durchlässigkeit reduziert sich die maximale Dosis beispielsweise um bis zu ca. eine halbe Grössenordnung, wenn die Transportpfadlänge von 20 auf 40 m erhöht wird (Fig. A5.3-1, A5.3-3 und A5.3-5), während die Dosisreduktionen für höher durchlässige (homogen-poröse, kleinräumig geklüftete oder Störungszonen enthaltende) Wirtgesteine relativ klein ausfallen (Fig. A5.3-2, A5.3-4 und A5.3-6 bis A5.3-10).

3. Erläuterung der Anforderungen und Bewertungsskalen

Der Indikator 'Länge der Freisetzungspfade' fliesst in die Bewertung der bevorzugten Bereiche in Schritt 5.3 ein (s. oben). Mindestanforderungen und verschärfte Anforderungen werden indirekt über den Indikator 'Mächtigkeit' festgelegt.

Bewertungsskala für SMA und HAA (Schritt 5.3) – Die Beurteilung erfolgt primär anhand des vertikalen Transportpfads durch das Wirtgestein und seine Rahmengesteine, unter vereinfachter Berücksichtigung der vertikalen Ausdehnung der Lagerkammern inkl. Auflockerungszone (SMA: 20 m; HAA: 5 m). Allenfalls existierende, horizontale Fliesspfade in den Rahmengesteinen, welche die vertikale Transportdistanz reduzieren, werden ebenfalls in die Bewertung einbezogen: Bei horizontalen Migrationsdistanzen im Kilometerbereich erfolgt kein Abzug, bei kleineren Migrationsdistanzen im Hektometerbereich wird ein Abzug um eine Bewertungsstufe in der Bewertung vorgenommen.

Im Falle des Opalinustons wird die Bewertungsstufe *sehr günstig* (bzw. *günstig*) sowohl für SMA als auch für HAA dann erreicht, wenn die Transportpfadlänge im nutzbaren einschlusswirksamen Gebirgsbereich ≥ 50 m (bzw. ≥ 40 m) beträgt. Die Erfahrungen aus früheren Sicherheitsanalysen und die Resultate der orientierenden Sicherheitsbetrachtungen in Anhang A5.3 (Fig. A5.3-1, A5.3-3 und A5.3-5) zeigen, dass mit einer Transportpfadlänge von ca. 40 m im Opalinuston für SMA und HAA ein grosser Beitrag der geologischen Barriere zur Barrierenwirkung des Gesamtsystems erzielt wird. Eine Transportpfadlänge von ca. 50 m ergibt eine weitere – allerdings vergleichsweise kleine – Dosisreduktion.

---

[103] Die hydrodynamische Dispersion ist bei einer pulsförmigen Freisetzung aus dem Nahfeld umso wirksamer, je länger der Freisetzungspfad ist (Verbreiterung der Konzentrationsverteilung mit zugehöriger Reduktion des Konzentrationsmaximums bei einer pulsförmigen Freisetzung aus dem Nahfeld in Funktion des Abstands vom Ort der Freisetzung). Dies ist ein wichtiger Mechanismus z.B. für das sicherheitsrelevante Nuklid I-129 bei dessen Freisetzung aus einem BE-Behälter (Nagra 2002c).

Für SMA werden die Wertungen *sehr günstig* bzw. *günstig* im Falle der Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger' bei Transportpfadlängen von ≥ 75 m bzw. ≥ 50 m erreicht, im Falle der Effinger Schichten und der Mergel-Formationen des Helvetikums bei ≥ 100 m bzw. ≥ 75 m. Diese Werte stützen sich auf die in früheren Sicherheitsanalysen gemachten generellen Erfahrungen und berücksichtigen auch allenfalls vorhandene, wenig mächtige Inhomogenitäten (Sandsteinlagen, kalkige Lagen, Kalkbankabfolgen), die sich ungünstig auf die Länge der barrierenwirksamen Anteile der Freisetzungspfade auswirken.

Die Bewertungsstufen *ungünstig bis bedingt günstig* werden aufgrund der verschärften Anforderungen für den Indikator 'Mächtigkeit' nicht erreicht.

Bei allenfalls existierenden, horizontalen Fliesspfaden, welche die vertikale Transportdistanz innerhalb des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs verkürzt, wird der Beitrag dieser horizontalen Freisetzungspfade zur Barrierenwirkung der Geosphäre in qualitativer Weise mitbewertet. Bei horizontalen Migrationsdistanzen im km-Bereich erfolgt kein Abzug, da die Barrierenwirkung dieser Freisetzungspfade die durch Verkürzung der vertikalen Transportdistanz reduzierte Barrierenwirkung kompensiert[104]. Bei kleineren Migrationsdistanzen im Hektometerbereich wird hingegen ein Abzug um eine Bewertungsstufe in der Bewertung der vertikalen Transportdistanz vorgenommen.

[104] Vgl. dazu die Resultate der Rechenfälle 1.5a/b in Nagra (2002c), in denen die Beiträge von vertikalen und horizontalen Transportpfaden in den Rahmengesteinen des Opalinustons zur Barrierenwirkung des Gesamtsystems untersucht wurden.

A1.20 Transmissivität präferenzieller Freisetzungspfade

Festlegung der Anforderungen und Bewertungsskalen

Schritt/ Kriterium	Attribut	Anforderungen und Bewertungsskalen	
		SMA	**HAA**
4.1/1.4	Mindest-anforderung (MA)	$T \leq 10^{-8}$ m^2/s	$T \leq 10^{-9}$ m^2/s
		Wenn keine Erfahrungswerte für die Transmissivität vorliegen: mittlerer Tongehalt ≥ 25 % (bei Sedimentgesteinen, ausser Evaporiten) oder geologische Beschreibung der Gesteinseinheiten und generelle Erfahrungen	
4.3/1.4		Bei der Bewertung, Berücksichtigung der Ungewissheiten und der tektonischen Überprägung:	
	Sehr günstig	$T \leq 10^{-10}$ m^2/s	$T \leq 10^{-11}$ m^2/s
	Günstig	$10^{-10} < T \leq 10^{-9}$ m^2/s	$10^{-11} < T \leq 10^{-10}$ m^2/s
	Ungünstig bis bedingt günstig (graduelle Abstufung)	$10^{-9} < T \leq 10^{-8}$ m^2/s	$10^{-10} < T \leq 10^{-9}$ m^2/s
5.3/1.4	Bewertungs-skala	Bewertungsstufen wie in Schritt 4.3/Kriterium 1.4	

[1)] Bei hydraulischen Gradienten von ca. 0.1 m/m, sonst entsprechend angepasst.

Legende: T – mittlere Transmissivität einer Diskontinuität.

Hintergrundinformationen

1. Relevanz für Langzeitsicherheit bzw. bautechnische Machbarkeit

Der Indikator 'Transmissivität präferenzieller Freisetzungspfade' bestimmt – zusammen mit dem hydraulischen Gradienten – den Wasserfluss entlang präferenzieller Freisetzungspfade im Nahfeld und in der Geosphäre. Die Transmissivität hat dadurch einen massgeblichen Einfluss auf die Radionuklidrückhaltung im Nahfeld und in der Geosphäre und daher auf die Radionuklidfreisetzung aus dem geologischen Tiefenlager.

Relevante Sicherheitsfunktionen:	Rückhaltung Kleine Freisetzungsraten
Relevante Elemente des Barrierensystems:	WG/EG
Sicherheitsrelevante Eigenschaften:	Rückhaltung und kleine Freisetzungsraten dank geringem Wasserfluss und günstigen Transport-eigenschaften

2. Beschreibung und zugehörige Grundlagen

Die Wasserführung innerhalb von präferenziellen Freisetzungspfaden im Wirtgestein wird anhand von Erfahrungswerten für die Transmissivität beurteilt. Liegen keine Erfahrungswerte für die Transmissivität vor, so wird der mittlere Tongehalt (vgl. Indikator 'Tongehalt'), die geologische Beschreibung der Gesteinseinheiten (Homogenität bzw. Heterogenität) und generelle Erfahrungen (z.B. über das erwartete Selbstabdichtungsvermögen) für die Beurteilung herangezogen.

Die Durchlässigkeit der Gesteine kann aufgrund tektonischer Prozesse (Bildung von Scher- und Kluftzonen aufgrund von Verformungsprozessen) sowohl kleinräumig-penetrativ wie auch selektiv entlang einzelner grossräumiger Diskontinuitäten signifikant erhöht werden. Solche Diskontinuitäten können entsprechend ihrer Eigenschaften und Häufigkeit klassifiziert werden (Fig. 4.1-1 in Nagra 2008b). In harten spröden Gesteinen (Kristallingesteine, Kalksteine, Dolomite, stark verfestigte Sandsteine) ist dieser Effekt besonders stark ausgeprägt. Die Transmissivitätserhöhung hängt z.T. von den lokalen Gebirgsspannungsverhältnissen ab und ist deshalb oft tiefenabhängig (Zunahme der Normalspannung auf Kluftflächen mit zunehmender Tiefe). In tonreichen Gesteinen mit signifikantem Selbstabdichtungsvermögen führen Störungen in grösserer Tiefe in der Regel nicht zu einer Erhöhung der Transmissivität.

Die Anforderungen und Bewertungsskalen für den Indikator 'Transmissivität präferenzieller Freisetzungspfade' beziehen sich auf die mittlere Transmissivität von Diskontinuitäten, d.h. auf die über die ganze Struktur gemittelte Transmissivität einzelner transmissiver Elemente. Die Anforderungen und Bewertungsskalen gelten für Störungszonen mit typischen Abständen von einigen Deka- bis einigen Hektometern, denen mit den Lagerkammern nicht ausgewichen werden kann und die somit den (lokalen) Wasserfluss durch die Lagerkammern und den Radionuklidtransport in den technischen und geologischen Barrieren mitbestimmen. Auslegungsbestimmenden Störungszonen wird bei der Platzierung der Lagerkammern ausgewichen (vgl. Indikator 'Platzangebot untertags'), während regionale Störungszonen bei der Bereichsbegrenzung gemieden werden (vgl. Indikator 'Abstand zu regionalen Störungszonen').

Das potenzielle Selbstabdichtungsvermögen der Gesteine wird bei der Abschätzung der Transmissivitäten anhand des mittleren Tongehalts oder anhand der geologischen Beschreibung der Gesteinseinheiten und genereller Erfahrungen berücksichtigt. Die Transmissivitäten der präferenziellen Freisetzungspfade sind naturgemäss sehr variabel. Wie bei der grossräumigen Durchlässigkeit ist häufig eine Abhängigkeit der Transmissivität von der Überdeckung gegeben; diesem Umstand wird mittels der Anforderungen für den Indikator 'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteins-Dekompaktion' Rechnung getragen. Die kleinräumige Klüftung des Wirtgesteins wird im Rahmen der Indikatoren 'Hydraulische Durchlässigkeit' und 'Art der Transportpfade und Ausbildung des Porenraums' berücksichtigt.

Die Werte für die Mindestanforderungen basieren auf Erfahrungen in Zusammenhang mit Lagerprojekten in geklüfteten Gesteinen (vgl. z.B. Nagra 1994a und b) sowie auf orientierenden Sicherheitsbetrachtungen mit generischen Annahmen zu den Tiefenlagern SMA und HAA (vgl. Fig. 3.3-3, Fig. 3.3-4 sowie Fig. A5.2-3, A5.2-4, A5.2-6 in Anhang 5). Die abgeleiteten Mindestanforderungen für die Transmissivität gelten für einen durchschnittlichen hydraulischen Gradienten von 0.1 m/m und basieren auf der Annahme, dass nur einige wenige (höchstens zwei) Störungszonen bzw. präferenzielle Freisetzungspfade pro Lagerkammer vorliegen. Für höhere hydraulische Gradienten gelten geringere Transmissivitäten, für kleinere Gradienten entsprechend höhere Transmissivitäten. Die Anforderungen basieren auf realistischen Annahmen für die Abfallzuteilung (Referenzzuteilung).

3. Erläuterung der Anforderungen und Bewertungsskalen

Für den Indikator 'Transmissivität präferenzieller Freisetzungspfade' wird eine Mindestanforderung für den Schritt 4 und Bewertungsskalen für die Schritte 4 und 5 festgelegt (s. oben). Es wird keine verschärfte Anforderung an die Transmissivität präferenzieller Freisetzungspfade gestellt.

- **Mindestanforderung für SMA** (Schritt 4.1) – Für die Transmissivität präferenzieller Freisetzungspfade wird eine Mindestanforderung von 10^{-8} m^2/s (gemittelt über die Diskontinuität) festgelegt. Wie aus Fig. A5.2-4 in Anhang 5 ersichtlich ist, resultiert für eine Transmissivität von 10^{-8} m^2/s (Rechenfall mit zwei Störungszonen bzw. präferenziellen Freisetzungspfaden) eine maximale Dosis, die um ca. einen Faktor 2 unterhalb des Schutzziels von 0.1 mSv/a liegen. Diese Festlegung ist an die für die Referenz-Abfallzuteilung getroffene Annahme einer grossräumigen Durchlässigkeit von 10^{-10} m/s gekoppelt (vgl. Kap. 3.3).
- **Mindestanforderung für HAA** (Schritt 4.1) – Für die Transmissivität präferenzieller Freisetzungspfade wird eine Mindestanforderung von 10^{-9} m^2/s (gemittelt über die Diskontinuität) festgelegt. Wie aus Fig. A5.2-3 in Anhang 5 für das HAA-Lager (BE-Teil) ersichtlich ist, resultiert für eine Transmissivität von 10^{-9} m^2/s (Rechenfall mit einer Störungszone, die alle Lagerstollen schneidet, und einer grossräumigen Durchlässigkeit von 10^{-10} m/s) eine maximale Dosis, die um ca. einen Faktor 5 unterhalb des Schutzziels von 0.1 mSv/a liegt. Die entsprechenden Dosen für den HAA-Teil fallen wesentlich tiefer aus. Wie ferner aus Fig. A5.2-6 in Anhang 5 für das HAA-Lager (LMA-Teil, alternative Abfallzuteilung) ersichtlich ist, resultiert für eine Transmissivität von 10^{-9} m^2/s (Rechenfall mit zwei Störungszonen bzw. präferenziellen Freisetzungspfaden und einer grossräumigen Durchlässigkeit von 10^{-10} m/s) eine maximale Dosis, die um ca. einen Faktor 2 unterhalb des Schutzziels von 0.1 mSv/a liegt.

  Die vergleichsweise niedrigen Dosen für den BE- und HAA-Teil des HAA-Lagers im Vergleich mit denjenigen für den LMA-Teil sind auf die günstigen Barriereneigenschaften der Bentonit-Verfüllung in den Lagerstollen zurückzuführen (sehr niedrige hydraulische Durchlässigkeit des Bentonits selbst für vergleichsweise hohe hydraulische Durchlässigkeiten im Wirtgestein). Der Einfluss einer allfälligen Bentonit-Degradation im HAA-Lager bei höheren Durchlässigkeiten im Wirtgestein ist in Fig. A5.2-2 illustriert.

  Eine Mindestanforderung für die Transmissivität präferenzieller Freisetzungspfade von 10^{-9} m^2/s ist etwas vorsichtiger als die Anforderung, die in Finnland an die Transmissivität von Störungszonen im Bereich von Lagerstollen für die horizontale Einlagerung von abgebrannten Brennelementen gestellt wird[105].

[105] Bei der Platzierung der BE-Behälter im Lagerkonzept KBS-3H werden Störungszonen ab einer Transmissivität von 3×10^{-9} m^2/s entweder gemieden oder aber durch Versiegelungsmassnahmen innerhalb der Lagerstollen hydraulisch isoliert (Posiva 2008).

- Bewertungsskalen für SMA und HAA (Schritte 4.3 und 5.3) – Die Bewertungsstufen für die Transmissivität präferenzieller Freisetzungspfade stützen sich auf generelle Erfahrungen und auf die Resultate der orientierenden Sicherheitsbetrachtungen (Fig. 3.3-3, Fig. 3.3-4 sowie Fig. A5.2-3, A5.2-4, A5.2-6 in Anhang 5). Zusätzlich fliessen bei der wirtgesteinsspezifischen Bewertung in Schritt 4.3 auch Ungewissheiten und die generelle tektonische Überprägung der bevorzugten Wirtgesteine und generelle Erfahrungen zur Bedeutung der Transmissivität präferenzieller Freisetzungspfade für die Langzeitsicherheit ein; für SMA führt dies bei den Wirtgesteinen Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger', Effinger Schichten und Mergel-Formationen des Helvetikums im Vergleich zum Opalinuston zu Abzügen in der Bewertung. Die Bewertungsstufen für die Schritte 4.3 und 5.3 sind identisch.

  Als g*ünstig* (bzw. *sehr günstig*) werden Wirtgesteine mit Transmissivitäten eingestuft, die um eine bis zwei Grössenordnungen (bzw. um mehr als zwei Grössenordnungen) unterhalb der Mindestanforderungen (je für SMA und HAA) liegen. Für Transmissivitäten, die um bis zu einer Grössenordnung unterhalb der Mindestanforderungen liegen, erfolgt eine graduelle Abstufung der Bewertung zwischen *ungünstig* bis *bedingt günstig*. Gemäss den Fig. A5.2-3, A5.2-4, A5.2-6 in Anhang 5 werden die maximalen Dosen im oberen Teil dieses Transmissivitätsbereichs (d.h. bei Transmissivitäten, die um bis zu einer Grössenordnung unterhalb der Mindestanforderungen liegen) signifikant reduziert; bei einer weiteren Reduktion der Transmissivitäten sind die erzielbaren Dosisreduktionen hingegen nur noch marginal.

A1.21 Tongehalt

Festlegung der Anforderungen und Bewertungsskalen

Schritt/ Kriterium	Attribut	Anforderungen und Bewertungsskalen	
		SMA	**HAA**
4.1/1.2 4.1/1.4	Mindest-anforderung (MA)	Wenn keine Erfahrungswerte für die hydraulische Durchlässigkeit (Indikator 'Hydraulische Durchlässigkeit') bzw. die Transmissivität (Indikator 'Transmissivität präferenzieller Freisetzungspfade') vorliegen: Mittlerer Tongehalt ≥ 25 % (bei Sedimentgesteinen ausser Evaporiten) oder geologische Beschreibung der Gesteinseinheiten und generelle Erfahrungen	

Der Indikator 'Tongehalt' wird zusammen mit den Indikatoren 'Hydraulische Durchlässigkeit' und 'Transmissivität präferenzieller Freisetzungspfade' beurteilt.

Hintergrundinformationen

1. Relevanz für Langzeitsicherheit bzw. bautechnische Machbarkeit

Der Tongehalt hat aufgrund seines Einflusses auf die Selbstabdichtung von Sedimentgesteinen einen massgeblichen Einfluss auf die hydraulische Durchlässigkeit der Gesteine und auf die Transmissivität präferenzieller Freisetzungspfade – und damit auf den Wasserfluss im Wirtgestein. Der mittlere Tongehalt wird als Ersatz zur Beurteilung des Wasserflusses im Wirtgestein herangezogen, falls keine Erfahrungswerte für die hydraulische Durchlässigkeit und für die Transmissivität vorliegen (vgl. Relevanz der Indikatoren 'Hydraulische Durchlässigkeit' und 'Transmissivität präferenzieller Freisetzungspfade').

Relevante Sicherheitsfunktionen:	Verzögerte Freisetzung Rückhaltung Kleine Freisetzungsraten
Relevante Elemente des Barrierensystems:	Abfallmatrix Verfüllung & Versiegelung WG/EG
Sicherheitsrelevante Eigenschaften:	Stabilität der Abfallmatrix sowie der Verfüll- und Versiegelungsmaterialien dank geringem Wasserfluss Rückhaltung und kleine Freisetzungsraten dank geringem Wasserfluss und günstigen Transporteigenschaften

2. Beschreibung und zugehörige Grundlagen

Die Wasserführung in Nahfeld und Geosphäre wird anhand von Erfahrungswerten für die grossräumige hydraulische Durchlässigkeit des Wirtgesteins und für die Transmissivität präferenzieller Fliesspfade beurteilt. Liegen keine Erfahrungswerte für die Durchlässigkeit und Transmissivität vor, so werden Erfahrungswerte für den mittleren Tongehalt oder die geologische Beschreibung der Gesteinseinheiten und generelle Erfahrungen herangezogen.

Für eine weiter gehende Beschreibung der Bedeutung des Tongehalts für die Wasserführung im Wirtgestein und der vorhandenen Grundlagen wird auf die Indikatoren 'Hydraulische Durchlässigkeit' und 'Transmissivität präferenzieller Freisetzungspfade' sowie auf Nagra (2008c) verwiesen.

3. Erläuterung der Anforderungen und Bewertungsskalen

Für den Indikator 'Tongehalt' wird eine Mindestanforderung für den Schritt 4.1 festgelegt (s. oben), die für SMA und HAA identisch ist und die an die Mindestanforderungen für die Indikatoren 'Hydraulische Durchlässigkeit' und 'Transmissivität präferenzieller Freisetzungspfade' gekoppelt ist.

- **Mindestanforderung für SMA und HAA** (Schritt 4.1) – Wenn keine Erfahrungswerte für die hydraulische Durchlässigkeit (Indikator 'Hydraulische Durchlässigkeit') bzw. die Transmissivität (Indikator 'Transmissivität präferenzieller Freisetzungspfade') vorliegen, so wird als Ersatz ein mittlerer Tongehalt von ≥ 25 % verlangt (bei Sedimentgesteinen ausser Evaporiten) oder – wenn quantitative Angaben zum Tongehalt fehlen – werden die geologische Beschreibung der Gesteinseinheiten und generelle Erfahrungen zur Beurteilung herangezogen. Die Erläuterung dieser Festlegungen erfolgt in Zusammenhang mit den Indikatoren 'Hydraulische Durchlässigkeit' und 'Transmissivität präferenzieller Freisetzungspfade'.

A1.22 Selbstabdichtungsvermögen

Festlegung der Anforderungen und Bewertungsskalen

Schritt/ Kriterium	Attribut	Anforderungen und Bewertungsskalen	
		SMA	**HAA**
4.3/1.4		Selbstabdichtungsvermögen unter Berücksichtigung der unter In-situ-Bedingungen des untertägigen Lagerbereichs zu erwartenden Prozesse (Schliessen von Klüften/Diskontinuitäten durch elastische/plastische Deformationen und Quellen bzw. Desintegration der Gesteinsmatrix):	
	Sehr günstig	Ausgeprägtes Selbstabdichtungsvermögen	
	Günstig	Signifikantes Selbstabdichtungsvermögen	
	Ungünstig bis bedingt günstig (graduelle Abstufung)	Kein oder nur geringes Selbstabdichtungsvermögen	
5.3/1.4	Bewertungs-skala	Bewertungsstufen wie in Schritt 4.3/Kriterium 1.4 (unter Berücksichtigung der relevanten In-situ-Bedingungen)	

Hintergrundinformationen

1. Relevanz für Langzeitsicherheit bzw. bautechnische Machbarkeit

Das Selbstabdichtungsvermögen ist wichtig in Zusammenhang mit der Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften, weil es die Auswirkungen allenfalls entstehender Klüfte (auf die hydraulische Durchlässigkeit) und Störungszonen (auf die Transmissivität) im Hinblick auf die Wasserführung im Wirtgestein begrenzt. In diesem Sinne hat das Selbstabdichtungsvermögen auch einen massgeblichen Einfluss auf die Transporteigenschaften der präferenziellen Freisetzungspfade im Wirtgestein bzw. im einschlusswirksamen Gebirgsbereich, insbesondere durch seinen Beitrag zur Verringerung der Wasserführung und zur Begrenzung der Auswirkungen von lagerbedingten Einflüssen (Auflockerungszone), und damit auch auf die Rückhaltung und Freisetzung von Radionukliden.

Relevante Sicherheitsfunktionen:	Isolation Gewährleistung Langzeitstabilität
Relevante Elemente des Barrierensystems:	Geologische Situation
Sicherheitsrelevante Eigenschaften:	Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften

Relevante Sicherheitsfunktionen:	Rückhaltung Kleine Freisetzungsraten
Relevante Elemente des Barrierensystems:	WG/EG
Sicherheitsrelevante Eigenschaften:	Rückhaltung und kleine Freisetzungsraten dank geringem Wasserfluss und günstigen Transporteigenschaften Geringe Beeinträchtigung der Barrierenwirkung des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs durch lagerbedingte Einflüsse

2. Beschreibung und zugehörige Grundlagen

Zur Selbstabdichtung von Gesteinen tragen verschiedene Prozesse bei. Natürliche Störungen, Scherzonen und Klüfte können bereits während einer frühen Phase der geologischen Geschichte eines Gesteins durch Mineraladerbildungen abgedichtet werden. Solche Prozesse erfolgen in der Regel in grösserer Tiefe über sehr lange (geologische) Zeiträume unter erhöhten Temperaturen und Drücken, sind seit langer Zeit abgeschlossen und werden im heutigen Umfeld eines Tiefenlagers im relevanten Zeitmassstab von 100'000 bis 1 Million Jahre nicht mehr stattfinden. Auch die Entstehung von 'Clay/Shale Smears' (Einschleppung von tonigen Gesteinsanteilen in die Störungsebene) und 'Fault Gouges' (fein zerbrochenes Gesteinsmaterial) während der Bildung von Störungen und Scherzonen kann zu deren Abdichtung führen, insbesondere wenn die betroffenen Strukturen in einem kompressiven Umfeld stehen.

Wie in der Beschreibung der Indikatoren 'Hydraulische Durchlässigkeit', 'Transmissivität präferenzieller Freisetzungspfade' und 'Tongehalt' und in Nagra (2008c) diskutiert, wird bei Tongehalten grösser als 25 % eine signifikante Selbstabdichtung der Gesteine erwartet. Die Durchlässigkeitserhöhung hängt auch von den lokalen Gebirgsspannungsverhältnissen ab und ist deshalb oft tiefenabhängig (Dekompaktion). Die Anforderungen bzgl. Gesteins-Dekompaktion werden im Rahmen des Indikators 'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteins-Dekompaktion' festgelegt.

Bei der Selbstabdichtung von Klüften in der Auflockerungszone von Untertagebauwerken sind zeitabhängige Deformation, Quellung und Desintegration des Gesteins die massgeblichen Prozesse. Die Selbstabdichtung einer Auflockerungszone wird begünstigt, wenn das Quellen des Verfüllungs-/Versiegelungsmaterials einen radial nach aussen gerichteten Druck auf die Auflockerungszone bewirkt.

3. Erläuterung der Anforderungen und Bewertungsskalen

Der Indikator 'Selbstabdichtungsvermögen' fliesst in die Bewertung der bevorzugten Wirtgesteine in Schritt 4.3 und in die Bewertung der bevorzugten Bereiche in Schritt 5.3 ein (s. oben). Die Bewertungsskalen für SMA und HAA sind identisch. Es werden keine Mindestanforderungen und verschärfte Anforderungen für den Indikator 'Selbstabdichtungsvermögen' festgelegt. Implizit wird das Selbstabdichtungsvermögen aber bei der Festlegung der Anforderungen für die Indikatoren 'Hydraulische Durchlässigkeit', 'Transmissivität präferenzieller Freisetzungspfade' und 'Auflockerungszone im Nahbereich der Untertagebauten' berücksichtigt.

- **Bewertungsskalen für SMA und HAA** (Schritt 4.3 und 5.3) – Bei der Bewertung des Selbstabdichtungsvermögens werden die unter *in-situ* Bedingungen des untertägigen Lagerbereichs zu erwartenden Prozesse berücksichtigt (Schliessen von Klüften/Diskontinuitäten durch elastische/plastische Deformationen und Quellen bzw. Desintegration der Gesteinsmatrix): Als *sehr günstig* werden Gesteine eingestuft, die über ein ausgeprägtes Selbstabdichtungsvermögen verfügen (primär tonreiche Gesteine). Aufgrund bisheriger Erfahrungen und unabhängiger Evidenzen weisen die durch tektonische Überprägung entstandenen Klüfte und Störungen in solchen Gesteinen bei genügender Überdeckung in der Regel keine erhöhte Durchlässigkeit bzw. Transmissivität auf, d.h. sie unterscheiden sich hydraulisch kaum von der umgebenden Gesteinsmatrix. Als *günstig* werden Gesteine eingestuft, die trotz ihres vergleichsweise geringeren Tongehalts ein signifikantes Selbstabdichtungsvermögen aufweisen (z.B. Effinger Schichten). Klüfte und Störungen können in solchen Gesteinen erhöhte Transmissivitäten aufweisen, führen aber nicht zu einer substanziellen Erhöhung der grossräumigen Durchlässigkeit. Als *bedingt günstig* bis *ungünstig* werden Gesteine eingestuft, die nur ein geringes oder gar kein Selbstabdichtungsvermögen aufweisen (z.B. Kristallingesteine).

A1.23 Modellvorstellungen zur Geodynamik und Neotektonik

Festlegung der Anforderungen und Bewertungsskalen

Schritt/ Kriterium	Attribut	Anforderungen und Bewertungsskalen	
		SMA	**HAA**
3.1/2.1	Mindest-anforderung (MA)	Innerhalb des Betrachtungs-zeitraums von 100'000 Jahren keine schwerwiegende grossräu-mige Gefährdung der geologischen Stabilität aus Gründen der Geodynamik bzw. Neotektonik	Innerhalb des Betrachtungs-zeitraums von 1 Mio. Jahren keine schwerwiegende gross-räumige Gefährdung der geologischen Stabilität aus Gründen der Geodynamik bzw. Neotektonik
3.1/3.3	Mindest-anforderung (MA)	Für den Betrachtungszeitraum von 100'000 Jahren ist eine Beurteilung der geologischen Stabilität möglich	Für den Betrachtungszeitraum von 1 Mio. Jahren ist eine Beurteilung der geologischen Stabilität möglich
3.3/2.1	Günstig bis sehr günstig (graduelle Abstufung)	Innerhalb des Betrachtungs-zeitraums von 100'000 Jahren keine grossräumige Gefährdung der geologischen Stabilität zu erwarten	Innerhalb des Betrachtungs-zeitraums von 1 Mio. Jahren keine grossräumige Gefährdung der geologischen Stabilität zu erwarten
	Ungünstig bis bedingt günstig (graduelle Abstufung)	Innerhalb des Betrachtungszeit-raums von 100'000 Jahren kann eine gewisse grossräumige Gefährdung der geologischen Stabilität nicht ausgeschlossen werden	Innerhalb des Betrachtungszeit-raums von 1 Mio. Jahren kann eine gewisse grossräumige Gefährdung der geologischen Stabilität nicht ausgeschlossen werden
3.3/3.3	Günstig bis sehr günstig (graduelle Abstufung)	Innerhalb des Betrachtungs-zeitraums von 100'000 Jahren sind zuverlässige Aussagen zur geologischen Stabilität möglich	Innerhalb des Betrachtungs-zeitraums von 1 Mio. Jahren sind zuverlässige Aussagen zur geologischen Stabilität möglich
	Ungünstig bis bedingt günstig (graduelle Abstufung)	Innerhalb des Betrachtungszeit-raums von 100'000 Jahren sind zuverlässige Aussagen zur geologischen Stabilität nur bedingt möglich	Innerhalb des Betrachtungszeit-raums von 1 Mio. Jahren sind zuverlässige Aussagen zur geologischen Stabilität nur bedingt möglich

Schritt/ Kriterium	Attribut	Anforderungen und Bewertungsskalen	
		SMA	**HAA**
5.3/2.1	Günstig bis sehr günstig (graduelle Abstufung)	Innerhalb des Betrachtungszeitraums von 100'000 Jahren keine generelle Gefährdung der geologischen Stabilität im bevorzugten Bereich zu erwarten	*Günstig bis sehr günstig*: Innerhalb des Betrachtungszeitraums von 1 Mio. Jahren keine generelle Gefährdung der geologischen Stabilität im bevorzugten Bereich zu erwarten (geringe Beanspruchung durch Fernschub; entspricht geologischem Regime: "Tafeljura s.str.") *Günstig*: innerhalb des Betrachtungszeitraums von 1 Mio. Jahren keine generelle Gefährdung der geologischen Stabilität im bevorzugten Bereich zu erwarten (mässige Beanspruchung durch Fernschub; entspricht geologischem Regime: "Vorfaltenzone")
	Ungünstig bis bedingt günstig (graduelle Abstufung)	Innerhalb des Betrachtungszeitraums von 100'000 Jahren kann eine generelle Gefährdung der geologischen Stabilität im bevorzugten Bereich nicht ausgeschlossen werden	Innerhalb des Betrachtungszeitraums von 1 Mio. Jahren kann eine generelle Gefährdung der geologischen Stabilität im bevorzugten Bereich nicht ausgeschlossen werden (erhebliche bis starke Beanspruchung durch Fernschub)

Schritt/ Kriterium	Attribut	Anforderungen und Bewertungsskalen	
		SMA	**HAA**
5.3/3.3	Günstig bis sehr günstig (graduelle Abstufung)	Innerhalb des Betrachtungszeitraums von 100'000 Jahren sind zuverlässige Aussagen zur geologischen Stabilität im bevorzugten Bereich möglich	*Günstig bis sehr günstig*: innerhalb des Betrachtungszeitraums von 1 Mio. Jahren sind zuverlässige Aussagen zur geologischen Stabilität im bevorzugten Bereich möglich (geringe Beanspruchung durch Fernschub; entspricht geologischem Regime: "Tafeljura s.str.") *Günstig*: innerhalb des Betrachtungszeitraums von 1 Mio. Jahren sind zuverlässige Aussagen zur geologischen Stabilität im bevorzugten Bereich möglich (mässige Beanspruchung durch Fernschub; entspricht geologischem Regime: "Vorfaltenzone")
	Ungünstig bis bedingt günstig (graduelle Abstufung)	Innerhalb des Betrachtungszeitraums von 100'000 Jahren sind zuverlässige Aussagen zur geologischen Stabilität im bevorzugten Bereich nur bedingt möglich bzw. nicht möglich	Innerhalb des Betrachtungszeitraums von 1 Mio. Jahren sind zuverlässige Aussagen zur geologischen Stabilität im bevorzugten Bereich nur bedingt möglich bzw. nicht möglich (erhebliche bis starke Beanspruchung durch Fernschub)

Hintergrundinformationen

1. Relevanz für Langzeitsicherheit bzw. bautechnische Machbarkeit

Der Indikator 'Modellvorstellungen zur Geodynamik und Neotektonik' dient der Beurteilung der Langzeitstabilität eines geologischen Tiefenlagers. Die Geodynamik und Neotektonik sind massgebliche Einflussfaktoren für die Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften über die erforderlichen Zeiträume und für die Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen.

Relevante Sicherheitsfunktionen:	Isolation Gewährleistung der Langzeitstabilität
Relevante Elemente des Barrierensystems:	Geologische Situation
Sicherheitsrelevante Eigenschaften:	Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften

Relevantes Prinzip:	Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen
Relevante Elemente des Barrierensystems:	Geologische Situation WG/EG
Sicherheitsrelevante Eigenschaften:	Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen (zeitliche Aspekte bzw. Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen)

2. Beschreibung und zugehörige Grundlagen

Der Indikator 'Modellvorstellungen zur Geodynamik und Neotektonik' dient der Beurteilung der Langzeitstabilität innerhalb eines Betrachtungszeitraums von 100'000 Jahren (SMA-Lager) bzw. 1 Million Jahren (HAA-Lager). Bei der Formulierung der Anforderungen und Bewertungsskalen für diesen Indikator wird unterschieden zwischen einer möglichen Gefährdung der geologischen Stabilität aus Gründen der Geodynamik bzw. Neotektonik (Kriterium 2.1: 'Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften') und der Zuverlässigkeit der betreffenden geologischen Aussagen (Kriterium 3.3 'Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen').

Mit dem vorliegenden Indikator wird insbesondere beurteilt, ob keine generellen geologisch-tektonische Veränderungen zu erwarten sind, welche die Sicherheit trotz geeigneter Auslegung des Lagers (insbesondere eine geeignete Tiefenlage und eine geeignete lokale Anordnung der Lagerkammern unter Berücksichtigung heute vorhandener geologischer Strukturen) in Frage stellen könnten. Als Ursache für solche Veränderungen kommen hauptsächlich geodynamische Prozesse in Frage. Diese können zu vertikalen und horizontalen Krustenbewegungen führen, welche grossräumig graduell oder lokal (als differenzielle Bewegungen an teilweise neu gebildeten diskreten Störungen) erfolgen. Um die zukünftige Entwicklung dieser Bewegungen beurteilen zu können, müssen die Erkenntnisse zur bisherigen erdgeschichtlichen Entwicklung, die beobachteten rezenten Bewegungsraten und weitere Beobachtungen zur Neotektonik in eine konsistente Modellvorstellung zur Geodynamik und Neotektonik integriert werden (vgl. detaillierte Diskussion in Nagra 2008c).

Die Beurteilung der Geodynamik und Neotektonik sowie ihrer Prognostizierbarkeit erfolgt in verschiedenen Schritten: Zuerst in Schritt 3 bei der Evaluation der Grossräume, wo geprüft wird, ob ganze Grossräume oder grosse Teile davon aus Gründen der Geodynamik und Neotektonik bzw. der fehlenden Prognostizierbarkeit ausgeschlossen werden müssen; dann in Schritt 5 bei der Bewertung der bevorzugten Bereiche bzw. bei der Charakterisierung der geologischen Standortgebiete und schliesslich in einer späteren Projektphase bei der detaillierten Auslegung des untertägigen Lagerbereichs innerhalb des geologischen Standortgebiets.

Weitere für die Langzeitstabilität relevante Indikatoren sind: 'Grossräumige Erosion im Betrachtungszeitraum', 'Seltene geologische Ereignisse (Vulkanismus)', 'Seismizität' und 'Modellvorstellungen zu geochemischen Vorgängen'. Die Anforderungen und Bewertungsskalen für diese Indikatoren werden separat diskutiert.

3. Erläuterung der Anforderungen und Bewertungsskalen

Der Indikator 'Modellvorstellungen zur Geodynamik und Neotektonik' fliesst in die Evaluation der Grossräume in Schritt 3 und in die Evaluation der Konfigurationen in Schritt 5 ein (s. oben). Es werden Mindestanforderungen an die weiter zu betrachteten Grossräume (Schritt 3.1) und Bewertungsskalen festgelegt (Schritte 3.3 und 5.3).

- **Mindestanforderungen für SMA und HAA** (Schritt 3.1) – Im Hinblick auf die Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften (Kriterium 2.1) wird verlangt, dass innerhalb des Betrachtungszeitraums von 100'000 Jahren (SMA) bzw. 1 Million Jahren (HAA) keine schwerwiegende grossräumige Gefährdung der geologischen Stabilität aus Gründen der Geodynamik bzw. Neotektonik vorliegt.

  Bezüglich Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen (Kriterium 3.3) wird verlangt, dass eine Beurteilung der geologischen Stabilität innerhalb der Betrachtungszeiträume für SMA und HAA möglich ist.

- **Bewertungsskalen für SMA und HAA** (Schritt 3.3) – Im Hinblick auf die Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften (Kriterium 2.1): Als *günstig bis sehr günstig* (bzw. *ungünstig bis bedingt günstig*) wird ein Grossraum dann eingestuft, wenn eine grossräumige Gefährdung der geologischen Stabilität innerhalb der Betrachtungszeiträume für SMA und HAA nicht zu erwarten ist (bzw. nicht ausgeschlossen werden kann). Die Bewertung dieser Situationen erfolgt graduell (Expertenbeurteilung).

  Im Hinblick auf die Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen (Kriterium 3.3): Als *günstig bis sehr günstig* (bzw. *ungünstig bis bedingt günstig*) wird die Prognostizierbarkeit für den Grossraum dann eingestuft, wenn zuverlässige Aussagen zur geologischen Stabilität innerhalb der Betrachtungszeiträume für SMA und HAA möglich sind (bzw. nur bedingt möglich sind). Die Bewertung dieser Situationen erfolgt graduell.

- **Bewertungsskalen für SMA** (Schritt 5.3) – Die Bewertungsstufen für SMA sind praktisch identisch wie in Schritt 3.3, sie beziehen sich hier aber auf die bevorzugten Bereiche (statt auf Grossräume). Aufgrund des vergleichsweise kurzen Betrachtungszeitraums von 100'000 Jahren wird in der Bewertungsskala auf eine feinere Differenzierung zwischen den verschiedenen tektonischen Regimes verzichtet. In der Bewertung der bevorzugten Bereiche wird jedoch den Unterschieden zwischen verschiedenen tektonischen Regimes mittels gradueller Abstufung Rechnung getragen.

- **Bewertungsskalen für HAA** (Schritt 5.3) – Im Hinblick auf die Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften (Kriterium 2.1): Als mindestens *günstig* wird eine geologische Situation dann eingestuft, wenn eine grossräumige Gefährdung der geologischen Stabilität im bevorzugten Bereich innerhalb des Betrachtungszeitraums für HAA nicht zu erwarten ist. Dies bedingt eine geringe Beanspruchung durch den alpinen Fernschub (entspricht geologischem Regime "Tafeljura s.str."; Bewertung: *günstig bis sehr günstig*) bzw. eine mässige Beanspruchung durch den alpinen Fernschub (entspricht geologischem Regime: "Vorfaltenzone"; Bewertung: *günstig*). Als *ungünstig bis bedingt günstig* wird eine geologische Situation dann eingestuft, wenn eine grossräumige Gefährdung der geologischen Stabilität im bevorzugten Bereich innerhalb des Betrachtungszeitraums für HAA nicht ausgeschlossen werden kann. Dies ist bei erheblicher bis starker Beanspruchung durch den alpinen Fernschub der Fall (graduelle Abstufung der Bewertung).

  Im Hinblick auf die Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen (Kriterium 3.3): Als mindestens *günstig* wird die Prognostizierbarkeit dann eingestuft, wenn zuverlässige Aussagen zur geologischen Stabilität innerhalb des Betrachtungszeitraums für HAA möglich sind. Die Bewertung der Prognostizierbarkeit erfolgt wiederum abgestuft nach Massgabe der Beanspruchung durch den alpinen Fernschub (bzw. des tektonischen Regimes, wie oben).

A1.24 Seismizität

Festlegung der Anforderungen und Bewertungsskalen

Schritt/ Kriterium	Attribut	Anforderungen und Bewertungsskalen	
		SMA	**HAA**
3.3/2.1	Beschreibung	Der Indikator 'Seismizität' wird nur für die Beschreibung der Grossräume verwendet, aber nicht bei ihrer Bewertung bzw. Eingengung, weil dies auf Stufe Grossraum nicht sinnvoll ist	
5.3/2.1		Beurteilung anhand der Karte mit historischen und instrumentell erfassten Erdbeben sowie konzeptionellen Überlegungen (Abgrenzung von Zonen (Herdregionen)).	
	Günstig bis sehr günstig (graduelle Abstufung)	Keine erhöhte Seismizität	
	Bedingt günstig bis günstig (graduelle Abstufung)	*Bedingt günstig bis günstig*: leicht erhöhte Seismizität (Teile des Alpennordrands und Graubündens)	*Bedingt günstig*: leicht erhöhte Seismizität (Teile des Alpennordrands und Graubündens)
	Ungünstig	Deutlich erhöhte Seismizität (Teile des Wallis, Region Basel)	

Hintergrundinformationen

1. Relevanz für Langzeitsicherheit bzw. bautechnische Machbarkeit

Der Indikator 'Seismizität' dient der Beurteilung der Langzeitentwicklung eines geologischen Tiefenlagers als Folge von Erdbebenherden (plötzlich auftretende Scherbewegungen innerhalb des Lagerbereichs). Scherbewegungen im Lagerbereich können die Stabilität des Barrierensystems (Fortbestand der günstigen Eigenschaften) und die Prognostizierbarkeit von Langzeitveränderungen beeinträchtigen; seismische Erschütterungen werden jedoch akzeptiert, da das Tiefenlager auf seismische Belastungen ausgelegt werden kann.

Relevante Sicherheitsfunktionen:	Isolation Gewährleistung der Langzeitstabilität
Relevante Elemente des Barrierensystems:	Geologische Situation
Sicherheitsrelevante Eigenschaften:	Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften

Relevantes Prinzip:	Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen
Relevante Elemente des Barrierensystems:	Geologische Situation WG/EG
Sicherheitsrelevante Eigenschaften:	Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen (zeitliche Aspekte bzw. Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen)

2. Beschreibung und zugehörige Grundlagen

Der Indikator 'Seismizität' dient der Beurteilung der Langzeitstabilität innerhalb eines Betrachtungszeitraums von 100'000 Jahren (SMA-Lager) bzw. 1 Million Jahren (HAA-Lager), da die räumliche Häufung von tektonischen Erdbebenherden ein Hinweis auf differenzielle Bewegungen im geologischen Untergrund (meist in grosser Tiefe) ist. Differenzielle Bewegungen erfolgen bevorzugt entlang präexistenter Störungszonen, wobei Bewegungen entweder in kleinen Schritten oder schlagartig mit Versätzen im dm- bis m-Bereich ablaufen können. Erstere sind aseismisch oder äussern sich in nur schwachen Erdbeben, letztere sind hingegen die Ursache von starken Erdbeben, welche aber selten auftreten. Weltweite Erfahrungen zeigen, dass ein direkter Zusammenhang zwischen der Längserstreckung der Störungszonen und der maximal möglichen Erdbebenmagnitude besteht, d.h. sehr starke Erdbeben (mit entsprechend grossen Differenzialbewegungen) können nur an sehr grossen Störungszonen mit Längen von Zehnern bis Hunderten von Kilometern erfolgen. Aufgrund des vorhandenen Erdbebenkatalogs und aufgrund von konzeptionellen Überlegungen können Zonen mit unterschiedlicher Häufigkeits-Magnituden-Verteilung ausgeschieden werden. Innerhalb dieser Zonen kann ohne spezifische Untersuchungen keine räumliche Diskriminierung aufgrund der Seismizität vorgenommen werden. Es zeigt sich, dass in der Schweiz der Raum Basel (in Zusammenhang mit dem Oberrhein-Bresse-Grabensystem) und Teile des Wallis eine erhöhte Erdbebenhäufigkeit aufweisen, und auch in Teilen des Alpennordrands und Graubündens gibt es eine leicht erhöhte Erdbebenhäufigkeit (vgl. Fig. 3.2-2 in Nagra 2008b, wo auch eine ausführlichere Diskussion der Datengrundlagen zu finden ist).

Die Seismizität wird bei der Platzierung der Lagerkammern berücksichtigt, indem allen grösseren potenziell aktiven bzw. reaktivierbaren Störungszonen mit den Lagerkammern ausgewichen wird, um zu vermeiden, dass ein Tiefenlager durch grössere differenzielle Krustenbewegungen beeinträchtigt wird. Dies wird einerseits berücksichtigt bei der Evaluation der Konfiguration der bevorzugten Wirtgesteine in Schritt 5, indem regionalen Störungszonen ausgewichen wird (vgl. Indikator 'Abstand zu regionalen Störungszonen'), und andererseits in Zusammenhang mit der detaillierten Standortexploration. Für die Standortwahl von untergeordneter Bedeutung ist die Seismizität hingegen in Bezug auf seismische Erschütterungen, denn sowohl die Anlagen an der Oberfläche wie auch die untertägigen Anlagen können auf entsprechende seismische Belastungen ausgelegt werden.

Weitere für die Langzeitstabilität relevante Indikatoren sind: 'Grossräumige Erosion im Betrachtungszeitraum', 'Seltene geologische Ereignisse (Vulkanismus)', 'Modellvorstellung zur Geodynamik und Neotektonik' und 'Modellvorstellungen zu geochemischen Vorgängen'. Die Anforderungen und Bewertungsskalen für diese Indikatoren werden separat diskutiert.

3. Erläuterung der Anforderungen und Bewertungsskalen

Der Indikator 'Seismizität' fliesst in die Evaluation der Grossräume und Konfigurationen ein (s. oben). Es werden keine Mindest- und verschärfte Anforderungen für den Indikator festgelegt.

- **Bewertungsskalen für SMA und HAA** (Schritte 3.3 und 5.3) – Der Indikator 'Seismizität' wird in Schritt 3.3 nur für die Beschreibung der Grossräume verwendet, aber nicht bei ihrer Bewertung bzw. Einengung, weil dies auf Stufe Grossraum nicht sinnvoll ist. Eine konfigurationsspezifische Bewertung erfolgt in Schritt 5.3 anhand der Karte mit historischen und instrumentell erfassten Erdbeben sowie konzeptionellen Überlegungen (Abgrenzung von Zonen (Herdregionen)): Als *günstig bis sehr günstig* für die Lagertypen SMA und HAA werden Zonen ohne erhöhte Seismizität eingestuft. Die Bewertung erfolgt graduell und berücksichtigt die unterschiedlichen Betrachtungszeiträume für SMA und HAA. Im Hinblick auf die unterschiedlichen Betrachtungszeiträume der beiden Lagertypen werden Zonen mit leicht erhöhter Seismizität (Teile des Alpennordrands und Graubündens) als *bedingt günstig bis günstig* (SMA-Lager) bzw. *bedingt günstig* (HAA-Lager) eingestuft. Zonen mit deutlich erhöhter Seismizität (Teile des Wallis, Region Basel) werden hingegen für beide Lagertypen gleichermassen als *ungünstig* beurteilt[106].

[106] Für HAA kommt die Bewertung der Zonen mit deutlich erhöhter Seismizität nicht zur Anwendung, weil die entsprechenden Grossräume schon in Schritt 3 ausgeschlossen wurden.

A1.25 Modellvorstellungen zu geochemischen Vorgängen

Festlegung der Anforderungen und Bewertungsskalen

Schritt/ Kriterium	Attribut	Anforderungen und Bewertungsskalen	
		SMA	**HAA**
3.3/2.1	Beschreibung	Der Indikator 'Modellvorstellungen zu geochemischen Vorgängen' wird nur für die Beschreibung der Grossräume verwendet; die Bewertung der dazu gehörenden Verkarstung wird wirtgesteins-spezifisch unter Berücksichtigung der geologischen Situation durchgeführt (vgl. Indikator 'Potenzial zur Bildung neuer Wasser-wegsamkeiten (Verkarstung)')	

Hintergrundinformationen

1. Relevanz für Langzeitsicherheit bzw. bautechnische Machbarkeit

Verkarstungsfähige Gesteine neigen unter spezifischen Bedingungen[107] zur Bildung neuer, u.U. hoch transmissiver Wasserwegsamkeiten; diese beeinträchtigen die Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften und bilden präferenzielle Radionuklid-Freisetzungspfade.

Relevante Sicherheitsfunktionen:	Isolation Gewährleistung der Langzeitstabilität
Relevante Elemente des Barrierensystems:	Geologische Situation
Sicherheitsrelevante Eigenschaften:	Beständigkeit der Standort- und Gesteins-eigenschaften (im Hinblick auf geochemische Vorgänge)

2. Beschreibung und zugehörige Grundlagen

Der Indikator 'Modellvorstellungen zu geochemischen Vorgängen' dient der Beurteilung der Karstbildung in Regionen mit topographisch ausgeprägtem Relief. Für die Grundlagen zur Verkarstungsfähigkeit der Gesteine wird auf den Indikator 'Potenzial zur Bildung neuer Wasser-wegsamkeiten (Verkarstung)' verwiesen.

3. Erläuterung der Anforderungen und Bewertungsskalen

Der Indikator 'Modellvorstellungen zu geochemischen Vorgängen' wird nur für die Beschreibung der weiter zu betrachtenden Grossräume verwendet, nicht aber für deren Identifikation und Bewertung; eine formelle Bewertung der Verkarstungsfähigkeit von Gesteinen wird wirtgesteinsspezifisch unter Berücksichtigung der geologischen Situation durchgeführt (vgl. Indikator 'Potenzial zur Bildung neuer Wasserwegsamkeiten (Verkarstung)').

---

[107] Betroffen sind verkarstungsfähige Gesteine vor allem in Oberflächennähe sowie in Regionen mit ausgeprägter Topographie bzw. hohen hydraulischen Gradienten.

A1.26 Seltene geologische Ereignisse (Vulkanismus)

Festlegung der Anforderungen und Bewertungsskalen

Schritt/ Kriterium	Attribut	Anforderungen und Bewertungsskalen	
		SMA	**HAA**
3.1/2.1	Mindest-anforderung (MA)	Innerhalb des Betrachtungszeit-raums von 100'000 Jahren wird keine vulkanische Aktivität erwartet	Innerhalb des Betrachtungszeit-raums von 1 Mio. Jahren wird keine vulkanische Aktivität erwartet
3.3/2.1	Sehr günstig	MA erfüllt	
5.3/2.1	Günstig	Aufgrund der strengen MA entfallen die Bewertungsstufen *günstig, bedingt günstig* und *ungünstig*	
	Bedingt günstig		
	Ungünstig		

Hintergrundinformationen

1. Relevanz für Langzeitsicherheit bzw. bautechnische Machbarkeit

Unter seltenen geologischen Ereignissen werden folgende Phänomene verstanden: Vulkanismus, eine mögliche Bruchbildung in Zusammenhang mit starken Erdbeben und Meteoriteneinschläge. Seltene geologische Ereignisse können die Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften über die erforderlichen Zeiträume massgeblich beeinflussen und sind deshalb für die Langzeitsicherheit relevant.

Relevante Sicherheitsfunktionen:	Isolation
	Gewährleistung der Langzeitstabilität
Relevante Elemente des Barrierensystems:	Geologische Situation
Sicherheitsrelevante Eigenschaften:	Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften

2. Beschreibung und zugehörige Grundlagen

Vulkanische Aktivität gab es in der jüngeren geologischen Vergangenheit (Miozän) in Südwestdeutschland (Hegau, Kaiserstuhl), wobei einzelne vulkanische Tuffschlote und Gänge auch im ans Hegau angrenzenden Gebiet der Schweiz bekannt sind. Dieser Vulkanismus ist aber seit mindestens 7 Millionen Jahren nicht mehr aktiv und es sind auch keine Anzeichen einer vulkanischen Wiederbelebung bekannt. Aus diesem Grund kann Vulkanismus in der Schweiz innerhalb des Betrachtungszeitraums mit grosser Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen werden.

Die Bruchbildung infolge (extrem seltener) starker Erdbeben wird mit den Indikatoren 'Abstand zu regionalen Störungszonen', 'Seismizität' und 'Modellvorstellungen zur Geodynamik und Neotektonik' erfasst. Die nicht-radiologischen Auswirkungen eines grossen Meteoriteneinschlags sind weitaus schwerwiegender als die zu erwartenden radiologischen Folgen. Aus diesem Grund

wird bei der Standortevaluation auf eine Beurteilung von Meteoriteneinschlägen verzichtet. Dieses Vorgehen steht im Einklang mit den Vorgaben in den behördlichen Richtlinien HSK-R-21 (HSK & KSA 1993) und G03 (HSK 2008a,b), wonach extrem seltene Vorgänge und Ereignisse und solche, die bedeutend schwerwiegendere nicht-radiologische Folgen haben (Einschlagen eines grossen Meteoriten), im Sicherheitsnachweis nicht betrachtet werden müssen.

3. Erläuterung der Anforderungen und Bewertungsskalen

Der Indikator 'Seltene geologische Ereignisse (Vulkanismus)' fliesst in die Evaluation der Grossräume in Schritt 3 und in die Evaluation der Konfigurationen in Schritt 5 ein (s. oben). Für den Indikator werden Mindestanforderungen (Schritt 3.1) und Bewertungsskalen (Schritte 3.3 und 5.3) festgelegt. Die Anforderungen und Bewertungsskalen für SMA und HAA sind identisch. Es werden keine verschärften Anforderungen für den Indikator festgelegt.

- **Mindestanforderungen für SMA und HAA** (Schritt 3.1) – Im Sinne einer Mindestanforderung werden nur diejenigen Grossräume weiter betrachtet, in denen innerhalb des Betrachtungszeitraums kein Vulkanismus erwartet wird.
- **Bewertungsskalen für SMA und HAA** (Schritte 3.3 und 5.3) – Aufgrund der strengen Mindestanforderung für SMA und HAA entfallen die Bewertungsstufen *günstig, bedingt günstig* und *ungünstig*; alle bewerteten Varianten (Grossräume bzw. Bereiche, welche die Mindestanforderung erfüllen) sind deshalb als *sehr günstig* einzustufen.

A1.27 Potenzial zur Bildung neuer Wasserwegsamkeiten (Verkarstung)

Festlegung der Anforderungen und Bewertungsskalen

Schritt/ Kriterium	Attribut	Anforderungen und Bewertungsskalen	
		SMA	**HAA**
4.1/2.1	Mindest-anforderung (MA)	Kein erhebliches Potenzial zur Bildung neuer Wasserwegsamkeiten durch Verkarstung	
4.3/2.1	Sehr günstig	Verkarstung ist nicht möglich	
	Günstig	Verkarstung ist unter speziellen Bedingungen nicht vollständig auszuschliessen	
	Ungünstig bis bedingt günstig (graduelle Abstufung)	Gewisses Verkarstungspotenzial vorhanden	
5.1/2.1	Mindest-anforderung (MA)	Keine Bereiche mit erheblichem Potenzial zur Bildung neuer Wasserwegsamkeiten im WG/EG durch Verkarstung, unter Berücksichtigung der hydrogeologischen Situation (Tiefenlage, Topographie)	
5.3/2.1	Bewertungs-skala	Bewertungsstufen wie in Schritt 4.3/Kriterium 2.1, zusätzlich unter Berücksichtigung der hydrogeologischen Situation (Tiefenlage, Topographie)	

Hintergrundinformationen

1. Relevanz für Langzeitsicherheit bzw. bautechnische Machbarkeit

Verkarstungsfähige Gesteine neigen unter spezifischen Bedingungen[108] zur Bildung neuer, u.U. hoch transmissiver Wasserwegsamkeiten; diese beeinträchtigen die Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften, da sie präferenzielle Radionuklid-Freisetzungspfade bilden können.

Relevante Sicherheitsfunktionen:	Isolation Gewährleistung der Langzeitstabilität
Relevante Elemente des Barrierensystems:	Geologische Situation
Sicherheitsrelevante Eigenschaften:	Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften

[108] Betroffen sind verkarstungsfähige Gesteine vor allem in Oberflächennähe sowie in Regionen mit ausgeprägter Topographie bzw. hohen hydraulischen Gradienten.

2. Beschreibung und zugehörige Grundlagen

In Karbonatgesteinen (einschliesslich ihrer metamorphen Homologa) und in Evaporiten (Anhydrit, Gips, Steinsalz) kann es durch Lösungsvorgänge zur Bildung neuer Wasserwegsamkeiten kommen (Verkarstung oder Subrosion). Verkarstung ist insbesondere in Oberflächennähe und in Regionen mit ausgeprägtem topographischem Relief bzw. hohen hydraulischen Gradienten (Alpen, Jura) zu erwarten; zum typischen Erscheinungsbild der Verkarstung gehören Dolinen, Karrenfelder, Karsthöhlen und Karstquellen.

Die Beurteilung erfolgt zweistufig: Zuerst wird die Verkarstungsfähigkeit wirtgesteinsspezifisch beurteilt (Schritt 4). Anschliessend wird sie einer zweiten, konfigurationsspezifischen Beurteilung unterzogen (Schritt 5), unter Berücksichtigung der hydrogeologischen Situation (Tiefenlage und Topographie).

3. Erläuterung der Anforderungen und Bewertungsskalen

Der Indikator 'Potenzial zur Bildung neuer Wasserwegsamkeiten (Verkarstung)' fliesst in die Evaluation der Wirtgesteine in Schritt 4 und in die Evaluation der Konfigurationen in Schritt 5 ein (s. oben). Für den Indikator werden Mindestanforderungen (Schritte 4.1 und 5.1) und Bewertungsskalen (Schritte 4.3 und 5.3) festgelegt. Die Anforderungen und Bewertungsskalen sind funktionaler Art und gelten sowohl für SMA als auch für HAA. Es werden keine verschärften Anforderungen für den Indikator festgelegt.

- **Mindestanforderung für SMA und HAA** (Schritt 4.1) – Gesteine mit erheblichem Potenzial zur Bildung neuer Wasserwegsamkeiten durch Verkarstung werden ausgeschlossen. Zur Beurteilung des Potenzials wird auch die hydrogeologische Situation (Tiefenlage und Topographie) im betrachteten Verbreitungsraum der Gesteine berücksichtigt.
- **Bewertungsskala für SMA und HAA** (Schritt 4.3) – Als *sehr günstig* werden Wirtgesteine eingestuft, in denen Verkarstung nicht möglich ist. Als *günstig* gelten Wirtgesteine, in denen eine Verkarstung zwar sehr unwahrscheinlich, unter speziellen Bedingungen aber nicht vollständig auszuschliessen ist. Diese Bedingungen werden dann in Schritt 5.3 konfigurationsspezifisch überprüft. Als *ungünstig* bis *bedingt günstig* gelten Wirtgesteine, die zwar die Mindestanforderung erfüllen, aber dennoch ein gewisses Verkarstungspotenzial aufweisen. Die Abstufung zwischen diesen letzteren Bewertungsstufen erfolgt graduell (Expertenbeurteilung).
- **Mindestanforderung für SMA und HAA** (Schritt 5.1) – Bereiche, in denen die Wirtgesteine bzw. die einschlusswirksamen Gebirgsbereiche[109] ein erhebliches Potenzial zur Bildung neuer Wasserwegsamkeiten durch Verkarstung aufweisen, werden ausgeschlossen. Diese zweite, verfeinerte Beurteilung der Verkarstungsfähigkeit erfolgt konfigurationsspezifisch, d.h. unter Berücksichtigung der lokalen hydrogeologischen Situation. Konkret wird überprüft, ob das Wirtgestein in Oberflächennähe liegt und ob aufgrund der topographischen Situation mit erhöhten hydraulischen Gradienten zu rechnen ist.
- **Bewertungsskala für SMA und HAA** (Schritt 5.3) – Gleiche Bewertungsskala wie für Schritt 4.3, hier aber unter Berücksichtigung der lokalen hydrogeologischen Situation. Die Überprüfung der Distanz des Wirtgesteins von der Oberfläche sowie der topographischen Situation führt allenfalls zu einem ungünstigeren Ergebnis als bei der Wirtgesteinsbewertung in Schritt 4.3 und somit zu einem Abzug von der dortigen Bewertung.

[109] Dies betrifft diejenigen Wirtgesteine, welche ein gewisses Verkarstungspotenzial besitzen oder eine Verkarstung unter speziellen Bedingungen nicht ausgeschlossen werden kann. Diejenigen Gesteine, welche ein erhebliches Verkarstungspotenzial besitzen, wurden bereits in Schritt 4 ausgeschlossen.

A1.28 Grossräumige Erosion im Betrachtungszeitraum

Festlegung der Anforderungen und Bewertungsskalen

Schritt/ Kriterium	Attribut	Anforderungen und Bewertungsskalen	
		SMA	**HAA**
3.1/2.2	Mindest-anforderung (MA)	≤ 2 mm/a	≤ 0.4 mm/a
3.3/2.2	Günstig bis sehr günstig	*Sehr günstig*: ≤ 0.4 mm/a (inkl. negative Werte) *Günstig*: 0.4 – 1 mm/a Zusätzlich für Alpen und Faltenjura, bei der Bewertung Berücksichtigung des Potenzials für lokale Erosion	≤ 0.4 mm/a (inkl. negative Werte; graduelle Abstufung) Potenzial für lokale Erosion durch Ausschluss von Grossräumen (Alpen, Faltenjura) durch andere Indikatoren berücksichtigt
	Ungünstig bis bedingt günstig (graduelle Abstufung)	1 – 2 mm/a Zusätzlich für Alpen und Faltenjura, bei der Bewertung Berücksichtigung des Potenzials für lokale Erosion	– Potenzial für lokale Erosion durch Ausschluss von Grossräumen (Alpen, Faltenjura) durch andere Indikatoren berücksichtigt
5.3/2.2	Bewertungs-skala	Bewertungsstufen wie in Schritt 3.3/Kriterium 2.2 Bei der Bewertung von Bereichen mit starkem topographischen Relief, zusätzlich Berücksichtigung der lokalen Erosion	

Die Anforderungen und Bewertungsskalen an die grossräumige Erosion werden anhand der Hebungsrate formuliert.

Hintergrundinformationen

1. Relevanz für Langzeitsicherheit bzw. bautechnische Machbarkeit

Der Indikator 'Grossräumige Erosion im Betrachtungszeitraum' wird anhand der grossräumigen Hebungsrate beurteilt, unter Einbezug allgemeiner geologischer Erfahrungen. Er dient der Beurteilung der Auswirkungen der grossräumigen flächenhaften Erosion auf die Langzeitsicherheit, und berücksichtigt auch den Einfluss der Dekompaktion sowie die Freilegung des Tiefenlagers durch langfristige Hebung/Erosion.

Relevante Sicherheitsfunktionen:	Isolation Gewährleistung Langzeitstabilität Einschluss
Relevante Elemente des Barrierensystems:	Technische Barrieren Geologische Situation
Sicherheitsrelevante Eigenschaften:	Physische Trennung der Abfälle vom menschlichen Lebensraum Schutz des Lagers vor Prozessen und Ereignissen an der Erdoberfläche (z.B. Erosion) Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften Geometrische Bedingungen

2. Beschreibung und zugehörige Grundlagen

Der Indikator 'Grossräumige Erosion im Betrachtungszeitraum' ist eng verknüpft mit den Indikatoren 'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf flächenhafte Erosion' und 'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteins-Dekompaktion'. Die Argumentation ist daher über weite Strecken identisch.

Gestützt auf die allgemeinen Kenntnisse über die geomorphologische Entwicklungsgeschichte der Schweiz kann man von der plausiblen Annahme ausgehen, dass die Geländeformen in den nächsten 100'000 Jahren wie in der jüngeren geologischen Vergangenheit in den Grundzügen erhalten bleiben und dass die Erosion mit der Hebung ungefähr Schritt halten wird. Somit dürften die grossräumigen Erosionsraten in derselben Grössenordnung liegen wie die grossräumigen Hebungsraten. Je nach Grossraum muss jedoch auch einer fortschreitenden Einebnung der Topographie sowie der lokalen Erosion die nötige Beachtung geschenkt werden. Für einen Betrachtungszeitraum von 1 Million Jahren gelten grundsätzlich die gleichen Aussagen, wobei jedoch die Ungewissheiten über die zukünftigen Hebungs- und Erosionsraten grösser sind.

Unter den genannten Voraussetzungen ergibt sich somit die grossräumige Erosion als Produkt aus Betrachtungszeitraum und Hebungsrate. Die Hebungsrate wird aus der Karte der rezenten vertikalen Krustenbewegungen übernommen (Nagra 2008b, Fig. 3.2-3). Diese Karte zeigt die rezenten Hebungs- bzw. Senkungsraten relativ zu einem Referenzpunkt bei Laufenburg und basiert auf wiederholten Präzisionsnivellement-Messungen aus dem Zeitraum zwischen 1896 und 2006. Die Werte variieren zwischen etwa -0.3 mm/a und 1.5 mm/a. Es bestehen klare regionale Unterschiede mit markant erhöhten Hebungsraten in den Alpen. Die Werte stellen zwar nur eine Momentaufnahme dar, sind aber kompatibel mit den allgemeinen geodynamischen Modellvorstellungen, den aus Mineralabkühlungsaltern abgeleiteten Langzeithebungs- und Erosionsraten der Alpen und den mit Hilfe von kosmogenen Nukliden in rezenten Flussablagerungen bestimmten grossräumigen Erosionsraten der letzten 500 bis 10'000 Jahre. Die rezenten Hebungsraten in der Nordostschweiz stimmen auch mit den aus geomorphologischen Studien (Zeitraum: letzte 10'000 bis 2 Millionen Jahre) bzw. der Beckenmodellierung (Zeitraum: letzte 5 bis 10 Millionen Jahre) abgeleiteten Werten überein oder liegen etwas höher als die langfristigen Erosionsraten. Eine mögliche Erklärung für vergleichsweise höhere rezente Hebungsraten ist eine fortdauernde isostatische Ausgleichsbewegung nach dem Abschmelzen der Gletscher der letzten Eiszeit.

3. Erläuterung der Anforderungen und Bewertungsskalen

Der Indikator 'Grossräumige Erosion im Betrachtungszeitraum' fliesst in die Evaluation der Grossräume in Schritt 3 und in die Evaluation der Konfigurationen in Schritt 5 ein (s. oben). Für den Indikator werden Mindestanforderungen (Schritt 3.1) und Bewertungsskalen (Schritte 3.3 und 5.3) festgelegt.

- **Mindestanforderungen für SMA und HAA** (Schritt 3.1) – Als Mindestanforderung werden in Schritt 3.1 Hebungsraten von maximal 2 mm/a für SMA und 0.4 mm/a für HAA verlangt. Der Wert von 2 mm/a entspricht der aufgerundeten Obergrenze der in der Schweiz beobachteten Hebungsraten, und 0.4 mm/a entspricht der Obergrenze der Hebungsraten in den Grossräumen, die für HAA in Frage kommen. Multipliziert mit dem jeweiligen Betrachtungszeitraum (10^5 Jahre für SMA und 10^6 Jahre für HAA) ergeben sich Beträge der grossräumigen Erosion von 200 m und 400 m, konsistent mit den Mindestanforderungen für den Indikator 'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf flächenhafte Erosion'.
- **Bewertungsskala für SMA** (Schritte 3.3 und 5.3) – Bei der Bewertung in Schritt 3.3 werden für SMA grundsätzlich die Hebungsraten unter 0.4 mm/a als *sehr günstig* eingestuft, 0.4 – 1 mm/a als *günstig* und 1 – 2 mm/a als *ungünstig* bis *bedingt günstig* (mit gradueller Abstufung). Zusätzlich wird für die Alpen und den Faltenjura mittels Experteneinschätzung das Potenzial für lokale Erosion berücksichtigt. Bei der Bewertung in Schritt 5.3 werden die gleichen Bewertungsstufen verwendet wie in Schritt 3.3. Im Unterschied zu Schritt 3.3 wird nun allerdings nicht das *Potenzial* für lokale Erosion in die Bewertung einbezogen, sondern die lokale Erosion selbst. In Bereichen mit starkem topographischem Relief könnte die lokale Erosion zu einer gewissen Einebnung der Topographie und damit lokal zu höheren Erosionsraten führen als man aufgrund der Hebungsraten erwarten würde. Dieser Aspekt wird ebenfalls mit Hilfe von Experteneinschätzungen berücksichtigt.
- **Bewertungsskala für HAA** (Schritte 3.3 und 5.3) – Für HAA ergibt eine Hebungsrate von 0.4 mm/a die Bewertung *günstig,* und deutlich tiefere Hebungsraten werden als *sehr günstig* eingestuft. Unterhalb rund 0.5 mm/a ist es allerdings mit den vorhandenen Daten nur beschränkt möglich, eine verlässliche räumliche Differenzierung der Hebungsraten vorzunehmen, weshalb auch allgemeine geologische Kenntnisse und geodynamische Modellvorstellungen in die Bewertung einfliessen.

A1.29 Auflockerungszone im Nahbereich der Untertagebauten

Festlegung der Anforderungen und Bewertungsskalen

Schritt/ Kriterium	Attribut	Anforderungen und Bewertungsskalen	
		SMA	**HAA**
4.3/2.3		Transporteigenschaften im Nahbereich infolge Auflockerungszone für Langzeitsicherheit unter Berücksichtigung der Ausdehnung und des Selbstabdichtungsvermögens der Auflockerungszone sowie der Erfolgsaussichten für baulichen Massnahmen zum Ausräumen/ Unterbruch der Auflockerungszone in Schlüsselzonen:	
	Sehr günstig	Sehr kleine Auflockerungszone oder hohes Selbstabdichtungspotenzial, keine durchgehende hydraulische Verbindung entlang der Lagerstollen oder der Versiegelungsstrecken, kein hydraulischer Kurzschluss zwischen hydraulisch wirksamen Störungszonen	
	Günstig bis bedingt günstig (graduelle Abstufung)	Auflockerungszone wenig bis teilweise relevant oder weitgehend ohne Einfluss bzw. nicht dominant für den Radionuklidtransport (abhängig von den oben angegebenen Eigenschaften wie Selbstabdichtungsvermögen, mögliche bauliche Massnahmen etc.)	
	Ungünstig	Auflockerungszone relevant oder massgebend für den Radionuklidtransport	
5.3/2.3	Bewertungs-skala	Bewertungsstufen wie in Schritt 4.3/Kriterium 2.3	

Hintergrundinformationen

1. Relevanz für Langzeitsicherheit bzw. bautechnische Machbarkeit

Die Ausbildung der Auflockerungszone (EDZ, englische Abkürzung für 'excavation-disturbed zone') hat Einfluss auf das Transportverhalten der Radionuklide im Nahfeld. Für die Langzeitsicherheit des HAA-Lagers ist die Bildung bzw. das Langzeitverhalten einer EDZ primär im Bereich der Lagerstollen wichtig, während die EDZ im Falle des SMA-Lagers nur im Bereich der Versiegelungszonen wichtig ist und durch bautechnische Massnahmen beeinflussbar ist (z.B. Ausräumen/Unterbruch der EDZ). Wegen der hochporösen Kavernenverfüllung spielt die EDZ im Bereich der Kaverne nur eine untergeordnete Rolle.

Relevante Sicherheitsfunktionen:	Rückhaltung Kleine Freisetzungsraten
Relevante Elemente des Barrierensystems:	WG/EG
Sicherheitsrelevante Eigenschaften:	Geringe Beeinträchtigung der Barrierenwirkung des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs durch lagerbedingte Einflüsse

2. Beschreibung und zugehörige Grundlagen

Das Verhalten des Wirtgesteins bezüglich Bildung einer EDZ und deren langfristiger Selbstabdichtung nach der Verfüllung und Aufsättigung hängt sowohl von den Wirtgesteinseigenschaften als auch von den standortbezogenen Bedingungen ab, insbesondere von der Gebirgsspannung in der betrachteten Tiefenlage sowie von der Grösse, Form und Orientierung der Lagerkammern. Zudem wird die Selbstabdichtung einer Auflockerungszone begünstigt, wenn das Quellen des Verfüllungs-/Versiegelungsmaterials einen radial nach aussen gerichteten Druck auf die Auflockerungszone bewirkt. Nachstehend werden nur die wirtgesteinsbezogenen Aspekte diskutiert.

Massgebend für die Bewertung der Wirtgesteine ist nicht die Durchlässigkeit der EDZ beim Auffahren der Untertagebauten, sondern die erwartete langfristige Durchlässigkeit und die radiale Ausdehnung der EDZ im Nahbereich der Hohlräume unter Berücksichtigung von bautechnischen Massnahmen und der Langzeitentwicklung des Lagers.

Bei der Beurteilung müssen die Durchlässigkeiten des intakten Wirtgesteins, die zeitabhängigen Prozesse bei der Ausbildung der EDZ, der Einfluss einer möglichen Selbstabdichtung (Desintegration, Quellen des Gebirges sowie des Verfüllmaterials, mechanische Belastung der EDZ) und die Möglichkeiten einer bautechnischen Reduktion der EDZ (Nachprofilierung der Hohlräume bzw. Unterbrechung einer kontinuierlichen EDZ, vgl. EDZ cut-off nach Armand et al. 2008) gemeinsam betrachtet werden. Damit geht auch das Selbstabdichtungsvermögen einer Formation und bei tonhaltigen Gesteinen der Tongehalt implizit in die Beurteilung ein (vgl. auch die Diskussion des Indikators 'Selbstabdichtungsvermögen').

Im Falle des SMA-Lagers liegt das Hauptaugenmerk auf der EDZ im Bereich der Versiegelungszone. Die EDZ um die Kavernen hat nur einen untergeordneten Einfluss auf das Transportverhalten der Radionuklide, da die Kavernenverfüllung hauptsächlich aus hochporösem Mörtel besteht und die hydraulische Durchlässigkeit der EDZ in axialer Richtung gegenüber derjenigen im Mörtel in aller Regel kleiner ist.

Im Falle des HAA-Lagers kommt der EDZ im Bereich der Lagerstollen eine grosse Bedeutung zu, da die hydraulische Durchlässigkeit in der Stollenverfüllung klein ist. Die EDZ kann hier weder ausgeräumt noch mit anderen baulichen Massnahmen abgedichtet oder verstärkt werden. Eine derartige bautechnische Massnahme bleibt im HAA-Lager daher auf den Bereich der Versiegelungen beschränkt.

Bei der Beurteilung der EDZ können ebenfalls die existierenden und für diese Fragestellung relevanten Sicherheitsanalysen und Sensitivitätsstudien für die Wirtgesteine Opalinuston (Nagra 2002a, c-d, Smith et al. 2004), Kristallin (Nagra 1994a) und Mergel-Formationen des Helvetikums (Nagra 1994b, Nagra 1997) berücksichtigen werden.

3. Erläuterung der Anforderungen und Bewertungsskalen

Der Indikator 'Auflockerungszone im Nahbereich der Untertagebauten' fliesst in die Beurteilung der bevorzugten Wirtgesteine in Schritt 4.3 und der bevorzugten Bereiche in Schritt 5.3 ein (s. oben). Dabei werden die Transporteigenschaften im Nahbereich der Lagerkammern im Hinblick auf die Langzeitsicherheit bewertet, unter Berücksichtigung der Ausdehnung und des Selbstabdichtungsvermögens der EDZ sowie der Erfolgsaussichten für baulichen Massnahmen zum Ausräumen/Unterbruch der EDZ in Schlüsselzonen. Es werden keine Mindestanforderungen und verschärften Anforderungen für den Indikator festgelegt. Im Falle des SMA-Lagers wird die EDZ im Bereich der Versiegelungsstrecken beurteilt, im Falle des HAA-Lagers im Bereich der Lagerstollen.

- **Bewertungsskala für SMA und HAA** (Schritte 3.3 und 5.3) – Als *sehr günstig* wird eine Situation eingestuft, in der die EDZ keinen nennenswerten Einfluss auf die Langzeitsicherheit hat: Dies gilt für eine sehr kleine EDZ oder ein grosses Selbstabdichtungsvermögen, die eine durchgehende hydraulische Verbindung entlang der HAA-Lagerstollen oder der Versiegelungsstrecken unterbinden. Damit werden hydraulische Kurzschlüsse zwischen hydraulisch wirksamen Störungszonen vermieden. Als *ungünstig* wird eine Situation eingestuft, bei der die EDZ den Radionuklidtransport – unter Berücksichtigung möglicher hydraulischer Kurzschlüsse zwischen hydraulisch wirksamen Störungszonen – massgeblich beeinflusst. Zwischen den Bewertungsstufen *sehr günstig* und *ungünstig* erfolgt eine graduelle Abstufung in der Bewertung, je nach Ausdehnung und Selbstabdichtungsvermögen der EDZ sowie der Erfolgsaussichten für bauliche Massnahmen zum Ausräumen/Unterbruch der EDZ in Schlüsselzonen. Die Bewertungsskalen für die Schritte 3.3 und 5.3 sind identisch.

A1.30 Chemische Wechselwirkungen

Festlegung der Anforderungen und Bewertungsskalen

Schritt/ Kriterium	Attribut	Anforderungen und Bewertungsskalen	
		SMA	**HAA**
4.3/2.3	Sehr günstig	Ausdehnung der pH-Fahne auf direkte Umgebung der Lagerkammern begrenzt, keine signifikante Mineralumwandlung durch O_2-Oxidation	
	Günstig	Ausdehnung der pH-Fahne auf nähere Umgebung der Lagerkammern begrenzt, aber erhöhte Ungewissheit bezüglich Ausdehnung; keine signifikante Mineralumwandlung durch O_2-Oxidation	
	Ungünstig bis bedingt günstig (graduelle Abstufung)	Weitläufige Ausdehnung der pH-Fahne entlang von Fliesspfaden; signifikante Mineralumwandlung durch O_2-Oxidation	
5.3/2.3	Bewertungs-skala	Bewertungsstufen wie in Schritt 4.3/Kriterium 2.3	

Hintergrundinformationen

1. Relevanz für Langzeitsicherheit bzw. bautechnische Machbarkeit

Chemische Wechselwirkungen zwischen den Abfällen und technischen Barrieren einerseits und dem Wirtgestein andererseits haben Einfluss auf die Langzeitstabilität der Gesteinseigenschaften und damit auf das langfristige Transportverhalten der Radionuklide im Nahfeld und in der Geosphäre.

Relevante Sicherheitsfunktionen:	Rückhaltung Kleine Freisetzungsraten
Relevante Elemente des Barrierensystems:	WG/EG
Sicherheitsrelevante Eigenschaften:	Geringe Beeinträchtigung der Barrierenwirkung des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs durch lagerbedingte Einflüsse

2. Beschreibung und zugehörige Grundlagen

Die wichtigsten chemischen Wechselwirkungen zwischen den Abfällen und technischen Barrieren einerseits und dem Wirtgestein andererseits sind die potenzielle Ausbreitung von Zementporenwässern im Umfeld der Lagertunnels (SMA und LMA) und die Oxidation des Wirtgesteins durch Luftsauerstoff als Folge der Exkavation.

Hoch-pH-Fahne (vgl. auch Kap. 4.6.2):

Im Wechselkontakt mit dem Porenwasser des Wirtgesteins degradiert der Zement in den Tunnels eines SMA- oder LMA-Lagers, sodass sich um diese Tunnels alkalisches Porenwasser ausbreitet (Hoch-pH-Fahne), welches die geochemischen Bedingungen (Porenwasserchemie), aber auch die Wirtgesteinsmineralogie verändert. Dadurch wird sich die Sorption radioelement-spezifisch verändern; die Gesamtretardierung der Radionuklide im Einflussbereich einer pH-Fahne ist aber der Gesamtretardierung im ungestörten Wirtgestein etwa ebenbürtig (Bradbury & Baeyens 1997 und 2004). Die Geschwindigkeit sowohl der Zementdegradation als auch der Ausbreitung einer Hoch-pH-Fahne hängt stark vom Wasserfluss durch das Nahfeld ab, also von der hydraulischen Durchlässigkeit des Wirtgesteins. In der Entwicklung einer Hoch-pH-Fahne und in der Ungewissheit dieser Entwicklung unterscheiden sich homogen poröse Gesteine mit diffusionsdominiertem Transport von geklüfteten Gesteinen mit advektiv dominiertem Transport.

Bei einem homogen porösen Gestein mit diffusionsdominiertem Transport wie etwa Opalinuston verlaufen die Zementdegradation und die Entwicklung einer Hoch-pH-Fahne wegen des geringen Wasseraustauschs zwischen dem Gestein und dem zementierten Nahfeld und wegen der hohen Pufferkapazität des Gesteins sehr langsam über Millionen von Jahren. Eine Hoch-pH-Fahne ist örtlich beschränkt und würde sich weniger als 10 Meter in das Gestein ausdehnen, selbst wenn sämtlicher Zementstein in den Kavernen degradiert würde (Nagra 2002a, c).

Die Ungewissheit über die Folgen einer Hoch-pH-Fahne für geklüftete Gesteine ist grösser (Nagra 1994b, Bradbury & Baeyens 1997). Aber auch hier kann davon ausgegangen werden, dass die Transmissivität der Fliesspfade unter dem Einfluss einer Hoch-pH-Fahne wegen Mineralumwandlungen mit der Zeit tendenziell abnimmt. Im pessimistischen Randbereich der oben erwähnten Ungewissheit steht das Szenarium, bei welchem die Fliesswege sich nicht verschliessen, die Fliessgeschwindigkeit tendenziell zunimmt, und die Porosität wegen Mineralumwandlungen in der an die Fliesswege angrenzenden Matrix verringert wird, was ihre Rückhaltefähigkeit für Radionuklide beeinträchtigen würde. Bei einer geringen Transmissivität der wasserführenden Systeme in Lagertiefe wird dies aber als wenig bedeutend beurteilt.

Oxidation des Wirtgesteins:

Der Sauerstoff der belüfteten Tunnels wird gewisse Mineralien im Wirtgestein oxidieren. Im Vordergrund steht die Oxidation von Pyrit unter Bildung von Sulfat, Eisen(III)hydroxiden und Säure, welche in der Regel durch das Karbonatsystem gepuffert wird. Das Ausmass der Oxidation hängt von der Dauer der Offenhaltung der Lagertunnels ab.

Das Sulfat, welches als Gips intermediär abgelagert wird, beeinflusst zwar die Porenwasser- und die Zementchemie, hat aber für die Langzeitsicherheit kaum grössere Konsequenzen. Gravierender wären von O_2 verursachte oxidierenden Bedingungen, unter welchen die meisten Redox-sensitiven Radionuklide mobiler werden können, und der Verlust an Redox-puffernden Mineralen. Oxidierende Bedingungen sind voraussichtlich örtlich und zeitlich beschränkt. Zur Beurteilung dieses Aspekts werden auch Beobachtungen in älteren Untertagebauten verwendet.

Eisenkorrosionsprodukte:

Die Korrosion der Endlagerbehälter führt zu immobilen Produkten. Deren Einfluss bleibt auf das Nahfeld beschränkt.

Chemische Fahne:

Im Abfall (SMA und LMA) enthaltene organische und anorganische Stoffe, welche Radionuklide mobilisieren können, werden auch in das Wirtgestein gelangen, wenn sie nicht im Nahfeld zurückgehalten oder abgebaut werden. Die sorptionsmindernde Wirkung solcher Stoffe ist aber im Wirtgestein geringer als im Nahfeld, weil die Konzentrationen kleiner sind und weil andere chemische Bedingungen herrschen (tieferer pH-Wert).

3. Erläuterung der Anforderungen und Bewertungsskalen

Der Indikator 'Chemische Wechselwirkungen' fliesst in die Bewertung der bevorzugten Wirtgesteine in Schritt 4.3 und der bevorzugten Bereiche in Schritt 5.3 ein. Die Bewertungsskalen für SMA und HAA werden als identisch angenommen. Für den Indikator werden keine Mindestanforderungen und verschärften Anforderungen festgelegt.

In vielen Fällen ist eine Hoch-pH-Fahne kein Nachteil für die Radionuklidrückhaltung im Wirtgestein. Die Bewertung erfolgt aber aufgrund der oben beschriebenen Ungewissheit, d.h. basierend auf dem pessimistischen Randbereich dieser Ungewissheit bei geklüfteten Systemen.

- **Bewertungsskala für SMA und HAA** (Schritte 4.3 und 5.3) – *Sehr günstig,* wenn die Ausdehnung der pH-Fahne auf die direkte Umgebung der Lagerkammern begrenzt ist und wenn keine signifikante Mineralumwandlung durch O_2-Oxidation auftritt; *günstig,* wenn die Ausdehnung der pH-Fahne auf die nähere Umgebung der Lagerkammern begrenzt ist, aber eine erhöhte Ungewissheit bezüglich ihrer Ausdehnung besteht, und wenn überdies keine signifikante Mineralumwandlung durch O_2-Oxidation auftritt; *ungünstig* bis *bedingt günstig* (mit gradueller Abstufung), wenn eine weitläufige Ausdehnung der pH-Fahne entlang von Fliesspfaden sowie eine signifikante Mineralumwandlung durch O_2-Oxidation auftritt. Die etwas dehnbaren Formulierungen lassen erkennen, dass sich die Bewertung bis zu einem gewissen Grad auf Experteneinschätzungen abstützen muss.

A1.31 Verhalten des Wirtgesteins bzgl. Gas

Festlegung der Anforderungen und Bewertungsskalen

Schritt/ Kriterium	Attribut	Anforderungen und Bewertungsskalen	
		SMA	**HAA**
4.3/2.3	Sehr günstig	Gas kann ohne Beeinträchtigung der Barriereneigenschaften durch das Wirtgestein entweichen; bauliche Massnahmen zur Speicherung oder Ableitung der im Lager produzierten Gase sind nicht notwendig	
	Günstig	Gas kann ohne Beeinträchtigung der Barriereneigenschaften durch das Wirtgestein entweichen; zusätzlich sind aber voraussichtlich bauliche Massnahmen zur untertägigen Speicherung eines Teils der im Lager produzierten Gase notwendig	
	Ungünstig bis bedingt günstig (graduelle Abstufung)	Es ist ungewiss, ob Gas ohne Beeinträchtigung der Barriereneigenschaften durch das Wirtgestein entweichen kann, es sind deshalb bauliche Massnahmen zur Ableitung der im Lager produzierten Gase entlang der Zugangsbauwerke notwendig (graduelle Abstufung nach Gasspeicher- und Gastransportkapazität des Wirtgesteins)	
5.3/2.3	Bewertungs-skala	Bewertungsstufen wie in Schritt 4.3/Kriterium 2.3	

Hintergrundinformationen

1. Relevanz für Langzeitsicherheit bzw. technische Machbarkeit

Die Freisetzung von im Lager produzierten Gasen kann einen Einfluss auf die Langzeitstabilität der Gesteinseigenschaften und damit auf das langfristige Transportverhalten der Radionuklide im Nahfeld und in der Geosphäre haben.

Relevante Sicherheitsfunktionen:	Rückhaltung Kleine Freisetzungsraten
Relevante Elemente des Barrierensystems:	WG/EG
Sicherheitsrelevante Eigenschaften:	Geringe Beeinträchtigung der Barrierenwirkung des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs durch lagerbedingte Einflüsse

2. Beschreibung und zugehörige Grundlagen

Der Indikator 'Verhalten des Wirtgesteins bzgl. Gas' dient der Beurteilung der möglichen Auswirkungen von im Lager produzierten Gasen auf die Barriereneigenschaften des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs. Wichtige Einflussgrössen sind die Gasproduktionsraten, das Gastransport- und Gasspeichervermögen des Wirtgesteins sowie die Möglichkeiten für bauliche Massnahmen zur Speicherung und Ableitung der im Lager produzierten Gase.

Die wichtigsten Gasbildungsprozesse sind die anaerobe Korrosion von Metallen, die Degradation von Organika und die Radiolyse. Die damit verbundenen Gasproduktionsraten sind abhängig von der Art und Menge der Abfälle sowie von den geochemischen Bedingungen im untertägigen Lagerbereich. Die Auswirkungen der Gasproduktion auf die Langzeitsicherheit wurden im Rahmen des Entsorgungsnachweises für ein HAA-Lager (Nagra 2002a, c) und des Projekts Wellenberg für ein SMA-Lager (Nagra 1994b, Nagra 1997) sowie in einer neueren Studie für ein SMA-Lager (Nagra 2008h) untersucht. Die Hauptergebnisse bzgl. Gasmigration (unter Berücksichtigung der Gasspeicherung) und des damit verbundenen Radionuklidtransports sind in Kap. 4.6.4 des vorliegenden Berichts zusammengefasst. Um die Auswirkungen der im Lager produzierten Gase zu minimieren, gibt es ferner ein breites Spektrum von möglichen baulichen Massnahmen (Nagra 2002c, Nagra 2008h). Im Falle der HAA handelt es sich primär um die Wahl des Behältermaterials (z.B. Kupfer statt Stahl). Bei den LMA/SMA sind verschiedene Massnahmen möglich: Vorgaben an die Abfallproduzenten zur Minimierung der Gas produzierenden Materialien und zur Behandlung der Abfälle, günstige Platzierung der Abfälle innerhalb der Lagerkammern und Verwendung geeigneter Verfüllungen bzw. Versiegelungen.

Die Anforderungen für den Indikator 'Verhalten des Wirtgesteins bzgl. Gas' stützen sich auf die oben erwähnten Untersuchungen der Nagra sowie auf zahlreiche weitere Untersuchungen von nationalen und internationalen Organisationen. Die gestellten Anforderungen sind funktionaler Art, da das Zusammenspiel der relevanten Prozesse komplex ist und sich nicht auf einfache Art anhand von quantitativen Anforderungen für einzelne Messgrössen ausdrücken lässt.

Die Anforderungen bzgl. natürlicher Gasvorkommen werden im Rahmen der Indikatoren 'Natürliche Gasführung (im Wirtgestein)' und 'Geotechnische und hydrogeologische Verhältnisse in überlagernden Gesteinsformationen' festgelegt.

3. Erläuterung der Anforderungen und Bewertungsskalen

Der Indikator 'Verhalten des Wirtgesteins bzgl. Gas' fliesst in die Bewertung der bevorzugten Wirtgesteine in Schritt 4.3 und der bevorzugten Bereiche in Schritt 5.3 ein (s. oben). Die Bewertungsskalen für SMA und HAA sind identisch. Es werden keine Mindestanforderungen und verschärften Anforderungen verwendet.

- **Bewertungsskala für SMA und HAA** (Schritte 3.3 und 5.3) – Als mindestens *günstig* wird eine Situation eingestuft, in der die im Lager produzierten Gase ohne Beeinträchtigung der Barriereneigenschaften durch das Wirtgestein entweichen können. Die Abstufung erfolgt graduell, je nachdem ob zusätzliche bauliche Massnahmen zur untertägigen Speicherung eines Teils der im Lager produzierten Gase voraussichtlich notwendig sind (*günstig)* oder ob sich solche baulichen Massnahmen erübrigen (*sehr günstig*). Falls Ungewissheit besteht, ob die im Lager produzierten Gase ohne Beeinträchtigung der Barriereneigenschaften durch das Wirtgestein entweichen können, sind bauliche Massnahmen zur Ableitung der Gase entlang der Zugangsbauwerke notwendig. Die Bewertung dieser Situationen erfolgt graduell zwischen *ungünstig* bis *bedingt günstig*, je nach vorhandener Gasspeicher- und Gastransportkapazität des Wirtgesteins. Die Bewertungsskalen für die Schritte 3.3 und 5.3 sind identisch.

A1.32 Verhalten des Wirtgesteins bzgl. Temperatur

Festlegung der Anforderungen und Bewertungsskalen

Schritt/ Kriterium	Attribut	Anforderungen und Bewertungsskalen	
		SMA	**HAA**
4.3/2.3	Günstig bis sehr günstig (graduelle Abstufung)	– (nicht relevant)	Temperatur stellt kein Problem dar oder kann durch geringfügige bauliche oder betriebliche Massnahmen (z.B. durch Einlagerungsdichte) kontrolliert werden
	Ungünstig bis bedingt günstig (graduelle Abstufung)	– (nicht relevant)	Temperatur kann durch bauliche oder betriebliche Massnahmen mit erheblichem Aufwand kontrolliert werden
5.3/2.3	Bewertungsskala	– (nicht relevant)	Bewertungsstufen wie in Schritt 4.3/Kriterium 2.3

Hintergrundinformationen

1. Relevanz für Langzeitsicherheit bzw. bautechnische Machbarkeit

Die durch radioaktiven Zerfall verursachte Wärmeproduktion im Tiefenlager kann einen Einfluss auf die Langzeitstabilität der Gesteinseigenschaften und damit auf das langfristige Transportverhalten der Radionuklide im Nahfeld und in der Geosphäre haben.

Relevante Sicherheitsfunktionen:	Rückhaltung Kleine Freisetzungsraten
Relevante Elemente des Barrierensystems:	WG/EG
Sicherheitsrelevante Eigenschaften:	Geringe Beeinträchtigung der Barrierenwirkung des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs durch lagerbedingte Einflüsse

2. Beschreibung und zugehörige Grundlagen

Der Indikator 'Verhalten des Wirtgesteins bzgl. Temperatur' dient der Beurteilung der möglichen Auswirkungen der im Tiefenlager durch radioaktiven Zerfall verursachten Temperaturerhöhung auf die Barriereneigenschaften des Wirtgesteins. Aufgrund der bisherigen Erfahrungen im In- und Ausland sind die im SMA-Lager zu erwartenden Temperaturerhöhungen klein, d.h. die Barriereneigenschaften des Wirtgesteins werden thermisch nicht signifikant beeinflusst. Die typischen spezifischen Wärmeleistungen im HAA-Lager sind hingegen ungleich höher als im Falle des SMA-Lagers. Die damit verbundene Temperaturerhöhung kann grundsätzlich das Potenzial haben, die transportrelevanten Eigenschaften der technischen und geologischen Barrieren zu beeinträchtigen (vgl. Analysen und Berechnungen in Nagra 2002a, c). Zahlreiche Untersuchungen haben gezeigt, dass speziell der Wärmeeintrag in die Bentonit-Barriere in den HAA-Lagerstollen beachtet werden muss, damit die günstigen sicherheitstechnischen Eigenschaften

des Bentonits (z.B. seine Quellfähigkeit) nicht signifikant beeinträchtigt werden (vgl. Kap. 4.6.5). Weiterhin ist zu beachten, dass die Porenwasserdrücke im Wirtgestein nicht so stark ansteigen, damit eine erhebliche Ausweitung der Zone erhöhter hydraulischer Durchlässigkeit um die Lagerstollen vermieden werden kann. Als wichtigste Einflussgrössen gilt hier die Einlagerungsdichte, d.h. bauliche und betriebliche Massnahmen zur Kontrolle der Wärmeleistungsdichte (Dauer der Zwischenlagerung, Wärmeleistung pro Behälter, Abstände zwischen benachbarten Behältern sowie zwischen benachbarten Lagerstollen).

Die Bewertungsskalen für den Indikator 'Verhalten des Wirtgesteins bzgl. Temperatur' stützen sich auf den bisher durchgeführten Untersuchungen der Nagra sowie auf zahlreiche weitere Untersuchungen von nationalen und internationalen Organisationen. Die Festlegungen sind funktionaler Art und beziehen sich primär auf bauliche und betriebliche Massnahmen zur Kontrolle der Temperatur im untertägigen Bereich des Lagers HAA.

3. Erläuterung der Anforderungen und Bewertungsskalen

Der Indikator 'Verhalten des Wirtgesteins bzgl. Temperatur' fliesst in die Bewertung der für das HAA-Lager bevorzugten Wirtgesteine in Schritt 4.3 und der bevorzugten Bereiche in Schritt 5.3 ein (s. oben). Für den Indikator werden keine Mindestanforderungen und verschärften Anforderungen festgelegt. Aufgrund der nur geringfügig erhöhten Temperaturen im SMA-Lager gelangt dieser Indikator bei der Standortevaluation für ein SMA-Lager nicht zur Anwendung.

- **Bewertungsskala für HAA** (Schritte 3.3 und 5.3) – Als mindestens *günstig* wird eine Situation eingestuft, in der die Temperaturerhöhung im untertägigen Lagerbereich kein Problem darstellt oder durch geringfügige bauliche oder betriebliche Massnahmen kontrolliert werden kann. Als geringfügige Massnahme gilt beispielsweise die Kontrolle der Temperatur über die Einlagerungsdichte, welche ihrerseits durch eine moderat verlängerte Dauer der Zwischenlagerung, durch die Wärmeleistung pro Behälter (Beladung) sowie durch den Abstand zwischen benachbarten Behältern und zwischen benachbarten Lagerstollen mit vertretbarem Aufwand beeinflussbar ist. Falls die Temperatur durch bauliche oder betriebliche Massnahmen nur mit erheblichem Aufwand kontrolliert werden kann, so wird dies je nach Aufwand als *ungünstig* bis *bedingt günstig* eingestuft. Zu den Massnahmen mit erheblichem Aufwand gehören beispielsweise eine deutlich verlängerte Dauer der Zwischenlagerung für Brennelemente oder eine deutlich geringere Beladung der Behälter (bis hin zu einer Einzeleinlagerung von Brennelementen). Die Bewertungsskalen für die Schritte 3.3 und 5.3 sind identisch.

A1.33 Rohstoffvorkommen innerhalb des Wirtgesteins

Festlegung der Anforderungen und Bewertungsskalen

Schritt/ Kriterium	Attribut	Anforderungen und Bewertungsskalen	
		SMA	**HAA**
4.1/2.4	Mindest-anforderung (MA)	In absehbarer Zeit keine schwerwiegenden Konflikte in Zusammenhang mit der Nutzung von Rohstoffen innerhalb des Wirtgesteins. Kein Potenzial zur Verhinderung der Nutzung von Rohstoffen grosser Bedeutung (Interessensabwägung)	
4.3/2.4	Sehr günstig	Kein identifiziertes Nutzungspotenzial (keine Rohstoffe vorhanden, oder Rohstoffe sind zwar vorhanden, aber anderweitig viel einfacher und in praktisch unbeschränkter Menge erhältlich bzw. abbaubar)	
	Günstig	Mögliche Rohstoffvorkommen mit ungeklärtem aber wahrscheinlich geringem oder fraglichem Nutzungspotenzial	
	Bedingt günstig	Nachgewiesene Rohstoffvorkommen mit möglichem Nutzungs-potenzial, ohne derzeitige Nutzung, Rohstoffexploration im Gange oder geplant	
	Ungünstig	Hohes Rohstoffpotenzial mit aktiver Förderung	
5.3/2.3	Bewertungs-skala	Bewertungsstufen wie in Schritt 4.3/Kriterium 2.4	

Hintergrundinformationen

1. Relevanz für Langzeitsicherheit bzw. bautechnische Machbarkeit

Ein Nutzungskonflikt entsteht einerseits, wenn die Nutzung von vorhandenen Ressourcen durch das Tiefenlager verunmöglicht wird, oder wenn eine erhebliche Wahrscheinlichkeit des unbeabsichtigten menschlichen Eindringens in das Tiefenlager besteht bzw. eine Verletzung des Barrierensystems durch menschliche Aktivität erfolgt. Eine Verletzung des Barrierensystems kann bei der Exploration (Sondierbohrungen) und beim Abbau von Rohstoffen von der Oberfläche aus (Bohrungen) oder im tiefen Untergrund (Untertagebauten) entstehen. Dies kann die Langzeitstabilität des Barrierensystems bzw. die Langzeitsicherheit beeinträchtigen und unter Umständen einen direkten Radionuklid-Transportpfad vom Tiefenlager zur Biosphäre erzeugen.

Relevante Sicherheitsfunktionen:	Isolation Gewährleistung der Langzeitstabilität Einschluss
Relevante Elemente des Barrierensystems:	Technische Barrieren Geologische Situation
Sicherheitsrelevante Eigenschaften:	Physische Trennung der Abfälle vom menschlichen Lebensraum (Tiefenlage) Geringe Wahrscheinlichkeit von menschlichem Eindringen dank Abwesenheit von absehbaren Nutzungskonflikten Geometrische Bedingungen

2. Beschreibung und zugehörige Grundlagen

Mit dem Indikator 'Rohstoffvorkommen innerhalb des Wirtgesteins' werden wirtgesteinsbezogene Nutzungskonflikte (Verunmöglichung der Nutzung der Rohstoffe, erhebliche Wahrscheinlichkeit des unbeabsichtigten menschlichen Eindringens in den für die Langzeitsicherheit relevanten Bereich des Wirtgesteins bzw. einschlusswirksamen Gebirgsbereichs) beurteilt. Ein solcher besteht, wenn das Wirtgestein selbst ein nutzungswürdiger Rohstoff ist (Salz, Grundstoff für Bauindustrie[110]) oder wenn nutzungswürdige Rohstoffe (Erdöl, Erdgas, Kohle, Salz, Erze[111]) innerhalb des Wirtgesteins vorkommen. Schwerwiegende Nutzungskonflikte dieses Typs werden nach Möglichkeit vermieden. Die Bewertung der Nutzungskonflikte (insbesondere Wirtschaftlichkeit, Abbaumethoden) erfolgt unter Berücksichtigung der für das Lager relevanten Tiefenlage der Wirtgesteine.

Im Gegensatz zu einem wirtgesteinsspezifischen Nutzungskonflikt besteht ein konfigurationsbezogener Nutzungskonflikt, wenn nutzungswürdige Rohstoffe unterhalb oder oberhalb des Wirtgesteins auftreten. Die Festlegungen bzgl. konfigurationsbezogener Rohstoffkonflikte werden im Rahmen der Indikatoren 'Rohstoffvorkommen unterhalb des Wirtgesteins' und 'Rohstoffvorkommen oberhalb des Wirtgesteins' festgelegt. Andere Nutzungskonflikte können in Zusammenhang mit der Nutzung von Mineralquellen, Thermen und Geothermie bestehen; die Festlegungen bzgl. dieser Nutzungskonflikte werden im Rahmen der Indikatoren 'Mineralquellen und Thermen' und 'Geothermie' festgelegt. Eine detaillierte Diskussion der Grundlagen zur Beurteilung der Nutzungskonflikte findet sich in Nagra (2008c).

3. Erläuterung der Anforderungen und Bewertungsskalen

Der Indikator 'Rohstoffe innerhalb des Wirtgesteins' fliesst in die Evaluation der Wirtgesteine in Schritt 4 und in die Evaluation der Konfigurationen in Schritt 5 ein (s. oben). Für den Indikator wird eine Mindestanforderung in Schritt 4.1 sowie Bewertungsskalen für die Schritte 4.3 und 5.3 festgelegt. Die Anforderungen und Bewertungsskalen für SMA und HAA sind identisch. Es werden keine verschärften Anforderungen verwendet.

- **Mindestanforderungen für SMA und HAA** (Schritt 4.1) – In absehbarer Zeit sind keine schwerwiegenden Konflikte in Zusammenhang mit der Nutzung von Rohstoffen innerhalb des Wirtgesteins zu erwarten. Ferner soll kein Potenzial zur Verhinderung der Nutzung von

[110] Zum Beispiel Ton und Mergel als Rohstoffe für Ziegelei- und Zementindustrie.

[111] Erzvorkommen spielen in der Schweiz in der Regel keine bedeutende Rolle (mit gewissen Ausnahmen, z.B. Gonzen) und werden von der folgenden Diskussion ausgeklammert.

Rohstoffen grosser Bedeutung bestehen; dadurch erübrigt sich eine Interessensabwägung zwischen den durch die geologische Tiefenlagerung und durch eine potenzielle Ausbeutung von Rohstoffen erzielbaren (volkswirtschaftlichen) Nutzen.

- **Bewertungsskalen für SMA und HAA** (Schritte 4.3 und 5.3) – Die Beurteilung des Nutzungspotenzials (insbesondere Wirtschaftlichkeit, Abbaumethoden) erfolgt aus heutiger Sicht. Als *sehr günstig* werden Situationen ohne identifiziertes Nutzungspotenzial innerhalb des Wirtgesteins eingestuft: Entweder sind keine nutzungswürdigen Rohstoffe vorhanden, oder Rohstoffe sind zwar vorhanden, aber anderweitig viel einfacher und in praktisch unbeschränkter Menge erhältlich bzw. abbaubar. Als *günstig* werden mögliche Rohstoffvorkommen mit ungeklärtem, aber wahrscheinlich geringem oder fraglichem Nutzungspotenzial eingestuft. Nachgewiesene Rohstoffvorkommen innerhalb des Wirtgesteins mit einem möglichem Nutzungspotenzial, aber ohne derzeitige Nutzung, werden als *bedingt günstig* eingestuft, auch wenn eine Rohstoffexploration im Gange oder geplant ist. Ein hohes Rohstoffpotenzial innerhalb des Wirtgesteins mit aktiver Förderung wird als *ungünstig* beurteilt. In Schritt 5.3 gelangen identische Bewertungsstufen wie in Schritt 4.3 zur Anwendung.

A1.34 Rohstoffvorkommen unterhalb des Wirtgesteins

Festlegung der Anforderungen und Bewertungsskalen

Schritt/ Kriterium	Attribut	Anforderungen und Bewertungsskalen	
		SMA	**HAA**
5.1/2.4	Mindest-anforderung (MA)	In absehbarer Zeit keine schwerwiegenden Konflikte mit Potenzial zur Beeinträchtigung des Barrierensystems durch Nutzung von Rohstoffen unterhalb des Wirtgesteins. Kein Potenzial zur Verhinderung der Nutzung von Rohstoffen grosser Bedeutung (Interessensabwägung)	
5.3/2.4	Sehr günstig	Gebiete, in denen keine Kohlenwasserstoff-Ressourcen [1)] erwartet werden, und ohne Steinsalzvorkommen oder Top des Salzvorkommens liegt tiefer als 600 m u.T.	
	Günstig	Gebiete mit möglichen Kohlenwasserstoff –Ressourcen [1)] (auch in Zukunft kaum wirtschaftliche Bedeutung) und/oder Gebiete, in denen das Top des Salzvorkommens zwischen 500 und 600 m u.T. liegt	
	Ungünstig bis bedingt günstig (graduelle Abstufung)	Gebiete mit Kohlenwasserstoff –Ressourcen [1)] (in Zukunft wirtschaftliche Bedeutung möglich, heute Explorationstätigkeit) und/oder Gebiete, in denen das Top des Salzvorkommens zwischen 400 und 500 m u.T. bzw. darüber liegt (graduelle Abstufung)	

[1)] Gemäss Fig. 5.1-3 in Nagra (2008b); beinhaltet eine Bewertung der Kohlevorkommen.

Hintergrundinformationen

1. Relevanz für Langzeitsicherheit bzw. bautechnische Machbarkeit

Ein Nutzungskonflikt entsteht einerseits, wenn die Nutzung von vorhandenen Ressourcen durch das Tiefenlager verunmöglicht wird, oder wenn eine erhebliche Wahrscheinlichkeit des unbeabsichtigten menschlichen Eindringens in das Tiefenlager besteht bzw. eine Verletzung des Barrierensystems durch menschliche Aktivität erfolgt. Eine Verletzung des Barrierensystems kann bei der Exploration (Sondierbohrungen) und beim Abbau von Rohstoffen von der Oberfläche aus (Bohrungen) oder im tiefen Untergrund (Untertagebauten) entstehen. Dies kann die Langzeitstabilität des Barrierensystems bzw. die Langzeitsicherheit beeinträchtigen und unter Umständen einen direkten Radionuklid-Transportpfad vom Tiefenlager zur Biosphäre erzeugen.

Relevante Sicherheitsfunktionen:	Isolation Gewährleistung der Langzeitstabilität Einschluss
Relevante Elemente des Barrierensystems:	Technische Barrieren Geologische Situation
Sicherheitsrelevante Eigenschaften:	Physische Trennung der Abfälle vom menschlichen Lebensraum (Tiefenlage) Geringe Wahrscheinlichkeit von menschlichem Eindringen dank Abwesenheit von absehbaren Nutzungskonflikten Geometrische Bedingungen

2. Beschreibung und zugehörige Grundlagen

Mit dem Indikator 'Rohstoffvorkommen unterhalb des Wirtgesteins' werden konfigurationsbezogene Nutzungskonflikte in Zusammenhang mit Rohstoffen unterhalb des Wirtgesteins beurteilt (Verunmöglichung der Nutzung der Rohstoffe, erhebliche Wahrscheinlichkeit des unbeabsichtigten menschlichen Eindringens in den für die Langzeitsicherheit relevanten Bereich des Wirtgesteins bzw. einschlusswirksamen Gebirgsbereichs). Ein solcher besteht, wenn nutzungswürdige Rohstoffe (Erdöl, Erdgas, Kohle, Salz, Grundstoffe für Bauindustrie[112], Erze[113]) unterhalb des Wirtgesteins vorkommen. Schwerwiegende Nutzungskonflikte dieser Art werden bei der Wahl der bevorzugten Bereiche nach Möglichkeit vermieden. Die Bewertung der Nutzungskonflikte (insbesondere Wirtschaftlichkeit, Abbaumethoden) erfolgt aus heutiger Sicht und unter Berücksichtigung der Tiefenlage der Rohstoffvorkommen.

Es besteht ein enger Zusammenhang zwischen den Indikatoren 'Rohstoffvorkommen unterhalb des Wirtgesteins' und 'Rohstoffvorkommen oberhalb des Wirtgesteins', da sie teilweise in kausalem Zusammenhang stehen: Kohlenwasserstoffvorkommen oberhalb des Wirtgesteins habe ihren Ursprung oft in tieferen Gesteinsformationen unterhalb des Wirtgesteins. Die Festlegungen bzgl. wirtgesteinsbezogener Rohstoffkonflikte werden im Rahmen des Indikators 'Rohstoffvorkommen innerhalb des Wirtgesteins' festgelegt. Andere Nutzungskonflikte können in Zusammenhang mit der Nutzung von Mineralquellen, Thermen und Geothermie bestehen; die Festlegungen bzgl. dieser Nutzungskonflikte werden im Rahmen der Indikatoren 'Mineralquellen und Thermen' und 'Geothermie' festgelegt.

Trotz der seit über sechzig Jahren stattfindenden Explorationstätigkeit in der Schweiz wurden im Schweizer Mittelland bisher keine wirtschaftlich förderbaren Mengen an Erdöl, Erdgas oder Kohle gefunden (Lahusen & Wyss 1995, Kündig et al. 1997). Ausnahmen bilden die kleinen geförderten Gasmengen in der Bohrung Entlebuch-1 oder der Kohleabbau im Mittelland während des 1. und 2. Weltkriegs. Als Resultat dieser Explorationstätigkeit (ca. 45 Tiefbohrungen) sowie intensiver Tiefbautätigkeit (Stollen, Sondierbohrungen etc.) sind über 100 Lokalitäten mit oberflächlichen Erdgas- und über 65 Lokalitäten mit Erdölanzeichen bekannt. Anhand einer Potenzial-Analyse der verschiedenen Ressourcentypen wurden zwei SW-NE verlaufende Korridore mit der Potenzialklasse 1 (KW-Ressourcen mit möglicher wirtschaftlicher Bedeutung) von je 20 – 40 km Breite identifiziert. Diese sind in Fig. 5.1-3 in Nagra (2008b) zusammen mit den Lokalitäten mit den Erdgas- und Erdölanzeichen dargestellt. Diese Karte bildet die

[112] Zum Beispiel Ton und Mergel als Rohstoffe für Ziegelei- und Zementindustrie.

[113] Erzvorkommen spielen in der Schweiz in der Regel keine bedeutende Rolle (mit gewissen Ausnahmen, z.B. Gonzen) und werden von der folgenden Diskussion ausgeklammert.

Grundlage für die Bewertung der Nutzungskonflikte in Zusammenhang mit Kohlenwasserstoffen (Erdöl, Erdgas) und Kohle (vgl. Nagra 2008c). Ein potenzieller Konflikt könnte sich in Zukunft auch durch die Nutzung des Untergrundes für die CO_2-Sequestrierung ergeben. Zu diesem Zweck kommen Kohleflöze, saline Aquifere sowie Gas-/Öllagerstätten in Betracht. Da zurzeit in der Schweiz diesbezüglich noch keine aktiven Realisierungsprojekte laufen und die für die CO_2-Sequestrierung interessierenden Gesteinsabfolgen für die geologischen Tiefenlager nicht von prioritärem Interesse sind, wird die CO_2-Sequestrierung nicht in die Evaluation der geologischen Standortgebiete mit einbezogen. Falls spätere Realisierungsprojekte einen Nutzungskonflikt ergäben, wäre eine Interessensabwägung vorzunehmen.

Salzlagerstätten in der Schweiz sind auf Steinsalz (Halit) beschränkt, Kalisalzlager sind bisher nicht bekannt (Kündig et al. 1997). Die Vorkommen beschränken sich dabei auf den Mittleren Muschelkalk, den Keuper (Westschweiz) und die Trias des Ultrahelvetikums im Gebiet Aigle – Bex (vgl. Fig. 5.1-3 in Nagra 2008b). Mit Ausnahme der Lagerstätte in Bex erfolgt der Abbau des Steinsalzes in der Schweiz ausschliesslich durch Laugungsverfahren in Bohrungen. Die Gewinnungskosten steigen in erster Linie aufgrund der Bohrkosten mit zunehmender Tiefe und abnehmender Mächtigkeit nicht-linear an, so dass beispielsweise tief liegende Salzvorkommen im Molassebecken derzeit als nicht nutzungswürdig eingestuft werden. Bei der Salzgewinnung im Auslaugungsverfahren sind zahlreiche Bohrungen notwendig, weil das Salz aus Stabilitätsgründen nur selektiv gelöst werden darf. Die heute in der Schweiz üblichen Tiefen für dieses Verfahren liegen in der Nordschweiz bei weniger als 400 m unter Terrain (Kündig et al. 1997).

3. Erläuterung der Anforderungen und Bewertungsskalen

Der Indikator 'Rohstoffvorkommen unterhalb des Wirtgesteins' fliesst in die Evaluation der Konfigurationen in Schritt 5 ein (s. oben). Für den Indikator wird eine Mindestanforderung in Schritt 5.1 sowie eine Bewertungsskala für den Schritt 5.3 festgelegt; letztere ist an die Bewertungsskala für den Indikator 'Rohstoffe oberhalb des Wirtgesteins' gekoppelt. Die Anforderungen und Bewertungsskalen für SMA und HAA sind identisch. Es werden keine verschärften Anforderungen verwendet.

- **Mindestanforderungen für SMA und HAA** (Schritt 5.1) – In absehbarer Zeit sind keine schwerwiegenden Konflikte mit Potenzial zur Beeinträchtigung des Barrierensystems durch Nutzung von Rohstoffen unterhalb des Wirtgesteins zu erwarten. Ferner soll kein Potenzial zur Verhinderung der Nutzung von Rohstoffen grosser Bedeutung bestehen; dadurch erübrigt sich eine Interessensabwägung zwischen den durch die geologische Tiefenlagerung und durch eine potenzielle Ausbeutung von Rohstoffen erzielbaren grossen (volkswirtschaftlichen) Nutzen.
- **Bewertungsskalen für SMA und HAA** (Schritt 5.3) – Die Beurteilung des Nutzungspotenzials (insbesondere Wirtschaftlichkeit, Abbaumethoden) erfolgt aus heutiger Sicht. Als *sehr günstig* werden Gebiete eingestuft, in denen keine Kohlenwasserstoff-Ressourcen (einschliesslich Kohle) erwartet werden und in denen kein Steinsalz vorkommt, oder aber in denen das Top des Salzvorkommens tiefer liegt als 600 m u.T. Als *günstig* werden Gebiete mit möglichen Kohlenwasserstoff-Ressourcen (einschliesslich Kohle) eingestuft, die auch in Zukunft kaum wirtschaftliche Bedeutung erlangen dürften, und/oder Gebiete, in denen das Top des Salzvorkommens zwischen 500 und 600 m u.T. liegt. Gebiete mit Kohlenwasserstoff-Ressourcen (einschliesslich Kohle), die in Zukunft möglicherweise eine wirtschaftliche Bedeutung erlangen und in denen heute eine Explorationstätigkeit stattfindet, und/oder Gebiete, in denen das Top des Salzvorkommens zwischen 400 und 500 m u.T. bzw. darüber liegt, werden als *ungünstig bis bedingt günstig* eingestuft (graduelle Abstufung in der Bewertung). Bei der Gesamtbewertung des Indikators 'Rohstoffvorkommen unterhalb des Wirtgesteins' wurde nicht der Mittelwert der Einzelbewertungen zu Kohlenwasserstoff, Kohle und Salz genommen, sondern die jeweils ungünstigste Bewertungsstufe.

A1.35 Rohstoffvorkommen oberhalb des Wirtgesteins

Festlegung der Anforderungen und Bewertungsskalen

Schritt/ Kriterium	Attribut	Anforderungen und Bewertungsskalen	
		SMA	**HAA**
5.3/2.4	Bewertungs-skala	Modifikation der Bewertung des Indikators 'Rohstoffvorkommen unterhalb des Wirtgesteins': Bei bzgl. Rohstoffnutzung signifikanten Öl- oder Gasanzeichen in Gesteinen oberhalb des Wirtgesteins werden Bewertungen im Bereich *günstig bis sehr günstig* auf *günstig* reduziert; bei tieferen Bewertungen erfolgt kein zusätzlicher Abzug Für Bereiche ohne Öl- oder Gasanzeichen in Gesteinen oberhalb des Wirtgesteins erfolgt ebenfalls kein Abzug	

Hintergrundinformationen

1. Relevanz für Langzeitsicherheit bzw. bautechnische Machbarkeit

Ein Nutzungskonflikt entsteht einerseits, wenn die Nutzung von vorhandenen Ressourcen durch das Tiefenlager verunmöglicht wird, oder wenn eine erhebliche Wahrscheinlichkeit des unbeabsichtigten menschlichen Eindringens in das Tiefenlager besteht. Im Gegensatz zu den Indikatoren 'Rohstoffvorkommen innerhalb des Wirtgesteins' und 'Rohstoffvorkommen unterhalb des Wirtgesteins' besteht beim Indikator 'Rohstoffvorkommen oberhalb des Wirtgesteins' ein deutlich reduziertes Risiko für eine Verletzung des Barrierensystems, mit entsprechend geringeren Auswirkungen auf die Langzeitstabilität bzw. auf die Langzeitsicherheit.

Relevante Sicherheitsfunktionen:	Isolation Gewährleistung der Langzeitstabilität Einschluss
Relevante Elemente des Barrierensystems:	Technische Barrieren Geologische Situation
Sicherheitsrelevante Eigenschaften:	Geringe Wahrscheinlichkeit von menschlichem Eindringen dank Abwesenheit von absehbaren Nutzungskonflikten Geometrische Bedingungen

2. Beschreibung und zugehörige Grundlagen

Mit dem Indikator 'Rohstoffvorkommen oberhalb des Wirtgesteins' werden konfigurationsbezogene Nutzungskonflikte (Verunmöglichung der Nutzung der Rohstoffe) beurteilt. Ein solcher besteht, wenn nutzungswürdige Rohstoffe (Erdöl, Erdgas) oberhalb des Wirtgesteins vorkommen. Mögliche Nutzungskonflikte dieser Art spielen vor allem im Hinblick auf die Erschliessung eines Lagers eine Rolle und werden bei der Bewertung der bevorzugten Bereiche berücksichtigt. Die Bewertung der Nutzungskonflikte (insbesondere Wirtschaftlichkeit, Abbaumethoden) erfolgt aus heutiger Sicht und unter Berücksichtigung der Tiefenlage der Rohstoffvorkommen.

Es besteht ein enger Zusammenhang zwischen den Indikatoren 'Rohstoffvorkommen unterhalb des Wirtgesteins' und 'Rohstoffvorkommen oberhalb des Wirtgesteins', da sie teilweise in kausalem Zusammenhang stehen: Kohlenwasserstoffvorkommen oberhalb des Wirtgesteins habe ihren Ursprung oft in tieferen Gesteinsformationen unterhalb des Wirtgesteins. Die Festlegungen bzgl. wirtgesteinsbezogener Rohstoffkonflikte werden im Rahmen des Indikators 'Rohstoffvorkommen innerhalb des Wirtgesteins' festgelegt. Andere Nutzungskonflikte können in Zusammenhang mit der Nutzung von Mineralquellen, Thermen und Geothermie bestehen; die Festlegungen bzgl. dieser Nutzungskonflikte werden im Rahmen der Indikatoren 'Mineralquellen und Thermen' und 'Geothermie' festgelegt.

Für eine Diskussion der Grundlagen für die Festlegung der Bewertungsskala für Rohstoffvorkommen oberhalb des Wirtgesteins wird auf den Indikator 'Rohstoffvorkommen unterhalb des Wirtgesteins' verwiesen.

3. Erläuterung der Anforderungen und Bewertungsskalen

Der Indikator 'Rohstoffvorkommen oberhalb des Wirtgesteins' fliesst in die Bewertung der bevorzugten Bereiche in Schritt 5.3 ein (s. oben). Die Bewertung erfolgt zusammen mit dem Indikator 'Rohstoffvorkommen unterhalb des Wirtgesteins'. Die Bewertungsskalen für SMA und HAA sind identisch. Es werden keine Mindestanforderungen und verschärften Anforderungen verwendet.

- **Bewertungsskalen für SMA und HAA** (Schritt 5.3) – Die Bewertung des Indikators 'Rohstoffvorkommen oberhalb des Wirtgesteins' erfolgt durch eine Modifikation der Bewertung des Indikators 'Rohstoffvorkommen unterhalb des Wirtgesteins': Bei signifikanten Öl- oder Gasanzeichen in Gesteinen oberhalb des Wirtgesteins werden Bewertungen für den Indikator 'Rohstoffvorkommen unterhalb des Wirtgesteins' im Bereich *günstig* bis *sehr günstig* auf die Bewertungsstufe *günstig* reduziert; bei tieferen Bewertungen (Bewertungsstufen zwischen *ungünstig* und *bedingt günstig*) erfolgt kein zusätzlicher Abzug. Damit wird der Tatsache Rechnung getragen, dass allfällige Rohstoffvorkommen oberhalb des Wirtgesteins im Vergleich mit denjenigen in tieferen Gesteinsschichten von untergeordneter Bedeutung für die Langzeitsicherheit der Tiefenlager sind. Ebenso erfolgt für Bereiche ohne Öl- oder Gasanzeichen in Gesteinen oberhalb des Wirtgesteins kein Abzug in der Bewertung.

A1.36 Mineralquellen und Thermen

Festlegung der Anforderungen und Bewertungsskalen

Schritt/ Kriterium	Attribut	Anforderungen und Bewertungsskalen	
		Lagerzone	**Untertägige Erschliessung**
5.1/2.4	Mindest-anforderung (MA)	Bei möglicher hydraulisch wirksamer Verbindung zwischen Tiefenlager und Mineralquelle oder Therme: Entfernung ≥ 5 km	Bei möglicher hydraulisch wirksamer Verbindung zwischen Erschliessung (Zugangstunnel, Schacht) und Mineralquelle oder Therme: Entfernung ≥ 1 km
5.3/2.4	Sehr günstig	Keine hydraulisch wirksame Verbindung zwischen Tiefenlager und Mineralquelle oder Therme	Keine hydraulisch wirksame Verbindung zwischen Erschliessung und Mineralquelle oder Therme oder Entfernung ≥ 10 km
	Günstig		Bei möglicher hydraulischer Verbindung: Entfernung ≥ 5 km
	Bedingt günstig	Mögliche hydraulische Verbindung zwischen Tiefenlager und Mineralquelle oder Therme (aber MA erfüllt)	Bei möglicher hydraulischer Verbindung: Entfernung ≥ 2 km
	Ungünstig		Bei möglicher hydraulischer Verbindung: Entfernung zwischen 1 und 2 km

Hintergrundinformationen

1. Relevanz für Langzeitsicherheit bzw. bautechnische Machbarkeit

Ein Nutzungskonflikt entsteht einerseits, wenn die Nutzung von vorhandenen Ressourcen durch das Tiefenlager verunmöglicht wird, oder wenn eine erhebliche Wahrscheinlichkeit des unbeabsichtigten menschlichen Eindringens in das Tiefenlager besteht bzw. eine Verletzung des Barrierensystems durch menschliche Aktivität erfolgt. Eine Verletzung des Barrierensystems kann bei der Exploration (Sondierbohrungen) und bei der Nutzung von Mineralquellen und Thermen entstehen. Dies kann die Langzeitstabilität des Barrierensystems bzw. die Langzeitsicherheit beeinträchtigen und unter Umständen einen direkten Radionuklid-Transportpfad vom Tiefenlager zur Biosphäre erzeugen.

Nutzungskonflikte können aber auch bei bereits genutzten Mineralquellen und Thermen durch lagerbedingte Einflüsse bei der Realisierung des Tiefenlagers entstehen. Diesbezüglich sind vor allem Einflüsse zu berücksichtigen, welche einerseits die Ergiebigkeit verringern (z.B. Änderung des Anströmungsbereichs zur Mineralquelle oder Therme) oder die Qualität derselben verändern (z.B. Verunreinigung des Wassers im Infiltrationsgebiet zu einer Mineralquelle oder Therme).

Relevante Sicherheitsfunktionen:	Isolation Gewährleistung der Langzeitstabilität Einschluss
Relevante Elemente des Barrierensystems:	Technische Barrieren Geologische Situation
Sicherheitsrelevante Eigenschaften:	Geringe Wahrscheinlichkeit von menschlichem Eindringen dank Abwesenheit von absehbaren Nutzungskonflikten Geometrische Bedingungen

2. Beschreibung und zugehörige Grundlagen

Mit dem Indikator 'Mineralquellen und Thermen' werden konfigurationsbezogene Konflikte in Zusammenhang mit der bestehenden Nutzung von Mineralquellen und Thermen beurteilt. Die Bewertung erfolgt einerseits in Bezug auf eine mögliche (kurz- oder langfristig) hydraulisch wirksame Verbindung zwischen den heute genutzten Mineralquellen und Thermen (oberflächennahe und tiefe Fassungen) und dem Tiefenlager (Lagerzone mit radioaktiven Abfällen). Andererseits erfolgt die Bewertung in Bezug auf eine mögliche (während der Bau- und Betriebsphase) hydraulisch wirksame Verbindung zwischen den heute genutzten Mineralquellen und Thermen und Aquiferen, die mit dem Zugangstunnel (Rampe) oder dem Schacht durchfahren werden. Eine solche Verbindung ist nur dann hydraulisch wirksam, wenn Grundwässer tatsächlich von den betreffenden Lagerkomponenten in das Einzugsgebiet der Mineralquellen und Thermen (oder umgekehrt: von Mineralquellen und Thermen durch Drainage in das Tiefenlager) gelangen können. Als Grundlage für die Bewertung dient eine Karte der Mineral- und Thermalwasservorkommen im Verbreitungsraum der bevorzugten Wirtgesteine (Fig. 5.1-4 in Nagra 2008b).

Eine mögliche hydraulisch wirksame Verbindung zwischen Mineralquellen oder Thermen und der Lagerzone ist kurz- und langfristig relevant und kann nur bedingt durch bautechnische Massnahmen beeinflusst werden. Demgegenüber ist eine mögliche hydraulisch wirksame Verbindung zwischen Mineralquellen oder Thermen und den Zugangsbauwerken vor allem während der Bau- und Betriebsphase des Lagers relevant; in diesen Phasen können verschiedene bauliche Massnahmen ergriffen werden, um die hydraulischen Auswirkungen zu mildern. Beispielsweise kann die Auslegung der Zugangsbauwerke im Hinblick auf eine Verringerung der hydraulischen Verbindung optimiert werden (Linienwahl des Zugangstunnels, Schachtstandort, druckwasserhaltende Abdichtung des Tunnelgewölbes), oder es können gebirgsverbessernde Massnahmen (z.B. Abdichtungsinjektionen) in hydraulisch verbundenen Strecken der Zugangsbauwerke ausgeführt werden.

3. Erläuterung der Anforderungen und Bewertungsskalen

Der Indikator 'Mineralquellen und Thermen' fliesst in die Evaluation der Konfigurationen in Schritt 5 ein (s. oben). Für den Indikator wird eine Mindestanforderung in Schritt 5.1 und eine Bewertungsskala in Schritt 5.3 festgelegt. Dabei werden spezifische Festlegungen für die Lagerzone und für die untertägige Erschliessung vorgenommen, welche sowohl für SMA als auch für HAA gültig sind. Es werden keine verschärften Anforderungen verwendet.

- **Mindestanforderung für SMA und HAA** (Schritt 5.1) – Bei einer möglichen hydraulisch wirksamen Verbindung zwischen der Lagerzone und bestehenden Mineralquellen oder Thermen muss eine Entfernung von mindestens 5 km vom Rand des potenziell möglichen

Bereichs eingehalten werden. Damit wird der Forderung Nachdruck verliehen, dass Freisetzungspfade für Radionuklide hin zu Mineralquellen oder Thermen unter allen Umständen verhindert werden müssen. Für die Lagererschliessung (Zugangstunnel, Schacht) muss die entsprechende Entfernung mindestens 1 km betragen. Diese Entfernung bezieht sich auf denjenigen Teil des potenziell möglichen Bereichs, in welchem tatsächlich Schächte und/ oder eine Rampe abgeteuft würden[114].

- **Bewertungsskala für SMA und HAA** (Schritt 5.3) – Für die Bewertung der Entfernung zwischen Mineralquellen oder Thermen und Lagerzone wird eine zweistufige Skala verwendet. Als *sehr günstig* wird eine Situation eingestuft, in der z.B. wegen einer sehr geringen Durchlässigkeit keine hydraulisch wirksame Verbindung zwischen Lagerzone und Mineralquelle oder Therme besteht (keine Differenzierung zwischen den Bewertungsstufen *günstig* und *sehr günstig*). Falls eine mögliche hydraulisch wirksame Verbindung zwischen Lagerzone und Mineralquelle oder Therme besteht, die Mindestanforderung bzgl. Distanz zum Rand des Bereichs aber erfüllt ist, so wird dies als *bedingt günstig* eingestuft (keine Differenzierung zwischen den Bewertungsstufen *bedingt günstig* und *ungünstig*).

  Für die Bewertung der Entfernung zwischen Mineralquellen oder Thermen und den Lagerbauten für die Erschliessung (Rampe, Schacht) wird eine vierstufige Skala verwendet. Als sehr *günstig* wird eine Situation eingestuft, in der entweder keine hydraulisch wirksame Verbindung zwischen Erschliessung und Mineralquelle oder Therme besteht, oder falls die entsprechende Entfernung mehr als 10 km beträgt. Die weitere Abstufung der Bewertungsstufen erfolgt nach abnehmender Entfernung: mehr als 5 km (*günstig*), mehr als 2 km (*bedingt günstig*), zwischen 1 und 2 km (*ungünstig*). Werden Teile des Bereichs aufgrund ihrer Entfernung unterschiedlich bewertet, entspricht die Bewertung pro Bereich dem flächengewichteten Mittel der Teilnoten.

[114] Bei ungünstigen Grundwasser-Strömungsverhältnissen (Quellen im Abströmungsbereich der Untertagebauten) muss geprüft werden, ob ein grösserer Abstand notwendig ist, um eine Beeinträchtigung der Quellen durch den Bau bzw. Betrieb zu vermeiden. Dazu sind bei der Wahl des Standorts entsprechende hydrogeologische Abklärungen vorzunehmen.

A1.37 Geothermie

Festlegung der Anforderungen und Bewertungsskalen

Schritt/ Kriterium	Attribut	Anforderungen und Bewertungsskalen	
		SMA	**HAA**
5.3/2.4	Sehr günstig	Nicht identifiziertes Ressourcenpotenzial (normierte geothermische Produktivität Pn < 0.004 MW/m)	
	Günstig	Mögliches Ressourcenpotenzial (0.004 < Pn < 0.008 MW/m)	
	Bedingt günstig	Erhöhtes Ressourcenpotenzial (0.008 < Pn < 0.012 MW/m)	
	Ungünstig	Hohes Ressourcenpotenzial (Pn > 0.012 MW/m)	

Hintergrundinformationen

1. Relevanz für Langzeitsicherheit

Ein Nutzungskonflikt entsteht einerseits, wenn die Nutzung von vorhandenen Ressourcen durch das Tiefenlager verunmöglicht wird, oder wenn eine erhebliche Wahrscheinlichkeit des unbeabsichtigten menschlichen Eindringens in das Tiefenlager besteht bzw. eine Verletzung des Barrierensystems durch menschliche Aktivität erfolgt. Eine Verletzung des Barrierensystems kann bei der Exploration (Sondierbohrungen) und bei der Nutzung der Erdwärme entstehen. Dies kann die Langzeitstabilität des Barrierensystems bzw. die Langzeitsicherheit beeinträchtigen und unter Umständen einen direkten Radionuklid-Transportpfad vom Tiefenlager zur Biosphäre erzeugen.

Relevante Sicherheitsfunktionen:	Isolation Gewährleistung der Langzeitstabilität Einschluss
Relevante Elemente des Barrierensystems:	Technische Barrieren Geologische Situation
Sicherheitsrelevante Eigenschaften:	Geringe Wahrscheinlichkeit von menschlichem Eindringen dank Abwesenheit von absehbaren Nutzungskonflikten Geometrische Bedingungen

2. Beschreibung und zugehörige Grundlagen

Mit dem Indikator 'Geothermie' werden schwerwiegende konfigurationsbezogene Konflikte in Zusammenhang mit der Nutzung der Erdwärme (Geothermie) beurteilt. Es werden nur Hochtemperatursysteme (kombinierte Strom- und Wärmeproduktion oder nur Stromproduktion) betrachtet, da diese Bohrungen bis in mehrere Kilometer Tiefe erfordern. Wichtige geothermische Explorationsziele sind potenzielle Aquifere und transmissive Störungssysteme, die eine hohe thermische Produktivität vermuten lassen. Die Nutzung der Geothermie ist prinzipiell überall in der Schweiz möglich, und es ist kaum vorhersehbar, wo in Zukunft mit Hilfe von

Tiefbohrungen Hochtemperatursysteme erstellt werden. Grossflächige, aber moderate Anomalien werden nicht als Ausschlussgrund angesehen; den hydraulisch aktiven Störungen mit erhöhtem geothermischem Ressourcenpotenzial wird bei der Platzierung der Lagerkammern aus Gründen der Langzeitsicherheit ausgewichen.

Das geothermische Potenzial wurde von Signorelli & Kohl (2007) sowie Baujard et al. (in prep.) für vier verschiedenen Aquifere in der Schweiz (Obere Meeresmolasse, Oberer Malm, Oberer Muschelkalk und zerklüftetes Top-Kristallin) sowie für Störungszonen abgeschätzt. Ein erhöhtes geothermisches Potenzial wird im Bereich der nordschweizerischen Permokarbontröge und von grösseren Störungssystemen (z.B. Rheingraben- oder Permokarbontrog-Randstörungen) erwartet. Als Mass für das geothermische Potenzial wird die normierte geothermische Produktivität P_n (Quotient aus geschätzter geothermischer Leistung und minimal erforderlicher Bohrtiefe) herangezogen, vgl. Kohl et al. (2009), Nagra (2008c) und Fig. 5.1-4 in Nagra (2008b). Die Bewertung der geothermischen Nutzungskonflikte (insbesondere Wirtschaftlichkeit und technische Möglichkeiten) erfolgt aus heutiger Sicht.

3. Erläuterung der Anforderungen und Bewertungsskalen

Der Indikator 'Geothermie' fliesst in die Bewertung der bevorzugten Bereiche in Schritt 5.3 ein (s. oben). Es werden keine Mindestanforderungen und verschärften Anforderungen bzgl. Geothermie verwendet, da die entsprechenden Nutzungskonflikte als zu wenig schwerwiegend eingestuft werden (z.B. kein Abbau notwendig, Flexibilität bzgl. Standortwahl für Tiefbohrungen, da Ressourcenpotenzial meist grossflächig vorhanden). Die Bewertungsskalen für SMA und HAA sind identisch.

- **Bewertungsskala für SMA und HAA** (Schritt 5.3) – Die Bewertungsstufen werden anhand des Ressourcenpotenzials für Geothermie (unter Zuhilfenahme von Zielwerten für die normierte geothermische Produktivität) definiert: Als *sehr günstig* wird eine Situation eingestuft, in der kein identifiziertes Ressourcenpotenzial besteht (Zielwert für normierte geothermische Produktivität $Pn < 0.004$ MW/m). Entsprechend wird ein mögliches Ressourcenpotenzial (Zielwerte $0.004 < Pn < 0.008$ MW/m), ein erhöhtes Ressourcenpotenzial (Zielwerte $0.008 < Pn < 0.012$ MW/m) bzw. ein hohes Ressourcenpotenzial (Zielwert $Pn > 0.012$ MW/m) als *günstig*, *bedingt günstig* bzw. *ungünstig* eingestuft.

A1.38 Diffus gestörte Zonen

Festlegung der Anforderungen und Bewertungsskalen

Schritt/ Kriterium	Attribut	Anforderungen und Bewertungsskalen	
		SMA	**HAA**
5.2/3.1	Verschärfte Anforderung (VA)	Diffus gestörte Zonen werden gemieden	

Hintergrundinformationen

1. Relevanz für Langzeitsicherheit bzw. bautechnische Machbarkeit

Mit dem Indikator 'Diffus gestörte Zonen' werden Zonen mit Anzeichen einer erhöhten tektonischen Zergliederung beurteilt. Diese kann sich ungünstig auf die Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften (einschliesslich der geomechanischen Bedingungen) und auf die räumlichen Verhältnisse für die Auslegung der Lagerkammern auswirken. Ferner hat eine kleinräumige Zergliederung einen massgeblichen Einfluss auf die zuverlässige Erstellung der geologischen Tiefenlager sowie auf die Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen zu den Gesteinseigenschaften (Charakterisierbarkeit). Dadurch tangiert die kleinräumige Zergliederung der Gesteine die Langzeitsicherheit und die bautechnische Machbarkeit der Tiefenlager in mehrfacher Hinsicht.

Relevante Sicherheitsfunktionen:	Isolation Gewährleistung der Langzeitstabilität
Relevante Elemente des Barrierensystems:	Geologische Situation
Sicherheitsrelevante Eigenschaften:	Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften (im Hinblick auf kleinräumige Zergliederung)

Relevante Sicherheitsfunktion:	Einschluss
Relevante Elemente des Barrierensystems:	Endlagerbehälter Weitere technische Barrieren
Sicherheitsrelevante Eigenschaften:	Geometrische und geomechanische Bedingungen

Relevante Sicherheitsfunktionen:	Rückhaltung Kleine Freisetzungsraten
Relevante Elemente des Barrierensystems:	WG/EG
Sicherheitsrelevante Eigenschaften:	Räumliche Ausdehnung WG/EG (lange Freisetzungspfade durch Sicherheitsabstand zu Störungszonen).

Relevantes Prinzip:	Zuverlässige Erstellung der geologischen Tiefenlager
Relevante Elemente des Barrierensystems:	WG/EG
Sicherheitsrelevante Eigenschaften:	Flexibilität/Reserven (räumliche Ausdehnung)

Relevantes Prinzip:	Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen
Relevante Elemente des Barrierensystems:	WG/EG
Sicherheitsrelevante Eigenschaften:	Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen (Charakterisierbarkeit der Gesteinseigenschaften)

2. Beschreibung und zugehörige Grundlagen

Der Begriff "diffus gestörte Zonen" bezeichnet Zonen mit Anzeichen für erhöhte tektonische Zergliederung. Solche Zonen sind unvorteilhaft, weil dort die hydraulische Barrierenwirkung und/oder die mechanischen Eigenschaften des Wirtgesteins signifikant beeinträchtigt und zudem die Platzverhältnisse durch engständige auslegungsbestimmende Störungszonen eingeschränkt sein können, mit entsprechenden Schwierigkeiten bei der Exploration und bei der Anordnung der Lagerkammern.

Diffus gestörte Zonen werden vor allem aufgrund der vorhandenen Seismik- und Oberflächendaten und teilweise auch aufgrund von konzeptionellen Überlegungen ausgeschieden, vgl. dazu die ausführliche Diskussion in Nagra (2008c).

3. Erläuterung der Anforderungen und Bewertungsskalen

Der Indikator 'Diffus gestörte Zonen' fliesst in die Evaluation der Konfigurationen in Form einer verschärften Anforderung in Schritt 5.2 ein (s. oben). Die Anforderungen für SMA und HAA sind identisch. Es werden keine Mindestanforderungen und Bewertungsskalen verwendet.

- **Verschärfte Anforderung für SMA und HAA** (Schritt 5.2) – Im Sinne eines vorsichtigen Vorgehens wird den Ungewissheiten bezüglich der kleinräumigen Zergliederung Rechnung getragen, indem als verschärfte Anforderung bei der Auswahl von bevorzugten Bereichen in Schritt 5.2 die diffus gestörten Zonen gemieden werden. Aufgrund der besonderen Rolle der tektonischen Überprägung ist diese verschärfte Anforderung bei tektonischen Akkumulationen (insbesondere Mergel-Formationen des Helvetikums) nicht anwendbar.

A1.39 Variabilität der Gesteinseigenschaften im Hinblick auf ihre Charakterisierbarkeit

Festlegung der Anforderungen und Bewertungsskalen

Schritt/ Kriterium	Attribut	Anforderungen und Bewertungsskalen	
		SMA	**HAA**
4.2/3.1	Verschärfte Anforderung (VA)	Keine bevorzugten Fliesspfade, welche ungünstige Radionuklid-Rückhalteeigenschaften haben (Diskontinuitäten, sedimentäre Architekturelemente) und die nicht zuverlässig lokalisierbar und charakterisierbar sind	
4.3/3.1	Sehr günstig	Keine Diskontinuitäten und sedimentären Architekturelemente von Relevanz für den Radionuklidtransport	
	Günstig	Alle anderen Fälle (die VA erfüllen)	
	Ungünstig bis bedingt günstig	– [1)]	
5.3/3.1	Bewertungs-skala	Bewertungsstufen wie in Schritt 4.3/Kriterium 3.1	

[1)] Diese Bewertungsstufen sind nicht erforderlich, da alle bewerteten Varianten die verschärften Anforderungen erfüllen müssen und damit als mindestens *günstig* beurteilt werden.

Hintergrundinformationen

1. Relevanz für Langzeitsicherheit bzw. bautechnische Machbarkeit

Die Variabilität der Gesteinseigenschaften und die Möglichkeiten für ihre zuverlässige Erfassung (Charakterisierbarkeit) haben einen entscheidenden Einfluss auf die Belastbarkeit des Langzeitsicherheitsnachweises.

Relevantes Prinzip:	Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen
Relevante Elemente des Barrierensystems:	WG/EG
Sicherheitsrelevante Eigenschaften:	Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen (Charakterisierbarkeit der Gesteinseigenschaften)

2. Beschreibung und zugehörige Grundlagen

Mit dem Indikator 'Variabilität der Gesteinseigenschaften im Hinblick auf ihre Charakterisierbarkeit' wird beurteilt, inwiefern die Variabilität in den Gesteinseigenschaften eine zuverlässige Charakterisierung des Wirtgesteins erschwert und damit die Zuverlässigkeit der sicherheitsbezogenen Aussagen beeinträchtigt. Dies betrifft insbesondere höher durchlässige bevorzugte Fliesspfade und deren zuverlässige Lokalisierung und Charakterisierung. Mit geeigneten Anforderungen wird sichergestellt, dass keine Wirtgesteine bevorzugt werden, deren Barrierenwirkung durch präferenzielle Fliesspfade mit ungünstigen Radionuklid-Rückhalteeigenschaften beeinträchtigt sein könnte und die schwierig zu identifizieren und charakterisieren sind (Nagra 2008c).

3. Erläuterung der Anforderungen und Bewertungsskalen

Für den Indikator 'Variabilität der Gesteinseigenschaften im Hinblick auf ihre Charakterisierbarkeit' wird eine verschärfte Anforderung in Schritt 4.2 und eine Bewertungsskala für Schritte 4.3 und 5.3 festgelegt (s. oben). Die Anforderungen und Bewertungsskalen für SMA und HAA sind identisch.

- **Verschärfte Anforderung für SMA und HAA** (Schritt 4.2) – Keine bevorzugten Fliesspfade im Wirtgestein, welche ungünstige Radionuklid-Rückhalteeigenschaften haben (Diskontinuitäten, sedimentäre Architekturelemente) und die nicht zuverlässig lokalisierbar und charakterisierbar sind. Mit dieser verschärften Anforderung werden Wirtgesteine zurückgestellt, deren Variabilität in den Gesteinseigenschaften eine zuverlässige Lokalisierung und Charakterisierung der Fliesspfade mit ungünstigen Radionuklid-Rückhalteeigenschaften praktisch verunmöglicht und damit die Zuverlässigkeit der sicherheitsbezogenen Aussagen erheblich verschlechtert.
- **Bewertungsskalen für SMA und HAA** (Schritte 4.3 und 5.3) – Als *sehr günstig* werden Wirtgesteine eingestuft, die keine Diskontinuitäten und sedimentären Architekturelemente von Relevanz für den Radionuklidtransport enthalten. Solche Wirtgesteine bieten die besten Aussichten für eine zuverlässige Charakterisierung der transportrelevanten Gesteinseigenschaften und damit für einen belastbaren Langzeitsicherheitsnachweis. Alle bevorzugten Wirtgesteine, die per Definition die verschärfte Anforderung bzgl. Variabilität der Gesteinseigenschaften erfüllen, werden als *günstig* eingestuft. Entsprechend entfallen für die bevorzugten Wirtgesteine die Bewertungsstufen *bedingt günstig* und *ungünstig*. Die Bewertungsstufen für den Schritt 5.3 (Bewertung der bevorzugten Bereiche) sind identisch mit denjenigen für den Schritt 4.3.

A1.40 Erfahrungen

Festlegung der Anforderungen und Bewertungsskalen

Schritt/ Kriterium	Attribut	Anforderungen und Bewertungsskalen	
		SMA	**HAA**
4.3/3.1	Sehr günstig	Es gibt Erfahrungen aus langjährigen, fortgeschrittenen Lagerprojekten in gleichen bzw. in sehr ähnlichen Gesteinformationen und in ähnlicher geologischer Konfiguration (gute Übertragbarkeit) im In- und/oder Ausland	
	Günstig	Es gibt Erfahrungen in ähnlichen Gesteinsformationen, die geologische Konfiguration ist aber verschieden (teilweise eingeschränkte Übertragbarkeit) im In- und/oder Ausland	
	Bedingt günstig	Es gibt zwar relevante Erfahrungen für die geologische Tiefenlagerung, die Unterschiede betreffend Wirtgestein und geologische Konfiguration sind aber signifikant (mässige Übertragbarkeit)	
	Ungünstig	Es gibt keine relevanten Erfahrungen für die geologische Tiefenlagerung in derartigen Gesteinsformationen	
5.3/3.1	Bewertungs-skala	Bewertungsstufen wie in Schritt 4.3/Kriterium 3.1	

Hintergrundinformationen

1. Relevanz für Langzeitsicherheit bzw. bautechnische Machbarkeit

Die bestehenden Erfahrungen im In- und Ausland mit dem zu beurteilenden Wirtgestein oder lithologisch vergleichbaren Gesteinen tragen massgeblich zur Zuverlässigkeit von geologischen Aussagen bei und erhöhen damit die Belastbarkeit des Langzeitsicherheitsnachweises.

Relevantes Prinzip:	Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen
Relevante Elemente des Barrierensystems:	WG/EG
Sicherheitsrelevante Eigenschaften:	Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen (Charakterisierbarkeit der Gesteinseigenschaften)

2. Beschreibung und zugehörige Grundlagen

Beurteilt werden nationale und internationale Erfahrungen mit dem zu beurteilenden Wirtgestein und mit vergleichbaren Gesteinen, namentlich Erfahrungen, die in Zusammenhang mit der Entsorgung radioaktiver Abfälle gesammelt wurden (vgl. Diskussion in Nagra 2008c).

3. Erläuterung der Bewertungsskalen

Der Indikator 'Erfahrungen' fliesst in die Bewertung der bevorzugten Wirtgesteine in Schritt 4.3 und in die Bewertung der bevorzugten Bereiche in Schritt 5.3 ein (s. oben). Die Bewertungsskalen für SMA und HAA sind identisch. Es werden keine Mindestanforderungen und verschärften Anforderungen verwendet.

- **Bewertungsskala für SMA und HAA** (Schritte 4.3 und 5.3) – Als *sehr günstig* werden Erfahrungen im In- und/oder Ausland bewertet, die aus langjährigen, fortgeschrittenen Lagerprojekten in gleichen bzw. in sehr ähnlichen Gesteinformationen und in ähnlicher geologischer Konfiguration stammen. Damit wird eine gute Übertragbarkeit der Erfahrungen gewährleistet. Als *günstig* werden Erfahrungen im In- und/oder Ausland in ähnlichen Gesteinsformationen, aber verschiedener geologischer Konfiguration eingestuft, denn dadurch wird die Übertragbarkeit der Erfahrungen teilweise eingeschränkt. Als *bedingt günstig* wird eingestuft, wenn zwar relevante Erfahrungen für die geologische Tiefenlagerung vorhanden sind, die Unterschiede betreffend Wirtgestein und geologischer Konfiguration aber signifikant sind bzw. nur eine mässige Übertragbarkeit der Erfahrungen erlauben. Als *ungünstig* wird eingestuft, wenn keine relevanten Erfahrungen für die geologische Tiefenlagerung in derartigen Gesteinsformationen vorliegen.

A1.41 Regionales Störungsmuster und Lagerungsverhältnisse

Festlegung der Anforderungen und Bewertungsskalen

Schritt/ Kriterium	Attribut	Anforderungen und Bewertungsskalen	
		SMA	**HAA**
3.1/3.2	Mindest-anforderung (MA)	Potenzial vorhanden zum Auffinden und zuverlässigen Explorieren von wenig zergliederten Bereichen, in denen die Lagerkammern angeordnet werden können	Wie SMA, aber grössere unzergliederte Bereiche notwendig
3.3/3.2		Potenzial vorhanden zum Auffinden und zuverlässigen Explorieren von wenig zergliederten Bereichen, in denen die Lagerkammern angeordnet werden können:	Wie SMA, aber grössere unzergliederte Bereiche notwendig
	Sehr günstig	Mehrere, teilweise auch grössere Bereiche wahrscheinlich,	
	Günstig	Einige Bereiche wahrscheinlich	
	Ungünstig bis bedingt günstig (graduelle Abstufung)	Wenige Bereiche wahrscheinlich	

Hintergrundinformationen

1. Relevanz für Langzeitsicherheit bzw. bautechnische Machbarkeit

Das regionale Störungsmuster und die Lagerungsverhältnisse können die Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen (eingeschränkte Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse) und damit die Belastbarkeit des Langzeitsicherheitsnachweises beeinflussen.

Relevantes Prinzip:	Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen
Relevante Elemente des Barrierensystems:	Geologische Situation
Sicherheitsrelevante Eigenschaften:	Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen (Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse)

2. Beschreibung und zugehörige Grundlagen

Der Indikator 'Regionales Störungsmuster und Lagerungsverhältnisse' dient der Beurteilung der geologisch-tektonischen Grossräume (Schritt 3). Das Augenmerk des Indikators gilt der geologisch-tektonischen Komplexität, insbesondere dem Einfluss auf die typischen räumlichen Verhältnisse und ihre Explorierbarkeit. Mit dem Indikator wird die generelle kleinräumige Zerglie-

derung des ursprünglichen Gesteinsverbands erfasst, sowohl durch engständige Störungen wie auch durch Faltenbau und Überschiebungen. Diese Zergliederung bestimmt erstens die Grösse der geeigneten Wirtgesteinsblöcke für die Anordnung der Lagerkammern und zweitens die Explorierbarkeit dieser Wirtgesteinsblöcke (Identifizierung, Charakterisierung). Bei der Beurteilung des vorliegenden Indikators ist auch der eng verknüpfte Indikator 'Kontinuität der interessierenden Schichten' zu beachten, der sich auf die laterale Kontinuität der Schichten innerhalb der wenig zergliederten Bereiche bezieht, in denen die Lagerkammern angeordnet werden können.

Die Anwendung des Indikators erfolgt durch Expertenbeurteilung, gestützt auf das umfassende geologische Kartenwerk der Schweiz, typische Profile, grossräumige reflexionsseismische Untersuchungen und zahlreiche geologisch-tektonische Detailstudien.

3. Erläuterung der Anforderungen und Bewertungsskalen

Der Indikator 'Regionales Störungsmuster und Lagerungsverhältnisse' fliesst in Form einer Mindestanforderung und einer Bewertungsskala in die Beurteilung der Grossräume in Schritt 3 ein (s. oben).

- **Mindestanforderung für SMA und HAA (Schritt 3.1)** – Es wird gefordert, dass ein Potenzial vorhanden ist zum Auffinden und zuverlässigen Explorieren von wenig zergliederten Bereichen, in denen die Lagerkammern angeordnet werden können. Dabei sind für HAA grössere unzergliederte Bereiche notwendig als für SMA (vgl. Indikator 'Laterale Ausdehnung'), in denen die relevanten Gesteinsschichten überdies mit Vorteil mehrheitlich flach gelagert sein sollten. Deshalb fällt die Beurteilung der Grossräume für HAA bedeutend strenger aus als für SMA.
- **Bewertungsskala für SMA und HAA (Schritt 3.3)** – Beurteilt wird das Potenzial zum Auffinden und zuverlässigen Explorieren von wenig zergliederten Bereichen, in denen die Lagerkammern angeordnet werden können. Die Bewertungsskala ist wie folgt definiert: *Sehr günstig* – Es ist wahrscheinlich, dass mehrere, teilweise auch grössere solche Bereiche existieren und identifiziert werden können. *Günstig* – Es ist wahrscheinlich, dass einige solche Bereiche existieren und identifiziert werden können. *Ungünstig* bis *bedingt günstig* (graduelle Abstufung) – Es ist wahrscheinlich, dass nur wenige solche Bereiche existieren und identifiziert werden können. Wiederum sind für HAA grössere unzergliederte Bereiche notwendig als für SMA.

A1.42 Kontinuität der interessierenden Schichten

Festlegung der Anforderungen und Bewertungsskalen

Schritt/ Kriterium	Attribut	Anforderungen und Bewertungsskalen	
		SMA	**HAA**
3.3/3.2		Potenzial vorhanden für Kontinuität der Schichten innerhalb von wenig zergliederten Bereichen, in denen die Lagerkammern angeordnet werden können:	
	Sehr günstig	Hoher Grad an Kontinuität	
	Günstig	Mittlerer Grad an Kontinuität	
	Ungünstig bis bedingt günstig (graduelle Abstufung)	Geringer Grad an Kontinuität	
5.3/3.2		Beurteilt wird die Kontinuität der Schichten innerhalb von wenig zergliederten Bereichen, in denen die Lagerkammern angeordnet werden können [1]:	
	Günstig bis sehr günstig (graduelle Abstufung)	*Sehr günstig*: Hoher Grad an Kontinuität, wird in Gebieten ohne signifikante Deformation durch tektonische Überprägung erreicht (entspricht tektonischem Regime: "Tafeljura s.str.") *Günstig bis sehr günstig*: graduelle Abstufung (entspricht tektonischem Regime: "Vorfaltenzone") *Günstig*: mittlerer Grad an Kontinuität, wird in Gebieten mit erheblicher Deformation durch tektonische Überprägung erreicht (entspricht tektonischem Regime: "östliche Subjurassische Zone")	*Sehr günstig*: hoher Grad an Kontinuität, wird in Gebieten ohne signifikante Deformation durch tektonische Überprägung erreicht (entspricht tektonischem Regime: "Tafeljura s.str.") *Günstig bis sehr günstig*: graduelle Abstufung (entspricht tektonischem Regime: "Vorfaltenzone") *Günstig*: – [2]
	Ungünstig bis bedingt günstig (graduelle Abstufung)	Geringer Grad an Kontinuität	– [2]

[1] Bewertung dieses Indikators entfällt für Bereiche ohne Schichtung (z.B. tektonische Akkumulationen).

[2] Diese Bewertungsstufen kommen für HAA-Bereiche nicht zur Anwendung (keine Bereiche mit entsprechendem tektonischem Regime).

Hintergrundinformationen

1. Relevanz für Langzeitsicherheit bzw. bautechnische Machbarkeit

Die Kontinuität der interessierenden Schichten beeinflusst die Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen (eingeschränkte Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse) und damit die Belastbarkeit des Langzeitsicherheitsnachweises und das Projektrisiko.

Relevantes Prinzip:	Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen
Relevante Elemente des Barrierensystems:	Geologische Situation
Sicherheitsrelevante Eigenschaften:	Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen (Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse)

2. Beschreibung und zugehörige Grundlagen

Der Indikator 'Kontinuität der interessierenden Schichten' bezieht sich auf die laterale Kontinuität der Schichten innerhalb wenig zergliederter Bereiche, in denen die Lagerkammern angeordnet werden können. In Schritt 3.3 wird das betreffende Potenzial bewertet und in Schritt 5.3 die konkreten Verhältnisse in den bevorzugten Bereichen. Ein hoher Grad an Kontinuität der interessierenden Schichten bietet günstige Voraussetzungen für die Exploration der räumlichen Verhältnisse und für Aussagen bzgl. der Anordnung der Lagerkammern.

Der Indikator 'Kontinuität der interessierenden Schichten' ist eng verknüpft mit dem Indikator 'Regionales Störungsmuster und Lagerungsverhältnisse'. In gleichem Mass wie die geologisch-tektonische Komplexität und die kleinräumige Zergliederung des ursprünglichen Gesteinsverbands zunehmen, nimmt die Kontinuität der interessierenden Schichten ab.

Die Bewertung des Indikators erfolgt durch Expertenbeurteilung, gestützt auf das umfassende geologische Kartenwerk der Schweiz, typische Profile, grossräumige reflexionsseismische Untersuchungen und zahlreiche geologisch-tektonische Detailstudien.

3. Erläuterung der Anforderungen und Bewertungsskalen

Der Indikator 'Kontinuität der interessierenden Schichten' fliesst in die Bewertung der Grossräume in Schritt 3.3 und der bevorzugten Bereiche in Schritt 5.3 ein (s. oben). Die Bewertungsstufen sind eng verknüpft mit denjenigen für den Indikator 'Regionales Störungsmuster und Lagerungsverhältnisse'. Es werden keine Mindestanforderungen und verschärften Anforderungen verwendet.

- **Bewertungsskala für SMA und HAA** (Schritt 3.3) – Beurteilt wird das Potenzial für die Kontinuität der interessierenden Schichten innerhalb von wenig zergliederten Bereichen, in denen die Lagerkammern angeordnet werden können. Als *sehr günstig* (bzw. *günstig*) wird ein hoher (bzw. mittlerer) Grad an Kontinuität der interessierenden Schichten eingestuft. Als *ungünstig bis bedingt günstig* (mit gradueller Abstufung) wird ein geringer Grad an Kontinuität der interessierenden Schichten eingestuft.
- **Bewertungsskala für SMA und HAA** (Schritt 5.3) – Wie in Schritt 3.3 wird das Potenzial für die Kontinuität der interessierenden Schichten innerhalb von wenig zergliederten Bereichen beurteilt, in denen die Lagerkammern angeordnet werden können. Die Beurteilung differenziert hier aber zwischen den verschiedenen tektonischen Regimes. Sowohl für SMA als auch für HAA wird eine Situation als *sehr günstig* eingestuft, die sich durch einen hohen

Grad an Kontinuität der interessierenden Schichten auszeichnet, wie dies in Gebieten ohne signifikante Deformation durch tektonische Überprägung der Fall ist. Diese Bewertungsstufe entspricht dem tektonischen Regime "Tafeljura s.str.". Für SMA und HAA entspricht die Zwischenstufe *günstig bis sehr günstig* dem tektonischen Regime "Vorfaltenzone". Für SMA wird eine Situation als *günstig* eingestuft, die sich durch einen mittleren Grad an Kontinuität der interessierenden Schichten auszeichnet, wie dies in Gebieten mit erheblicher Deformation durch tektonische Überprägung der Fall ist. Diese Bewertungsstufe entspricht dem tektonischen Regime "östliche Subjurassische Zone". Die weitere Abstufung für SMA erfolgt graduell für Situationen mit einem geringen Grad an Kontinuität der interessierenden Schichten. Auf Bereiche ohne Schichtung (z.B. tektonische Akkumulationen) ist der vorliegende Indikator nicht anwendbar und die Bewertung entfällt.

Für HAA kommen die Bewertungsstufen *günstig, bedingt günstig* und *ungünstig* nicht zur Anwendung, da in den entsprechenden tektonischen Regimes keine Bereiche für das HAA-Lager vorkommen.

A1.43 Explorationsverhältnisse im geologischen Untergrund

Festlegung der Anforderungen und Bewertungsskalen

Schritt/ Kriterium	Attribut	Anforderungen und Bewertungsskalen	
		SMA	**HAA**
4.3/3.2	Sehr günstig	Gut kartierbarer seismischer Markerhorizont an einer Wirtgesteins-Grenzfläche oder in der Nähe (bis ca. 100 m) und ein schwächerer aber weitgehend erkennbarer, räumlich begrenzter Reflektor an bzw. in der Nähe der anderen Grenzfläche; laterale Korrelationslängen relevanter geologischer Elemente > 10 km	
	Günstig/bedingt günstig	Graduelle Abstufung	
	Ungünstig	Kein geeigneter seismischer Reflektor an den Wirtgesteins-Grenzflächen oder in der Nähe einer der Grenzflächen; laterale Korrelationslängen relevanter geologischer Elemente < 0.5 km	
5.3/3.2	Bewertungsskala	Bewertungsstufen wie in Schritt 4.3/Kriterium 3.2, zusätzlich unter Berücksichtigung der tektonischen Überprägung	

Hintergrundinformationen

1. Relevanz für Langzeitsicherheit bzw. bautechnische Machbarkeit

Die Explorationsverhältnisse im geologischen Untergrund haben entscheidenden Einfluss auf die Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen und damit auch auf die Belastbarkeit des Langzeitsicherheitsnachweises und das Projektrisiko.

Relevantes Prinzip:	Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen
Relevante Elemente des Barrierensystems:	Geologische Situation
Sicherheitsrelevante Eigenschaften:	Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen (Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse)

2. Beschreibung und zugehörige Grundlagen

Der Indikator 'Explorationsverhältnisse im geologischen Untergrund' dient der Beurteilung der Wirtgesteine im Hinblick auf die Explorierbarkeit ihrer Geometrie. Grundsätzlich wird dabei die Explorierbarkeit von der Oberfläche (Seismik, Bohrungen) beurteilt; bei gewissen Gesteinen bzw. Konfigurationen ist die Exploration von der Oberfläche nur beschränkt möglich, und dort wird auch die Exploration von Untertag in die Evaluation mit einbezogen.

Die Beurteilung erfolgt anhand von seismischen Markerhorizonten im oder in der Nähe des Wirtgesteins sowie anhand der Homogenität des Wirtgesteins (inkl. lateraler Korrelationslängen). Ziel ist, auf der Basis von seismischen Impedanzkontrasten der Gesteinsabfolgen und stratigraphischen Informationen aus Bohrungen die Grenzen des Wirtgesteinskörpers und die Lage von Störungszonen mittels 2D-/3D-Seismik zuverlässig zu erfassen. Vertikalversätze von einigen Metern sind mit hochauflösender 3D-Seismik noch erkennbar, ebenso der laterale Ver-

lauf von Störungen mit einer Längserstreckung von mehr als 150 m. Kleinere durch tektonische Überprägung verursachte Störungen des Wirtgesteinskörpers sowie schichtparallele Diskontinuitäten und Inhomogenitäten (z.B. Kalkbankabfolgen, kalkige/sandige Untereinheiten) können jedoch mit seismischen Untersuchungen von der Erdoberfläche aus kaum oder gar nicht erfasst werden. Bei genügender lateraler Kontinuität können solche Inhomogenitäten aber mittels Bohrungen exploriert werden. Eine detailliertere Diskussion der Grundlagen für die Explorierbarkeit findet sich in Nagra (2008c).

Die Explorationsbedingungen an der Oberfläche werden separat und konfigurationsspezifisch bewertet (s. Indikator 'Explorationsbedingungen an Oberfläche').

3. Erläuterung der Bewertungsskalen

Für den Indikator 'Explorationsverhältnisse im geologischen Untergrund' werden Bewertungsskalen für die Schritte 4.3 und 5.3 festgelegt (s. oben). Die Bewertungsskalen für SMA und HAA sind identisch. Es werden keine Mindestanforderungen und verschärften Anforderungen gestellt.

- Bewertungsskala für SMA und HAA (Schritt 4.3) – Die Bewertungsstufen werden anhand von seismischen Markerhorizonten im oder in der Nähe des Wirtgesteins sowie anhand der Homogenität des Wirtgesteins (inkl. lateraler Korrelationslängen) definiert: Als *sehr günstig* wird eine Situation eingestuft, in der i) ein gut kartierbarer seismischer Markerhorizont an einer Wirtgesteins-Grenzfläche oder in der Nähe (bis ca. 100 m) und ein schwächerer aber weitgehend erkennbarer, räumlich begrenzter Reflektor an bzw. in der Nähe der anderen Grenzfläche existiert, und ii) die lateralen Korrelationslängen relevanter geologischer Elemente > 10 km beträgt. Als *ungünstig* wird eine Situation eingestuft, in der i) kein geeigneter seismischer Reflektor an den Wirtgesteins-Grenzflächen oder in der Nähe einer der Grenzflächen existiert, und ii) die lateralen Korrelationslängen relevanter geologischer Elemente < 0.5 km beträgt. Zwischen den Bewertungsstufen *sehr günstig* und *ungünstig* erfolgt eine graduelle Abstufung.

  Für die Bewertung der bevorzugten Bereiche in Schritt 5.3 werden grundsätzlich die gleichen Bewertungsstufen wie in Schritt 4.3 verwendet. Allerdings wird zusätzlich ein Abzug in der Bewertung vorgenommen, falls die Qualität der Markerhorizonte durch die tektonische Überprägung in erheblichem Masse beeinträchtigt ist (dies ist im tektonischen Regime "östliche Subjurassische Zone" für SMA der Fall). Bei gewissen Gesteinen bzw. Konfigurationen ist die Exploration von der Oberfläche nur beschränkt möglich, und dort wird auch die Exploration von Untertag in die Evaluation mit einbezogen (dies ist bei den tektonischen Akkumulationen für SMA der Fall).

A1.44 Explorationsbedingungen an Oberfläche

Festlegung der Anforderungen und Bewertungsskalen

Schritt/ Kriterium	Attribut	Anforderungen und Bewertungsskalen	
		SMA	**HAA**
5.1/3.2	Mindest-anforderung (MA)	Keine Bereiche, in denen die Exploration unmöglich sein könnte	
5.3/3.2		Die Gesamtnote ergibt sich durch eine gewichtete Mittelung der Bewertung der Einsatzmöglichkeiten und Erfolgsaussichten für Seismik und Bohrungen, wobei die Seismik höher gewichtet wird. Die Seismikbewertung ergibt sich aus der Evaluation der Parameter Topographie, Tiefenlage, Oberflächennutzung und Ankoppelungsbedingungen:	
	Sehr günstig	Topographie: kein Teil des Bereichs weist Höhengradienten von > 20° auf Tiefenlage des verwendbaren seismischen Markerhorizonts: > 400 m (relativ grosser Abstand zwischen Schuss- und Geophonlinien möglich) Oberflächennutzung: Überwiegend Felder und Wiesen Ankoppelungsbedingungen: keine quartären Ablagerungen bzw. nur lokale (< 10 % der Fläche), geringmächtige quartäre Ablagerungen; bei Karstverdacht: Abzug einer Bewertungsstufe	
	Günstig	Topographie: kleine Teile des Bereichs mit Höhengradient > 20° bzw. nur an den Rändern des Bereichs Tiefenlage des verwendbaren seismischen Markerhorizonts: 200 – 400 m (mittlerer Abstand zwischen Schuss- und Geophonlinien) Oberflächennutzung: Felder und Wiesen mit kleineren Ortschaften und vereinzelten Waldgebieten Ankoppelungsbedingungen: quartäre Ablagerungen (> 25 m) in einem Teil des Bereichs (10 – 30 %); bei Karstverdacht: Abzug einer Bewertungsstufe	
	Bedingt günstig	Topographie: Teile des Bereichs (< 30 %) mit Höhengradient > 20° Tiefenlage des verwendbaren seismischen Markerhorizonts: 100 – 200 m (geringer Abstand zwischen Schuss- und Geophonlinien) Oberflächennutzung: überwiegend Waldgebiete und Gebiete mit grösseren Ortschaften (> 30 %) Ankoppelungsbedingungen: quartäre Ablagerungen (> 25 m) im Grossteil des Bereichs (> 30 %); bei Karstverdacht: Abzug einer Bewertungsstufe	
	Ungünstig	Topographie: Grossteil des Bereichs (> 30 %) mit Höhengradient > 20° Tiefenlage: 0 – 100 m (sehr geringer Abstand zwischen Schuss- und Geophonlinien notwendig) Oberflächennutzung: Flüsse, Seen, Moorlandschaften, reine Industriegebiete bzw. mehr als 50 % Ortschaften Ankoppelungsbedingungen: mächtige (> 50 m) quartäre Ablagerungen im Grossteil des Bereichs (> 30 %)	

Hintergrundinformationen

1. Relevanz für Langzeitsicherheit bzw. bautechnische Machbarkeit

Die Explorationsbedingungen an der Oberfläche haben einen massgeblichen Einfluss auf die Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen, und damit auch auf die Belastbarkeit des Langzeitsicherheitsnachweises und das Projektrisiko.

Relevantes Prinzip:	Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen
Relevante Elemente des Barrierensystems:	Geologische Situation
Sicherheitsrelevante Eigenschaften:	Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen (Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse)

2. Beschreibung und zugehörige Grundlagen

Der Indikator 'Explorationsbedingungen an Oberfläche' dient der Beurteilung der bevorzugten Bereiche im Hinblick auf ihre Explorierbarkeit von der Oberfläche aus. Die Beurteilung erfolgt anhand der Parameter Topographie, Tiefenlage des verwendbaren seismischen Markerhorizonts, Oberflächennutzung und Ankopplungsbedingungen.

Die Explorationsbedingungen im tiefen geologischen Untergrund werden separat und wirtgesteinsspezifisch bewertet (s. Indikator 'Explorationsverhältnisse im geologischen Untergrund').

Für seismische Untersuchungen sind die folgenden lokalen Rahmenbedingungen an der Oberfläche relevant:

Topographie

Komplexe Topographien erhöhen den Aufwand der seismischen Datenverarbeitung und können die Qualität negativ beeinflussen. Die Topographie beeinflusst zudem die Zugänglichkeit eines Bereichs und damit die Akquisitionskosten bzw. die Machbarkeit. Unter dem Punkt Topographie werden der lokale Höhengradient und die Komplexität berücksichtigt. Falls Bereiche mit hohen Gradienten kleinräumig mit Zonen mit geringen Gradienten abwechseln (Berg/Tal), wird dies qualitativ (abwertend) berücksichtigt.

Tiefenlage

Die Tiefe des zu untersuchenden Wirtgesteins bzw. der mit dem Wirtgestein assoziierten Markerhorizonte (Ober- und Unterkante Wirtgestein) beeinflusst den Aufwand der Akquisition bzw. die Machbarkeit, da untiefe Ziele ein dichteres Netz an Quellen und Empfängern verlangen, eine Bedingung, die aus logistischen Gründen in besiedelten Gebieten für die 3D-Seismik leicht zur "no-go" Bedingung werden (Rasterabstand der Schuss- und Geophonlinien < 100 m). Es wird die Tiefenlage des in Frage kommenden Markerhorizonts (bzw. Reflektors) bewertet.

Oberflächennutzung

Die Oberflächennutzung beeinflusst den Aufwand während der Akquisition bzw. die Machbarkeit; z.B. sind Felder einfacher zugänglich als Wälder. Die Oberflächennutzung kann auch die erreichbare Abbildungsqualität beeinträchtigen bzw. verunmöglichen, z.B. wenn in dicht besiedelten Gebieten keine seismischen Quellen platziert werden können und somit Durchführung einer 3D-Seismik-Messkampagne unmöglich ist.

Ankopplungsbedingungen

Die Existenz von Lockersedimenten an der Oberfläche kann die Ankopplung seismischer Quellen und Empfänger beeinträchtigen und die erreichbare Abbildungsqualität verringern. Es wird hierzu die Mächtigkeit der Lockersedimente betrachtet. Weitere Parameter wie Ausbildung und Wassersättigung werden erst in einer späteren Projektphase berücksichtigt. Oberflächennahe Verkarstung mit ihren Hohlräumen kann ebenfalls die erreichbare Abbildungsqualität beeinträchtigen. Hierzu werden die anstehenden Lithologien, in der Literatur beschriebene Karsthöhlen sowie zur Trinkwasserversorgung genutzte Karst-Aquifere berücksichtigt.

Bei Sondierbohrungen hängen die technische Machbarkeit und die Kosten u. a. von der Zugänglichkeit des Standorts und der Stabilität des Baugrunds für die Bohranlagen ab. Relevante Standortparameter sind die Zugänglichkeit, die Lage von Schutzgebieten (Naturschutz, Wasserschutz), sowie der Baugrund (Standfestigkeit, Rutschungen etc.).

3. Erläuterung der Anforderungen und Bewertungsskalen

Der Indikator 'Explorationsbedingungen an Oberfläche' fliesst in die Evaluation der Konfigurationen in Schritt 5 ein, einerseits als Mindestanforderung in Schritt 5.1 und andererseits in die Bewertung der bevorzugten Bereiche in Schritt 5.3 (s. oben). Die Bewertungsskalen für SMA und HAA sind identisch. Es werden keine verschärften Anforderungen gestellt.

- **Mindestanforderung für SMA und HAA** (Schritt 5.1) – Bereiche, in denen die Exploration anhand obiger Faktoren als unmöglich beurteilt wird, werden von der weiteren Evaluation ausgeschlossen.
- **Bewertungsskala für SMA und HAA** (Schritt 5.3) – Die Gesamtbewertung für den Indikator 'Explorationsbedingungen an Oberfläche' ergibt sich durch eine gewichtete Mittelung der Bewertung der Einsatzmöglichkeiten und Erfolgsaussichten für Seismik und Bohrungen, wobei die Seismik höher gewichtet wird. Die Seismikbewertung ergibt sich aus der Evaluation der Parameter Topographie, Tiefenlage des verwendbaren seismischen Markerhorizonts, Oberflächennutzung und Ankoppelungsbedingungen. Die Bewertungsstufen sind selbsterklärend und bedürfen keiner weiteren Erläuterung.

A1.45 Tektonisches Regime (konzeptionell zu meidende Zonen)

Festlegung der Anforderungen und Bewertungsskalen

Schritt/ Kriterium	Attribut	Anforderungen und Bewertungsskalen	
		SMA	**HAA**
5.2/3.3	Verschärfte Anforderung (VA)	Randzone Hegau-Bodensee-Graben wird gemieden	

Hintergrundinformationen

1. Relevanz für Langzeitsicherheit bzw. bautechnische Machbarkeit

Die tektonischen Regimes werden für die geologisch-tektonische Charakterisierung verwendet (tektonische Überprägung, neotektonische Aktivität), vgl. Nagra (2008c), Kap. 5.2.3.4. Dabei wird auch die Möglichkeit einer erhöhten neotektonischen Aktivität beurteilt: Mit dem Indikator 'Tektonisches Regime (konzeptionell zu meidende Zonen)' werden Zonen erfasst, in denen eine erhöhte neotektonische Aktivität aus konzeptionellen Gründen nicht ausgeschlossen werden kann und die deshalb gemieden werden. Eine erhöhte neotektonische Aktivität wirkt sich ungünstig auf die Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften und auf die Zuverlässigkeit der entsprechenden geologischen Aussagen aus (Prognostizierbarkeit).

Relevante Sicherheitsfunktionen:	Isolation Gewährleistung der Langzeitstabilität
Relevante Elemente des Barrierensystems:	Geologische Situation
Sicherheitsrelevante Eigenschaften:	Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften (im Hinblick auf kleinräumige Zergliederung)

Relevante Sicherheitsfunktion:	Einschluss
Relevante Elemente des Barrierensystems:	Endlagerbehälter Weitere technische Barrieren
Sicherheitsrelevante Eigenschaften:	Geometrische und geomechanische Bedingungen

Relevante Sicherheitsfunktionen:	Rückhaltung Kleine Freisetzungsraten
Relevante Elemente des Barrierensystems:	WG/EG
Sicherheitsrelevante Eigenschaften:	Räumliche Ausdehnung WG/EG (lange Freisetzungspfade durch Sicherheitsabstand zu Störungszonen)

Relevante Prinzipien:	Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen
Relevante Elemente des Barrierensystems:	WG/EG Geologische Situation
Sicherheitsrelevante Eigenschaften:	Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen (Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen)

2. Beschreibung und zugehörige Grundlagen

Es gibt Zonen, bei denen aus tektonisch-neotektonischen Gründen (Modellvorstellungen zur Geodynamik, Hinweise aus Seismizität etc.) eine erhöhte neotektonische Aktivität nicht ausgeschlossen werden kann. Die Beurteilung solcher Zonen erfolgt auf der Stufe der tektonischen Regimes[115]. Ungünstige tektonische Regimes werden mit dem Indikator 'Tektonisches Regime (konzeptionell zu meidende Zonen)' identifiziert und aus Gründen der Langzeitstabilität bzw. der Zuverlässigkeit der entsprechenden geologischen Aussagen gemieden (vgl. Diskussion in Nagra 2008c).

3. Erläuterung der Anforderungen und Bewertungsskalen

Der Indikator 'Tektonisches Regime (konzeptionell zu meidende Zonen)' fliesst in die Evaluation der Konfigurationen in Form einer verschärften Anforderung in Schritt 5.2 ein (s. oben). Die Anforderungen für SMA und HAA sind identisch. Es werden keine Mindestanforderungen und Bewertungsskalen verwendet.

- **Verschärfte Anforderung für SMA und HAA** (Schritt 5.2) – Im Sinne eines vorsichtigen Vorgehens wird den bestehenden Ungewissheiten bzgl. Langzeitstabilität Rechnung getragen, indem tektonische Regimes mit ungewisser Langzeitstabilität bzw. unzureichender Zuverlässigkeit der entsprechenden geologischen Aussagen bei der Auswahl von bevorzugten Bereichen gemieden werden. Der Indikator 'Tektonisches Regime (konzeptionell zu meidende Zonen)' fliesst deshalb in der Form einer verschärften Anforderung in Schritt 5.2 ein. Aufgrund der Zwischenresultate aus den Schritten 3, 4 und 5.1 (Langzeitstabilität der Grossräume, Verbreitungsraum der bevorzugten Wirtgesteine, Kenntnisse über die verbleibenden tektonischen Regimes) wird für die flächenhaft vorkommenden Wirtgesteine bei der Abgrenzung von bevorzugten Bereichen einzig die Randzone des Hegau-Bodensee-Grabens gemieden. Bei tektonischen Akkumulationen (insbesondere Mergel-Formationen des Helvetikums) entfällt die Beurteilung des Indikators 'Tektonisches Regime (konzeptionell zu meidende Zonen)'.

[115] Tektonische Regimes sind grössere zusammenhängende Gebiete in ähnlicher geologisch-tektonischer Lage und mit gleicher geologisch-tektonischer Entstehungsgeschichte.

A1.46 Unabhängige Evidenzen der Langzeitisolation

Festlegung der Anforderungen und Bewertungsskalen

Schritt/ Kriterium	Attribut	Anforderungen und Bewertungsskalen	
		SMA	**HAA**
4.3/3.3	Sehr günstig	Mehrere klare unabhängige Evidenzen für Langzeitisolationsvermögen	
	Günstig	Mindestens eine klare unabhängige Evidenz für Langzeitisolations-vermögen	
	Bedingt günstig	Es gibt gewisse Hinweise, die als unabhängige Evidenz für das Lang-zeitisolationsvermögen gedeutet werden können	
	Ungünstig	Es sind keine unabhängigen Evidenzen bekannt	
5.3/3.3	Bewertungs-skala	Bewertungsstufen wie in Schritt 4.3/Kriterium 3.3	

Hintergrundinformationen

1. Relevanz für Langzeitsicherheit bzw. bautechnische Machbarkeit

Unabhängige Evidenzen für das Langzeitisolationsvermögen des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs liefern belastbare Hinweise für die hydraulische Barrierenwirkung des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs, tragen wesentlich zur Belastbarkeit der geologischen Aussagen bei (heutige Verhältnisse und Prognostizierbarkeit der zeitlichen Entwicklung) und erhöhen damit die Belastbarkeit des Langzeitsicherheitsnachweises.

Relevante Sicherheitsfunktionen:	Rückhaltung Kleine Freisetzungsraten
Relevante Elemente des Barrierensystems:	WG/EG
Sicherheitsrelevante Eigenschaften:	Transporteigenschaften (im Hinblick auf geringe Wasserführung und vorherrschende Transport-prozesse)

Relevantes Prinzip:	Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen
Relevante Elemente des Barrierensystems:	Geologische Situation WG/EG
Sicherheitsrelevante Eigenschaften:	Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen (Prognostizierbarkeit der Langzeitverän-derungen)

2. Beschreibung und zugehörige Grundlagen

Der Indikator 'Unabhängige Evidenzen der Langzeitisolation' fliesst in die Beurteilung der Prognostizierbarkeit von Langzeitveränderungen der Gesteinseigenschaften in den bevorzugten Wirtgesteinen ein.

Die Prognostizierbarkeit des Langzeitisolationsvermögens wird anhand unabhängiger Evidenzen beurteilt (z.B. Einschluss alter Porenwässer, hydrochemische Zonierung, Anwesenheit/Verteilung natürlicher Tracerstoffe, anomale hydraulische Drücke), die auf eine langfristig geringe Wasserzirkulation bzw. auf langsame Transportprozesse schliessen lassen (vgl. Diskussion in Nagra 2008c). Es handelt sich hier häufig um allgemeine wirtgesteinsbezogene Erfahrungen, welche nur teilweise von den standortbezogenen Bedingungen abhängen. Wo unabhängige Evidenzen für die Dichtheit des Wirtgesteins vorliegen, werden diese auch bei der Beurteilung der Durchlässigkeit berücksichtigt (vgl. Indikator 'Hydraulische Durchlässigkeit').

3. Erläuterung der Anforderungen und Bewertungsskalen

Der Indikator 'Unabhängige Evidenzen der Langzeitisolation' fliesst in die Bewertung der bevorzugten Wirtgesteine in Schritt 4.3 und der bevorzugten Bereiche in Schritt 5.3 ein (s. oben). Die Bewertungsskalen für SMA und HAA sind identisch. Es werden keine Mindestanforderungen und verschärften Anforderungen verwendet.

- **Bewertungsskala für SMA und HAA** (Schritte 4.3 und 5.3) – Als *sehr günstig* (bzw. *günstig*) werden Situationen eingestuft, in denen mehrere klare unabhängige Evidenzen (bzw. mindestens eine klare Evidenz) für das Langzeitisolationsvermögen des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs existieren. Gibt es gewisse Hinweise, die als unabhängige Evidenz für das Langzeitisolationsvermögen gedeutet werden können, so wird dies als *bedingt günstig* eingestuft. Sind keine unabhängigen Evidenzen bekannt, so wird dies als *ungünstig* gewertet.

A1.47 Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften

Festlegung der Anforderungen und Bewertungsskalen

Schritt/ Kriterium	Attribut	Anforderungen und Bewertungsskalen	
		SMA	**HAA**
4.1/4.1	Mindest-anforderung (MA)	Kein kohäsionsloses, praktisch unkonsolidiertes Gestein, keine extrem geringe Festigkeit, keine extrem hohe Zerklüftung (sehr engständig und kleine Festigkeiten in den Trennflächen)	
4.3/4.1		Graduelle Abstufung gemäss nachfolgenden Festigkeiten (einaxiale Druckfestigkeit) mit Abzügen bei starker Anisotropie (infolge Schichtung und Schieferung), Heterogenität und Wasserzutritt (in Anlehnung an SIA-Klassifikation):	
	Sehr günstig	Hohe Festigkeiten (> 100 MPa)	
	Günstig	Mittlere bis hohe Festigkeiten (20 – 100 MPa)	
	Ungünstig bis bedingt günstig (graduelle Abstufung)	Kleine bis mittlere Festigkeiten (5 – 20 MPa)	
5.3/4.1		Bewertungsskala wie in Schritt 4.3/Kriterium 4.1 mit weiteren Abzügen unter Berücksichtigung der tektonischen Überprägung und des erwarteten Trennflächengefüges (Klüftung, Scherhorizonte); Schichtung und Schieferung in Bewertung aus Schritt 4.3/Kriterium 4.1 bereits berücksichtigt:	
	Kein Abzug	Bei weitgehend fehlenden Trennflächen oder für weitständige Trennflächenabstände mit mittleren Festigkeiten in Trennflächen oder Trennflächen geringer linearer Erstreckung (entspricht tektonischem Regime: "Tafeljura s.str.")	
	Abzug um halben Skalenschritt	Für mittlere Trennflächenabstände mit mittleren oder kleinen Festigkeiten in Trennflächen (entspricht tektonischem Regime: "Vorfaltenzone")	
	Abzug um ganzen Skalenschritt	Für engständige Trennflächenabstände und kleine Festigkeiten in Trennflächen (entspricht tektonischem Regime: "östliche Subjurassische Zone")	

Hintergrundinformationen

1. Relevanz für Langzeitsicherheit bzw. bautechnische Machbarkeit

Es werden die felsmechanischen Eigenschaften und Bedingungen im Wirtgestein im Hinblick auf die bautechnischen Bedingungen während Bau, Betrieb, Überwachung und Verschluss des geologischen Tiefenlagers sowie im Hinblick auf eine allfällige Rückholung der Abfälle beurteilt. Die geotechnischen Eigenschaften bestimmen die Art der Ausbruchsicherung und die bautechnischen Möglichkeiten (Ausbruchquerschnitt, Wahl der Baumethode etc.) um die Lagerkammern – unter Berücksichtigung der sicherheitstechnischen Anforderungen – zuverlässig und sicher erstellen, betreiben, verfüllen und versiegeln zu können.

Relevante Sicherheitsfunktion:	Einschluss
Relevante Elemente des Barrierensystems:	Endlagerbehälter Weitere technische Barrieren
Sicherheitsrelevante Eigenschaften:	Geomechanische Bedingungen

Relevantes Prinzip:	Zuverlässige Erstellung der geologischen Tiefenlager
Relevante Elemente des Barrierensystems:	WG/EG Verfüllung & Versiegelung
Sicherheitsrelevante Eigenschaften:	Geotechnische Eigenschaften (im Hinblick auf den Bau, den Verschluss und eine allfällige Rückholung der Abfälle)

2. Beschreibung und zugehörige Grundlagen

Ob durch Bau, Verfüllung und Verschluss der untertägigen Anlagenteile günstige Voraussetzungen für die Langzeitsicherheit geschaffen werden können, hängt neben den felsmechanischen Parametern auch vom primären Gebirgsspannungszustand sowie von der Raumlage und Grösse der zu erstellenden Hohlräume ab. Die Beurteilung der Wirtgesteine erfolgt für vergleichbare Tiefen unter Berücksichtigung der möglichen Querschnitte der Lagerkammern. Die berücksichtigten Parameter unter dem Gesichtspunkt der bautechnischen Machbarkeit sind:

- Eigenschaften des Gesteins (wirtgesteinsspezifische Beurteilung in Schritt 4): Festigkeit (einaxiale Druckfestigkeit), Anisotropie (infolge Schichtung und Schieferung) bzw. Festigkeiten in Schicht- und Schieferungsfugen, Heterogenität, Verhalten bei Wasserzutritt[116], sowie die hydrogeologischen Bedingungen[117] (in Anlehnung an die SIA-Klassifikation gemäss SIA Empfehlung 199 /1998)
- Tektonische Überprägung und erwartetes Trennflächengefüge (konfigurationsspezifische Beurteilung in Schritt 5): Klüftung, Scherhorizonte, Festigkeiten in Trennflächen, Grösse der Trennflächen

Günstig sind felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen, welche es erlauben, die Lagerkammern mit einer aus sicherheitstechnischer Sicht akzeptierbaren Sicherung und mit begrenzten Deformationen bzw. Auflockerungen zu erstellen. Damit wird eine günstige Ausgangslage für die zeitliche Entwicklung des Lagersystems geschaffen, auf dessen Basis die Langzeitsicherheit des Tiefenlagers gewährleistet und nachgewiesen werden kann.

Die Bewertungsskalen für den Indikator 'Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften' basieren auf Querschnitten für die Lagerkammern gemäss den zugrunde gelegten Lagerkonfigurationen (s. Anhang 2). Die Ausbruchquerschnitte der SMA-Lagerkavernen liegen zwischen ca. 60 m^2 bis ca. 220 m^2, diejenigen für BE/HAA-Lagerstollen bei ca. 5 m^2.

---

[116] Das Verhalten bei Wasserzutritt ist bei der Beurteilung der felsmechanischen Eigenschaften der bevorzugten Wirtgesteine wegen der geringen Durchlässigkeit von untergeordneter Bedeutung.

[117] Die hydrogeologischen Bedingungen (Art der Zirkulation, Druckhöhe, Durchlässigkeiten, Bergwasseranfall) sind aus Sicht von Tunnelbauerfahrungen massgebend zur Beurteilung der bautechnischen Eignung für die sichere und zuverlässige Realisierung der Tiefenlager. Diese werden deshalb in Anlehnung an die SIA Empfehlung 199 unter dem Indikator ‚Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften' integral berücksichtigt.

Grundlage für die Bewertungsstufen bilden orientierende felsmechanische Berechnungen auf der Basis von Datenkompilationen für die bevorzugten Wirtgesteine (Nagra 2004b, Nagra 2008i) sowie Erfahrungen aus früheren Systemanalysen von geologischen Tiefenlagern, insbesondere in den Projekten Entsorgungsnachweis/Opalinuston (Nagra 2002a-b), Kristallin-I (Nagra 1994a) und SMA/Wellenberg (Nagra 1994b, 1997), sowie Erfahrungen aus dem Berg- und Tunnelbau (z.B. SIA Empfehlung 199/1998).

Die Anforderungen und Bewertungsskalen an die Tiefenlage werden im Rahmen des Indikators 'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit' festgelegt und sind bei der Beurteilung der felsmechanischen Eigenschaften und Bedingungen ebenfalls zu berücksichtigen.

3. Erläuterung der Anforderungen und Bewertungsskalen

Der Indikator 'Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften' fliesst in die Evaluation der Wirtgesteine in Schritt 4 und der bevorzugten Bereiche in Schritt 5 ein (s. oben). Bei den Festlegungen handelt es sich um eine Mindestanforderung für den Schritt 4.1 sowie um Bewertungsskalen für die Schritte 4.3 und 5.3. Die Anforderungen und Bewertungsskalen für SMA und HAA sind identisch. Es werden keine verschärften Anforderungen verwendet.

- **Mindestanforderung für SMA und HAA** (Schritt 4.1) – Kein kohäsionsloses, praktisch unkonsolidiertes Gestein, keine extrem geringe Festigkeit, keine extrem hohe Zerklüftung (sehr engständige Zerklüftung und kleine Festigkeiten in den Trennflächen). Wird diese Mindestanforderung nicht erfüllt, so ist der Bau der Lagerkammern mit herkömmlichen Baumethoden nicht oder nur unter sehr erschwerten Bedingungen und mit massiven, aus sicherheitstechnischer Sicht nicht akzeptierbaren Stützmitteln realisierbar.
- **Bewertungsskala für SMA und HAA** (Schritt 4.3) – In einem ersten Schritt werden die Wirtgesteine unter Berücksichtigung der Gesteinseigenschaften unter der Annahme homogener Lagerung (Sedimente) ohne Trennflächen bewertet. Die Bewertungsstufen dienen als Orientierung bei der Beurteilung der felsmechanischen Bedingungen und sind nicht als absolut fix zu betrachten. Sie geben einen Hinweis auf den potenziellen bautechnischen Aufwand und auf die erforderliche Sicherung während des Baus der Lagerkammern. Die Bewertung erfolgt graduell abgestuft gemäss den nachfolgenden einaxialen Druckfestigkeiten, mit Abzügen bei starker Anisotropie (infolge Schichtung und Schieferung) bzw. ungünstigen Festigkeiten in Schicht- und Schieferungsfugen, Heterogenität, Wasserzutritt sowie ungünstigen hydrogeologischen Bedingungen (in Anlehnung an die Einstufung gemäss SIA Empfehlung 199 / 1998): Als *sehr günstig* werden hohe Festigkeiten von mehr als 100 MPa eingestuft, als *günstig* gelten mittlere bis hohe Festigkeiten von 20 – 100 MPa. Kleine bis mittlere Festigkeiten zwischen 5 – 20 MPa werden als *ungünstig* bis *bedingt günstig* eingestuft.
- **Bewertungsskala für SMA und HAA** (Schritt 5.3) – Neben den Gesteinseigenschaften bestimmen vor allem die tektonische Überprägung, das erwartete Trennflächengefüge (Klüftung, Scherhorizonte) und die *in-situ* Gebirgsspannungen die bautechnische Machbarkeit bzw. die Zuverlässigkeit der bautechnischen Umsetzung unter Berücksichtigung aller massgebenden Anforderungen. Die Bewertung der tektonischen Überprägung und des erwarteten Trennflächengefüges erfolgt anhand der konfigurationsspezifischen Abzüge in Tab. A1.47-1.

Tab. A1.47-1: Abzüge für die Bewertung der tektonischen Überprägung und des Trennflächengefüges in Schritt Schritt 5.3 (Indikator 'Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften').

Tektonische Überprägung und erwartetes Trennflächengefüge (Klüftung, Scherhorizonte)	Bei weitgehend fehlenden Trennflächen oder für weitständige Trennflächenabstände mit mittleren Festigkeiten in Trennflächen oder Trennflächen geringer linearer Erstreckung	Für mittlere Trennflächenabstände mit mittleren oder kleinen Festigkeiten in Trennflächen	Für engständige Trennflächenabstände und kleine Festigkeiten in Trennflächen
Tektonisches Regime	"Tafeljura s.str."	"Vorfaltenzone"	"östliche Subjurassische Zone"
Konfigurationsspezifischer Abzug in der Bewertung der Wirtgesteine (aus Schritt 4.3)	kein Abzug	Abzug um halbe Bewertungsstufe	Abzug um ganze Bewertungsstufe

A1.48 Geotechnische und hydrogeologische Verhältnisse in überlagernden Gesteinsformationen

Festlegung der Anforderungen und Bewertungsskalen

Schritt/ Kriterium	Attribut	Anforderungen und Bewertungsskalen	
		SMA	**HAA**
5.3/4.2	Sehr günstig	Nur lokale, wenig ausgedehnte grundwasserführende Quartärschichten, Festgesteine über dem Wirtgestein sind standfest und erfordern einen kleinen bautechnischen Aufwand (hohe Gesteinsfestigkeit, keine oder nur weitständiges Trennflächengefüge); keine Karstbildung, kein erhöhtes Wassereinbruchrisiko erwartet, Erdgas Gefahrenstufe 0 oder 1 (nach SUVA 2002)	
	Günstig	Graduelle Abstufung	
	Bedingt günstig		
	Ungünstig	Ausgedehnte, grundwasserführende Quartärschichten; grosse Abschnittslängen durch problematische Gesteinsformationen, welche einen grossen bautechnischen Aufwand erfordern (schwimmendes, quellendes und drückendes Gebirge); grosses Karst- und Wasser-einbruchrisiko, Erdgas Gefahrenstufe 4 (nach SUVA 2002)	

Hintergrundinformationen

1. Relevanz für Langzeitsicherheit bzw. bautechnische Machbarkeit

Es werden die geotechnischen und hydrogeologischen Verhältnisse in den überlagernden Gesteinsformationen im Hinblick auf die bautechnische Machbarkeit der Zugangsbauwerke zum geologischen Tiefenlager beurteilt. Diese Verhältnisse bestimmen die bautechnischen Möglichkeiten (Ausbruchquerschnitt, Sicherungsmittel, Wahl der Baumethode etc.), um die erforderlichen Zugangsbauwerke zuverlässig erstellen, betreiben und wieder verfüllen zu können.

Relevantes Prinzip:	Zuverlässige Erstellung der geologischen Tiefenlager
Relevante Elemente des Barrierensystems:	Geologische Situation
Sicherheitsrelevante Eigenschaften:	Geotechnische und hydrogeologische Verhältnisse (im Hinblick auf untertägige Erschliessung und Wasserhaltung)

2. Beschreibung und zugehörige Grundlagen

Der Indikator 'Geotechnische und hydrogeologische Verhältnisse in überlagernden Gesteinsformationen' dient einer integralen Bewertung der bautechnischen Verhältnisse in den überlagernden Gesteinsformationen, in erster Linie aus geotechnischer und aus hydrogeologischer Sicht. Massgebend für die Bewertung sind die folgenden Merkmale:

- die oberflächennahen bautechnischen Verhältnisse (Grundwasservorkommen, Quartärschichten)
- die erwarteten bautechnischen Schwierigkeiten pro zu durchfahrende Gesteinsformation (felsmechanische Bedingungen, Standsicherheit, Deformationen)
- der Mächtigkeit der bautechnisch schwierigen Gesteinsformationen (Länge der problematischen Untertagebaustrecken) mit erhöhten bautechnischen Schwierigkeiten
- Erdgas führende Gesteinsformationen
- stark wasserführende Gesteinsformationen (Aquifere, Karst)

Oberflächennahe Gesteinsformationen (Quartär, Gehängelehme) sowie Grundwasservorkommen können erst beurteilt werden, wenn die Standorte für die Empfangsanlage und die Schächte in groben Zügen bekannt sind. Dies ist Gegenstand der Etappe 2 des SGT, in deren Verlauf mindestens zwei Standorte je für SMA und HAA ausgewählt werden. Die oberflächennahen bautechnischen Verhältnisse werden deshalb bei der Standortevaluation in der Etappe 1 nur global betrachtet.

Mit Ausnahme der Mergel-Formationen des Helvetikums liegen alle bevorzugten Wirtgesteine stratigraphisch im Dogger oder im unteren Malm. Somit sind in der Regel zur Erschliessung der geologischen Tiefenlager Schichten des Malms und je nach Wirtgestein des oberen und mittleren Doggers zu durchörtern. Abhängig vom Standort sind zusätzlich Molasseschichten (Tertiär) und eventuell quartäre Lockergesteine zu durchfahren. Aufgrund der Lithologie und der zu erwartenden tektonischen Überprägung können diese Schichten in Bezug auf ihre bautechnische Schwierigkeit charakterisiert werden. Diese Charakterisierung erfolgt qualitativ für jede geologische Einheit in Anlehnung an die SIA Empfehlung 199 (1998).

Für eine integrale Bewertung der bautechnischen Probleme sind auch die Abschnittslängen in den als schwierig charakterisierten Gesteinsformationen relevant. Die Abschnittslängen der Erschliessungsbauwerke sind ungefähr proportional zur Mächtigkeit der Gesteinsschichten.

Der Wasserzufluss in die Erschliessungsbauwerke ist aus Gründen der Sicherheit (Minimierung Wasserzufluss in die Lagerzone bis zum endgültigen Verschluss) und der Umweltverträglichkeit (keine dauerhafte Absenkung des Grundwasserspiegels) möglichst zu minimieren. Bei Schichten mit sehr grossem Wasserzufluss – vor allem bei wasserführenden verkarsteten Schichten – sind diesbezüglich bedeutende bautechnische Schwierigkeiten zu meistern. Im Hinblick auf die natürliche Gasführung sind entsprechende Massnahmen zu treffen (Gasüberwachung, Ventilation).

3. Erläuterung der Anforderungen und Bewertungsskalen

Der Indikator 'Geotechnische und hydrogeologische Verhältnisse in überlagernden Gesteinsformationen' fliesst in die Bewertung der bevorzugten Bereiche in Schritt 5.3 ein (s. oben). Die Bewertungsskalen für SMA und HAA sind identisch. Es werden keine Mindestanforderungen und verschärften Anforderungen an die bautechnische Eignung der überlagernden Gesteinsformationen gestellt.

- **Bewertungsskalen für SMA und HAA** (Schritt 5.3) – Als *sehr günstig* werden Situationen eingestuft, die nur lokale, wenig ausgedehnte grundwasserführende Quartärschichten aufweisen (diesen Zonen kann ausgewichen werden), in denen die Festgesteine über dem Wirtgestein standfest sind und einen kleinen bautechnischen Aufwand erfordern (hohe Gesteinsfestigkeit, keine oder nur weitständiges Trennflächengefüge), in denen keine wasserführenden Karste und kein erhöhtes Wassereinbruchrisiko erwartet werden und die der Erdgas-Gefahrenstufe 0 oder 1 (nach SUVA 2002) entsprechen.

  Ausgehend von der Bewertungsstufe *sehr günstig* werden bei entsprechend ungünstigen Verhältnissen bzgl. der folgenden Merkmale Abzüge in der Bewertung vorgenommen: Fläche der grundwasserführenden Quartärschichten innerhalb des bevorzugten Bereichs[118], bautechnischer Aufwand[119], Karst- und Wassereinbruchrisiko[120] und Erdgas-Gefahrenstufe.

[118] Insbesondere bei der Erschliessung der Lagerzone mittels Schächten ist die Flexibilität bzgl. Platzierung vergleichsweise gering. Sind grössere Flächen mit grundwasserführenden Quartärschichten vorhanden, so können die Schächte nicht mehr ohne weiteres ausserhalb dieser grundwasserführenden Zonen angeordnet werden.

[119] Abzüge für Schichten (gewichtet nach Schichtmächtigkeit), für welche der bautechnische Aufwand als 'gross' (Tertiär/Molasse), 'mittel' (Mittlerer und unterer Malm (Tonmergelzwischenlagen), Oberer und Mittlerer Dogger (Tonsteinfazies/Mischfazies)) bzw. 'klein' (Oberer Malm (Kalkstein), Oberer und Mittlerer Dogger (Kalkstein)) charakterisiert wird. Weitere Abzüge erfolgen aufgrund der tektonischen Überprägung (tektonische Regimes).

[120] Wasserführende Karste mit hohen Wasserdrücken und grossen Wassermengen werden vor allem in den Paläokarsten des oberen Malms erwartet.

A1.49 Natürliche Gasführung (im Wirtgestein)

Festlegung der Anforderungen und Bewertungsskalen

Schritt/ Kriterium	Attribut	Anforderungen und Bewertungsskalen	
		SMA	**HAA**
5.1/4.2	Mindest-anforderung (MA)	Keine nachgewiesenen Erdgaslagerstätten im Wirtgestein (entsprechend Gefahrenstufe 4 nach SUVA (2002): Gas möglich oder sicher, mit Gas-Überflutungsgefahr, Ausgasen während langer Zeit)	
5.3/4.2	Sehr günstig	Keine Erdgasanzeichen bekannt (Gefahrenstufe 0 nach SUVA (2002))	
	Günstig	Kleinere Erdgas-Indikationen (Gefahrenstufe 1 nach SUVA (2002): Gas möglich oder sicher, ohne Gas-Überflutungsgefahr, Ausgasen während kurzer Zeit)	
	Bedingt günstig	Mässige Erdgasführung (Gefahrenstufe 2 nach SUVA (2002): Gas möglich oder sicher, ohne Gas-Überflutungsgefahr, Ausgasen während langer Zeit)	
	Ungünstig	Signifikante Erdgasführung (Gefahrenstufe 3 nach SUVA (2002): Gas möglich oder sicher, mit Gas-Überflutungsgefahr, Ausgasen während kurzer Zeit)	

Hintergrundinformationen

1. Relevanz für Langzeitsicherheit bzw. bautechnische Machbarkeit

Erdgaseintritte (v.a. Methan) während Bau, Betrieb und Verschluss des Tiefenlagers und die damit verbundene Explosionsgefahr stellen eine Gefährdung der Sicherheit dar und können die zuverlässige Erstellung und den Betrieb des Tiefenlagers in Frage stellen.

Relevantes Prinzip:	Zuverlässige Erstellung der geologischen Tiefenlager
Relevante Elemente des Barrierensystems:	Geologische Situation
Sicherheitsrelevante Eigenschaften:	Geotechnische und hydrogeologische Verhältnisse (im Hinblick auf die Gefährdung durch Erdgaseintritte in die untertägigen Anlagen innerhalb des Wirtgesteins)

2. Beschreibung und zugehörige Grundlagen

Mit dem Indikator 'Natürliche Gasführung (im Wirtgestein)' werden Erdgaseintritte (v.a. Methan) aus dem Wirtgestein vor allem während des Baus, des Betriebs und der Verfüllung des Tiefenlagers beurteilt. Aufgrund der Explosionsgefahr müssen nachgewiesene Gas-Lagerstätten im Wirtgestein bei der Identifikation von potenziell möglichen Bereichen in Schritt 5 gemieden werden.

Bei der Beurteilung stehen die konfigurationsspezifischen Verhältnisse im Vordergrund. Durch die lange Betriebszeit sind auch relativ kleine Gaseintrittsraten relevant, da die Gefahr einer Akkumulation von Gasen in abgeschotteten Hohlräumen besteht. Die Beurteilung erfolgt in Anlehnung an die SUVA-Vorschriften bzgl. Erdgasgefährdung bei Untertagebauten (SUVA 2002). Das mögliche Auftreten von toxischen Gasen (Schwefelwasserstoffgas) wird erst im Rahmen späterer Standortuntersuchungen bewertet.

Die Beurteilung der natürlichen Gasführung in den Gesteinsschichten oberhalb des Wirtgesteins und bzgl. der im Tiefenlager produzierten Gase erfolgt im Rahmen der Indikatoren 'Geotechnische und hydrogeologische Verhältnisse in überlagernden Gesteinsformationen' und 'Verhalten des Wirtgesteins bzgl. Gas'.

3. Erläuterung der Anforderungen und Bewertungsskalen

Der Indikator 'Natürliche Gasführung (im Wirtgestein)' fliesst in der Form einer Mindestanforderung und einer Bewertungsskala in die Evaluation der Konfigurationen in Schritt 5 ein (s. oben). Die Beurteilung der natürlichen Gasführung im Wirtgestein erfolgt in Anlehnung an die SUVA-Vorschriften bzgl. Erdgasgefährdung bei Untertagebauten (SUVA 2002). Die Anforderungen und Bewertungsskalen für SMA und HAA sind identisch.

- **Mindestanforderung für SMA und HAA** (Schritt 5.1) – Nachgewiesene Erdgaslagerstätten im Wirtgestein, die der Gefahrenstufe 4 nach SUVA 2002 entsprechen[121], sind zu meiden.
- **Bewertungsskalen für SMA und HAA** (Schritt 5.3) – Als *sehr günstig* werden Situationen ohne bekannte Erdgasanzeichen eingestuft (entspricht Gefahrenstufe 0 nach SUVA 2002: kein Gasvorkommen). Als *günstig* werden Situationen mit kleineren Erdgas-Indikationen eingestuft (Gefahrenstufe 1), als *bedingt günstig* bzw. *ungünstig* eine mässige bzw. signifikante Erdgasführung (Gefahrenstufe 2 bzw. 3).

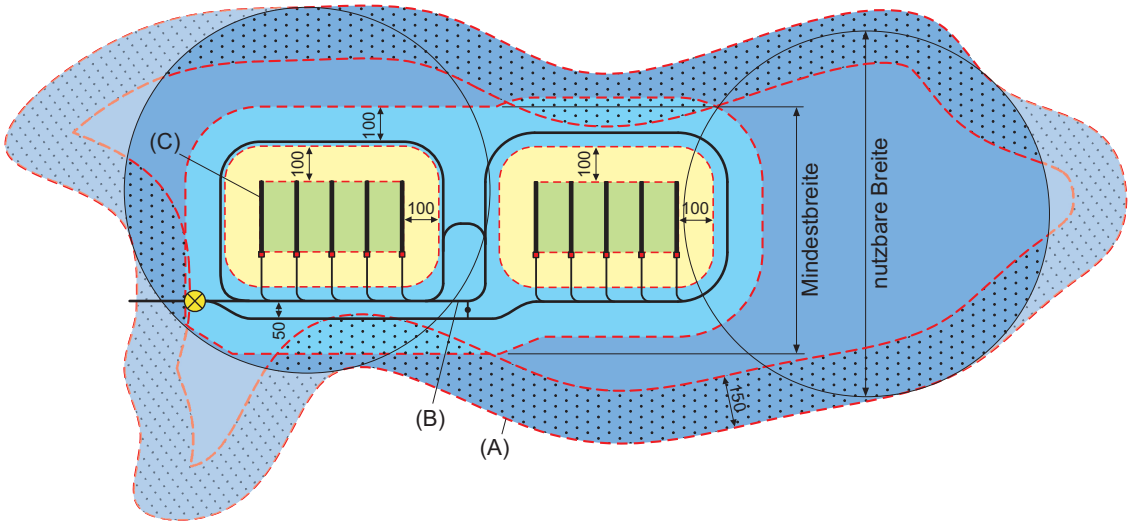
[121] Nach SUVA (2002) ist die Gefahrenstufe 4 durch die folgenden Merkmale definiert: Gasvorkommen ist möglich oder sicher; es herrscht Überflutungsgefahr (d.h. Austreten von Gas in grossen Mengen pro Zeiteinheit aus dem Gestein, aus Klüften oder anderen Hohlräumen); Ausgasen während langer Zeit (d.h. andauerndes Ausgasen auf gleichem Niveau oder mit nur geringfügigem Abklingen).

Anhang 2 Lagerkonfigurationen für das SMA- und das HAA-Lager

A2.1 Einleitung

Grundlage für die Ableitung der Lagerkonfigurationen bilden diverse Planungsstudien, Konzepte und Projekte, welche vom Entsorgungsnachweis für ein HAA-Lager (Nagra 2002b) und dem Projekt Wellenberg für ein SMA-Lager (GNW 1994) ausgehen. Die Anlagen und Betriebskonzepte werden für die verschiedenen Meilensteine weiterentwickelt und angepasst; die nachfolgend festgelegten Lagerkonfigurationen geben den für die Etappe 1 des Sachplanverfahrens verwendeten Projektstand wieder.

Die Lagerkonfiguration berücksichtigt neben den standortspezifischen Randbedingungen insbesondere die einzulagernden Abfallmengen. Sie wird zudem bestimmt durch die Geometrie der Lagerkammern (Querschnittsfläche und Länge) sowie die Lagerarchitektur (Anordnung der Lagerkammern und der untertägigen Erschliessung, Abstände zwischen Anlageteilen). In den nachfolgenden Abschnitten werden die relevanten Lagerelemente beschrieben und die für die Einengung und Bewertung verwendeten Lagerkonfigurationen erläutert. Dazu werden verschiedene, konfigurationsrelevante Begriffe verwendet, welche nachfolgend definiert werden (vgl. Fig. A2.1-1).



Begriff		Definition
Laterale Ausdehnung		Grösse der projizierten Fläche eines Bereichs oder einer Lagerzone
Bereichsbegrenzende geologische Elemente	(A)	Geologische Elemente (z.B. regionale Störungszonen, Mindest-überdeckung, maximale Tiefenlage, welche aufgrund von sicher-heitstechnischen Anforderungen oder der bautechnischen Machbarkeit bereichsbegrenzend sind
Erschliessungsbauwerke, Testbereiche	(B)	Untertägige Anlagenteile auf Lagerebene, welche für die Realisierung (Bau, Betrieb, Überwachung und Verschluss) des Tiefenlagers erforderlich sind
Lagerkammer	(C)	Untertägiger Hohlraum zur dauerhaften Einlagerung der radioaktiven Abfälle
Lagerkammerbereich		Bereich (Grundfläche), welcher eine Gruppe von Lagerkammern einschliesst
Lagerfeld		Lagerkammerbereich inkl. Fläche mit horizontalem Mindestabstand um die Lagerkammern
Lagerzone (alle eingefärbten Flächen)		Bereich (Grundfläche), welcher von bereichsbegrenzenden und/oder auslegungsbestimmenden geologischen Elementen eingeschlossen wird
Bereich zum Ausgleich unregel-mässiger Form der Lagerzone		Flächenzuschlag, welcher die Anordnung von Tiefenlagern (Lagerfelder und Erschliessungsbauwerke) begünstigt
Erforderliche Lagerzone		Erforderlicher Bereich (Grundfläche) zur Anordnung des Tiefenlagers
Mindestbreite des Tiefenlagers		Mindestbreite des Tiefenlagers (bzw. der erforderlichen Lagerzone)
Nutzbare Breite		Mindestbreite der Lagerzone, der für die zuverlässige Anordnung des Tiefenlagers erforderlich ist
Nutzbare Lagerzone		Bereich (Grundfläche) der Lagerzone, die für die zuverlässige Anordnung des Tiefenlagers eine günstige Form aufweist (Durch Innkreis mit Durchmesser der nutzbaren Breite bestimmt)
Nicht nutzbare Lagerzone		Bereich (Grundfläche) der Lagerzone, der aufgrund der Breite keine günstige Form für die zuverlässige Anordnung des Tiefenlagers aufweist

Fig. A2.1-1: Verwendete Terminologie zu den Lagerkonfigurationen für SMA und HAA.

Die 'nicht nutzbare Lagerzone' wird bei der vereinfachten Prüfung (Indikator 'Laterale Ausdehnung') als nicht nutzbare Lagerzone qualifiziert. Diese Fläche erfüllt aber alle übrigen sicherheitstechnischen und bautechnischen Anforderungen und kann bei der detaillierten Auslegung des Tiefenlagers für Teile der untertägigen Lagerbauten genutzt werden.

A2.2 Menge der radioaktiven Abfälle

Für die Festlegung des Platzbedarfs des SMA- und des HAA-Lagers ist das umhüllende Abfallinventar gemäss Tab. A2.2-1 massgebend (vgl. Erläuterungen in Kap. 3.3). Darauf basieren die nachfolgend abgeleiteten Lagerkonfigurationen. Dabei wird auch berücksichtigt, dass die Abfälle nicht gleichmässig anfallen und deshalb das Tiefenlager in Etappen erstellt, betrieben und verschlossen wird.

Tab. A2.2-1: Abfallmengen für das SMA- bzw. HAA-Lager für die Festlegung von Vorschlägen für geologische Standortgebiete in Etappe 1 des Sachplans geologische Tiefenlager. Massgebend ist das aufgeführte umhüllende Abfallinventar (vgl. Kap. 3.3.2.3, S. 105).

Abfallvolumen konditioniert und in Endlagerbehälter verpackt.

Lagertyp	**HAA-Lager**		**SMA-Lager**
Lagerkammer	in BE-/HAA-Stollen	in LMA-Tunnels	in SMA-Kavernen
Umhüllendes Abfallinventar	20'000 m^3	7'500 m^3	200'000 m^3

A2.3 Lagerkammern

In die Lagerkammern werden die konditionierten und in Endlagerbehälter verpackten radioaktiven Abfälle dauerhaft eingelagert. Die Lagerkammern müssen eine genügende geomechanische Stabilität für den zuverlässigen Bau und Betrieb (inkl. Verfüllung) sowie für den Verschluss aufweisen. Weiter ist eine möglichst geringe Beeinträchtigung des umgebenden Wirtgesteins anzustreben. Dies verlangt insbesondere kleine Deformationen während Bau, Betrieb und auch nach dem Verschluss zur Vermeidung einer grossräumigen[122] Auflockerung des Wirtgesteins. Des Weiteren müssen die Lagerkammern geeignete Rahmenbedingungen bieten für die Einlagerung der Endlagerbehälter (einbringen, verfüllen) und für eine allfällige Rückholung der Endlagerbehälter. Zudem sind die Lagerkammern so auszulegen, dass eine geeignete Versiegelung der Zugänge möglich ist.

Da als Wirtgestein tonhaltige, vorwiegend horizontal bis subhorizontal geschichtete Sedimentgesteine mit beschränkter Mächtigkeit bevorzugt werden, kann mit der horizontalen Anordnung der Lagerkammern gegenüber einer vertikalen Anordnung (Schächte, Silos) das Platzangebot besser ausgenützt werden[123].

Das modellhafte Lagerkonzept für BE- und HAA-Abfälle sieht die Einlagerung von BE- und HAA-Lagerbehältern in etwa horizontalen Lagerstollen mit einem Durchmesser von 2.5 m vor (vgl. Fig. A2.3-1 und Tab. A2.3-1). Zwischen den Lagerbehältern ist aus sicherheitstechnischen Gründen (Prinzip "Kompartimentierung", s. Tab. 2.3-2) jeweils ein Abstand von 3 m vorgesehen, welcher mit Bentonit verfüllt wird.

---

[122] Grossräumig heisst hier, dass ein erheblicher Teil der Transportbarriere beeinträchtigt würde.

[123] Das Argument einer besseren Platzausnützung bei horizontaler Anordnung der Lagerkammern gilt auch für die Akkumulationen in den Mergel-Formationen des Helvetikums.

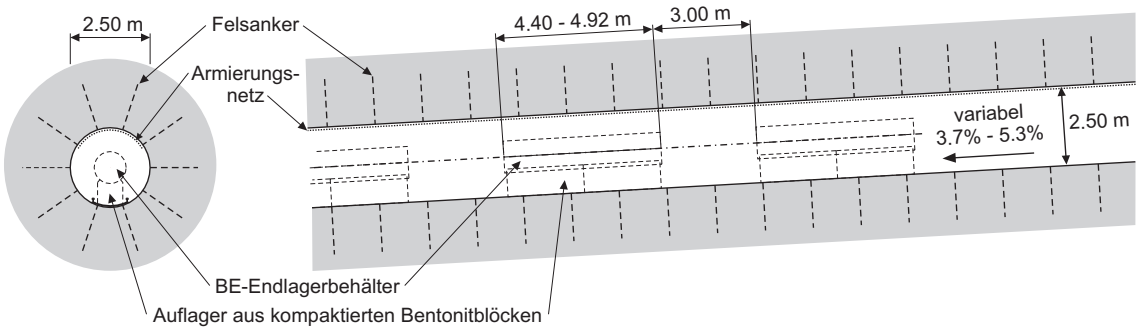


Fig. A2.3-1: Modellhaftes Konzept für BE/HAA-Lagerstollen.

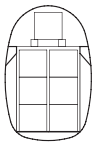
Die Länge der Lagerbehälter für BE liegt je nach Behältertyp zwischen 4.40 m und 4.92 m, diejenige für HAA-Twin Behälter bei 3.25 m; durchschnittlich wird ein Lagerbehälter pro 7.5 m Stollenlänge eingelagert.

Das modellhafte Lagerkonzept für LMA-Abfälle sieht die Einlagerung von Lagercontainern aus vorgefertigtem Beton mit einem Volumen von ca. 14.3 m^3 in horizontale Lagertunnel vor (vgl. Tab. A2.3-1).

Tab. A2.3-1: Massgebende Planungsgrössen für die Lagerkammern des HAA-Lagers.

Die langgezogenen horizontalen Lagerkammern mit kleinem Durchmesser für BE und HAA werden als Lagerstollen, die eher mittelgrossen Lagerkammern mit relativ kurzer Länge für LMA werden als Lagertunnels bezeichnet.

Legende: Durchschnittliche Belegung der Lagerkammern mit Anzahl BE- oder HAA-Endlagerbehälter (ELB) bzw. Lagercontainer Typ LC2 pro angegebene Lagerkammerlänge; LRF: Lichtraumfläche; LH: lichte Höhe; LB: lichte Breite.

BE/HAA-Lagerstollen	LMA-Lagertunnel
	
LRF: 4.9 m^2 LH: 2.5 m LB: 2.5 m	LRF: 77 m^2 LH: 11.9 m LB: 7.6 m
1 ELB / ca. 7.4 m	7 LC2 / 2.8 m

Das modellhafte Lagerkonzept für SMA-Abfälle sieht die Einlagerung von Lagercontainern aus vorgefertigtem Beton (vorwiegend Typ LC1 mit einem Volumen von ca. 26.0 m^3) in horizontalen Lagerkavernen vor (vgl. Fig. A2.3-2 und Tab. A2.3-2).

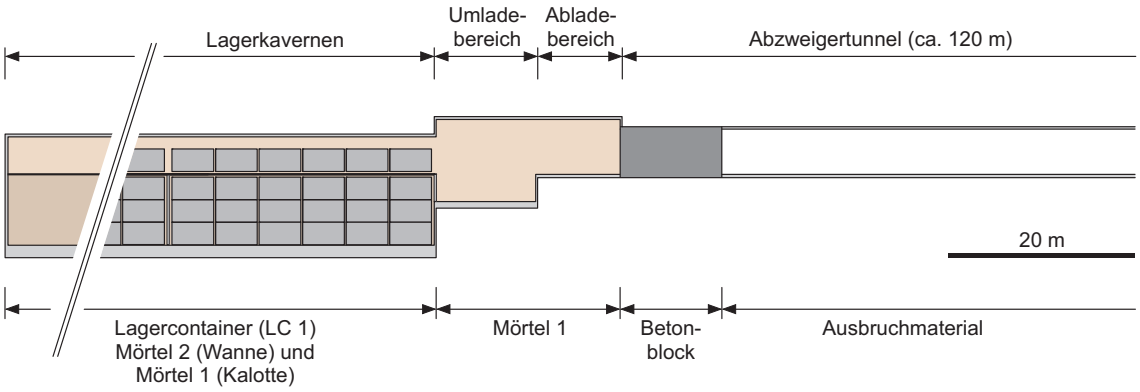


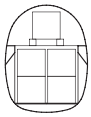
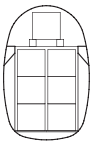
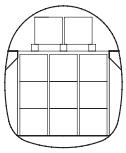
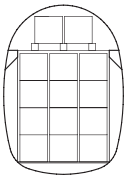
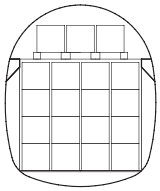
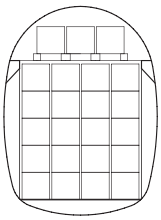
Fig. A2.3-2: Modellhaftes Konzept für SMA-Lagerkaverne des Typs K09 (Längsschnitt).

Die Abstände zwischen den gestapelten Lagercontainern betragen 0.20 m. Die Kavernenwanne wird in ungefähr 28 m lange Einlagerungsabschnitte unterteilt, welche mit Zwischenwänden aus Beton voneinander abgegrenzt werden.

Tab. A2.3-2 zeigt mögliche Auslegungen von SMA-Lagerkavernen, welche als Planungsannahme den Lagerkonfigurationen zugrunde gelegt wurden. Die Grösse der Kavernen und deren Gewölbeausbau kann den geomechanischen Randbedingungen und den räumlichen Verhältnissen (z.B. Mächtigkeit) des Wirtgesteins angepasst werden.

Tab. A2.3-2: Massgebende Planungsgrössen für Lagerkavernen des SMA-Lagers; Belegung der Lagerkammern mit standardisierten Lagercontainern LC1.

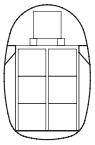
Legende: Durchschnittliche Belegung der Lagerkammern mit Anzahl Lagercontainer Typ LC1 pro 5.25 m Kavernenlänge. Darin sind die Stapellänge der Lagercontainer sowie Zuschläge für andere Lagercontainertypen und Zwischenwände berücksichtigt; LRF: Lichtraumfläche; LH: lichte Höhe; LB: lichte Breite

K04	K06	K09	K12	K16	K20
					
LRF: 58 m^2 LH: 9.5 m LB: 7.3 m	LRF: 77 m^2 LH: 11.9 m LB: 7.6 m	LRF: 110 m^2 LH: 12.6 m LB: 10.4 m	LRF: 136 m^2 LH: 15.0 m LB: 10.6 m	LRF: 182 m^2 LH: 16.1 m LB: 13.4 m	LRF: 215 m^2 LH: 18.5 m LB: 13.6 m
5 LC1 / 5.25 m	7 LC1 / 5.25 m	11 LC1 / 5.25 m	14 LC1 / 5.25 m	19 LC1 / 5.25 m	23 LC1 / 5.25 m

Basierend auf dem umhüllenden Abfallinventar und dem zugrunde gelegten Querschnitt der Lagerkammer bzw. der durchschnittlichen Belegung der Lagerkammern kann die erforderliche Länge der Lagerkammern zur Aufnahme des gesamten Inventars abgeleitet werden. Tab. A2.3-3 zeigt die erforderliche Gesamtlänge der Lagerkammern für das HAA-Lager (BE-/HAA-Lagerstollen, LMA-Lagertunnel), die Tab. A2.3-4 diejenige für das SMA-Lager in Abhängigkeit von der gewählten Kavernengrösse.

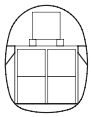
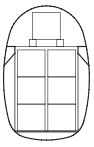
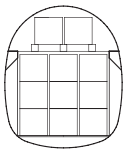
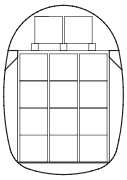
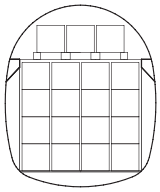
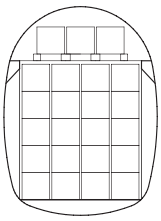
Tab. A2.3-3: Erforderliche gesamte Länge der BE/HAA-Lagerstollen und LMA-Lagertunnel zur Aufnahme des gesamten Abfallinventars.

In Klammern erforderliche Einlagerungslänge inklusive Pilotlager BE/HAA.

BE/HAA-Lagerstollen	LMA-Lagertunnel
	
39.0 km (39.5 km)	210 m

Tab. A2.3-4: Erforderliche gesamte Länge der SMA-Lagerkavernen zu Aufnahme des Abfallinventars in Abhängigkeit des Lagerkavernentyps.

Die Einlagerungslänge für das Pilotlager ist darin enthalten.

K04	K06	K09	K12	K16	K20
					
8100 m	5790 m	3680 m	2900 m	2140 m	1760 m

A2.4 Lagerfeld

Die Lagerkammern sind im Wirtgestein unter Berücksichtigung der sicherheitstechnischen und bautechnischen Randbedingungen möglichst optimal anzuordnen. Idealerweise werden mehrere Lagerkammern zu einem Lagerfeld zusammengefasst, welches über entsprechende untertägige Anschlussbauwerke erschlossen wird. Die schematische Darstellung in Fig. A2.4-1 zeigt die wichtigsten Elemente des Lagerfelds, welche nachfolgend genauer erläutert werden.

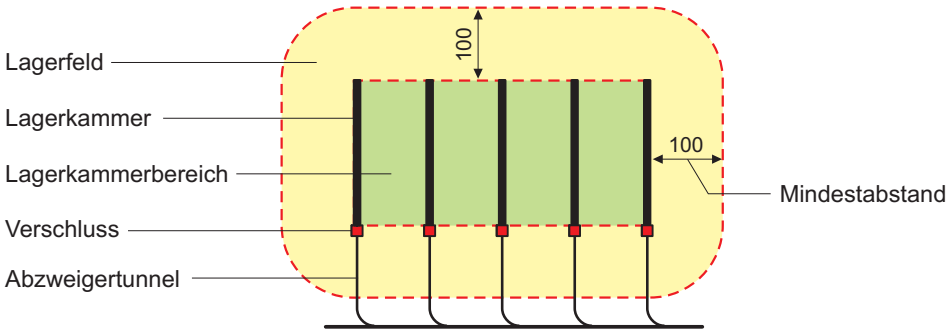


Fig. A2.4-1: Schematische Darstellung des Lagerfelds (Grundriss) mit seinen wichtigsten Elementen für das SMA- bzw. das HAA-Lager

Aus baulichen und betrieblichen Gründen sind die Lagerkammern in der Länge auf ungefähr 1'000 m für die BE/HAA-Lagerstollen bzw. 400 m für die SMA-Lagerkavernen zu begrenzen. Aus sicherheits- und bautechnischen Gründen sind zwischen den Lagerkammern Mindestabstände zu berücksichtigen. Als Planungsgrössen werden folgende Mindestabstände zwischen den Lagerkammern (Abstand der Lagerkammerachsen) zugrunde gelegt:

- Achsabstand zwischen BE/HAA-Lagerstollen: 40 m
- Achsabstand zwischen LMA-Lagertunnel und SMA-Lagerkavernen: 100 m

Weitere Vorgaben bezüglich der Dimensionen der Lagerfelder sind durch einzuhaltende horizontale Mindestabstände der Lagerkammern zu bereichsbegrenzenden und auslegungsbestimmenden geologischen Elementen (z.B. Störungszonen) einerseits und durch vertikale bzw. normale Mindestabstände zu den Wirtgesteinsschichtgrenzen gegeben. Diese Mindestabstände leiten sich aus sicherheitstechnischen Anforderungen in Bezug auf die erforderliche Länge des Transportpfads ab. Aus sicherheitstechnischen und bautechnischen Gründen ist es auch angebracht, Mindestabstände zu den übrigen untertägigen Anlagen festzulegen. In Tab. A2.4-1 sind die zugrunde gelegten Mindestabstände aufgelistet.

Tab. A2.4-1: Planungsgrössen für Mindestabstände zur Auslegung der Lagerfelder für das SMA- und das HAA-Lager.

Die verwendeten Mindestabstände sind vorsichtig gewählte Planungsgrundlagen für die Lagerkonfigurationen im Rahmen der SGT Etappe 1. Die tatsächlichen Abstände werden je nach standortspezifischer Situation angepasst. Grundlage zur definitiven Festlegung bildet die sicherheitstechnische Überprüfung mit den standortspezifischen Randbedingungen.

Mindestabstand	
Horizontaler Mindestabstand (Achsabstand) zwischen auslegungsbestimmenden oder bereichsbegrenzenden geologischen Elementen und … • … den Lagerkammern • … den untertägigen Erschliessungsbauwerken	100 m
Horizontaler Mindestabstand zwischen den Lagerkammern und untertägigen Erschliessungsanlagen [mit Ausnahme von Anschlussbauwerken (Abzweigertunnel)]	100 m
Mindestabstand zwischen einzelnen Stollen der untertägigen Erschliessungsbauwerke	50 m

Basierend auf modellhaften Referenzprojekten werden folgende bevorzugten Längen der einzelnen Lagerkammern zur Aufnahme der Abfälle zugrunde gelegt.

- Bevorzugte Einlagerungslänge für BE/HAA-Lagerstollen: 700 m
- Bevorzugte Einlagerungslänge für LMA-Lagertunnel und SMA Lagerkavernen: 200 m

Fig. A2.4-2 stellt die bevorzugte Geometrie einer Lagerkammer unter Berücksichtigung der verschiedenen Planungsgrössen (Länge zur Aufnahme des Abfallinventars, Mindestabstände) dar. Daraus ergibt sich die Breite eines Lagerfelds wie folgt:

- Bevorzugte Lagerfeldbreite für BE/HAA-Lagerstollen: 900 m
- Bevorzugte Lagerfeldbreite für SMA-Lagerkavernen: 400 m

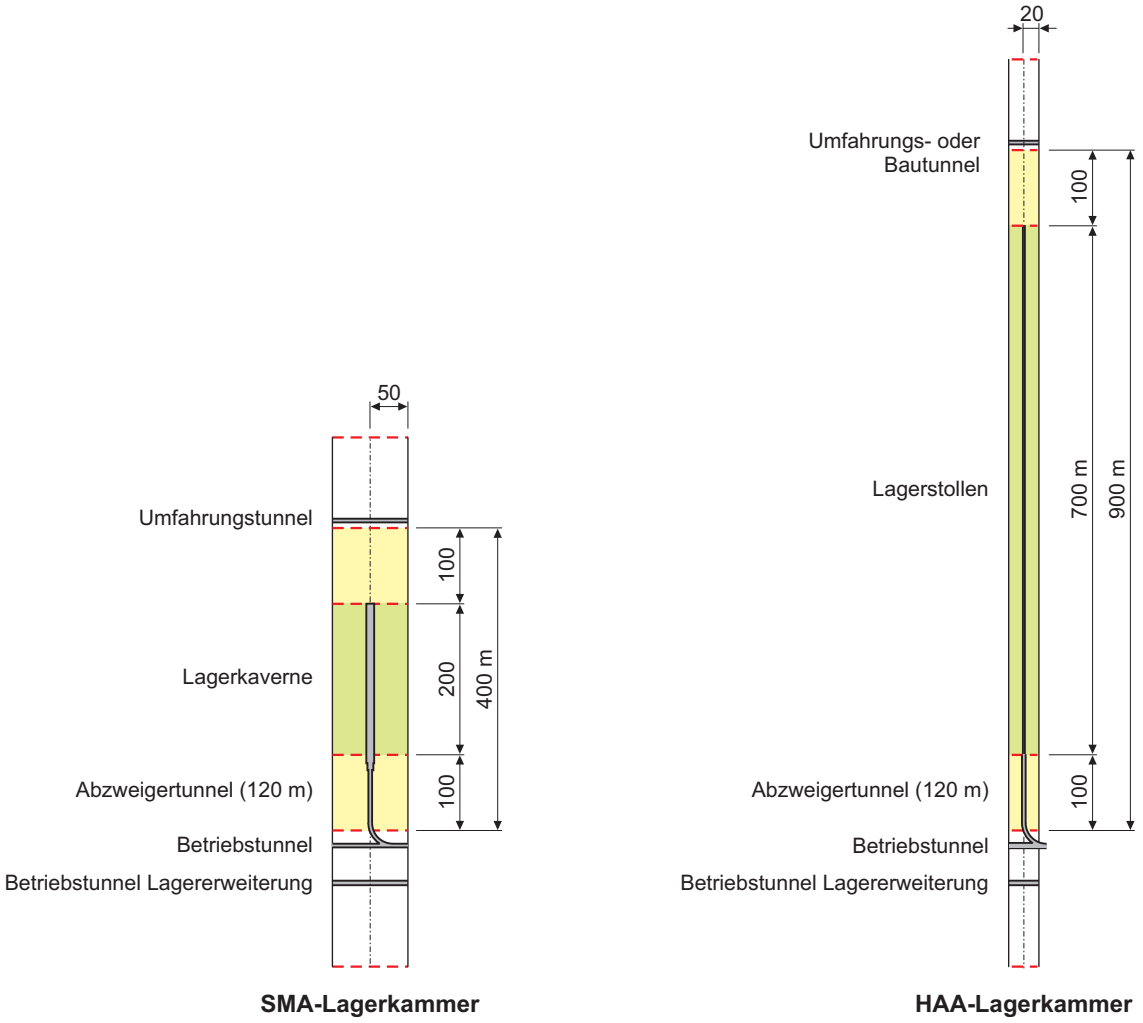


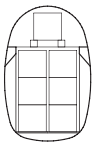
Fig. A2.4-2: Bevorzugte Lagerfeldbreite für SMA-Lagerkavernen und BE/HAA-Lagerstollen.

LMA-Lagertunnel sind Bestandteil des HAA-Lagers. Aufgrund der kleinen Abfallmenge bzw. der geringen Länge zur Aufnahme des gesamten LMA-Abfallinventars können LMA-Lagertunnel innerhalb der bevorzugten Lagerfeldbreite für BE/HAA-Lagerstollen angeordnet werden

Der minimale Flächenbedarf für die Anordnung aller Lagerkammern ergibt sich, wenn alle Lagerkammern parallel zu einander unter Ausnützung der Mindestabstände angeordnet werden können. Aus der gesamten erforderlichen Länge zur Aufnahme des Abfallinventars gemäss Tab. A2.3-3 und Tab. A2.3-4 sowie der bevorzugten Einlagerungslänge können die Anzahl Lagerkammern und unter Berücksichtigung der Mindestabstände die laterale Ausdehnung der Lagerfelder bei optimaler Anordnung abgeschätzt werden (vgl. Tab. A2.4-2 und Tab. A2.4-3). Die laterale Ausdehnung der Lagerfelder (Fläche) ergibt sich aus der lateralen Ausdehnung pro Lagerkammer (bevorzugte Lagerfeldbreite × Mindestabstand zwischen den Lagerkammern) multipliziert mit der Anzahl Lagerkammern. Hinzu kommen die Teilflächen zur Berücksichtigung der Mindestabstände an beiden parallel zu den Lagerkammern verlaufenden Lagerfeldseiten. Die Anzahl Lagerfelder ergibt sich aus der erforderlichen Etappierung zur Einlagerung. Als Annahme werden Lagerfelder mit 15 bis 20 BE/HAA-Lagerstollen bzw. 10 bis 13 SMA-Lagerkavernen zugrunde gelegt.

Tab. A2.4-2: Anzahl BE/HAA-Lagerstollen und LMA-Lagertunnel sowie ungefähr benötigte laterale Ausdehnung (Fläche) der Lagerfelder bei idealer Geometrie.

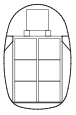
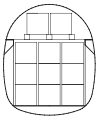
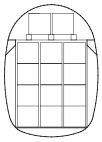
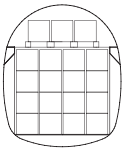
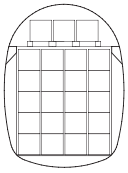
Grundlage bilden die erforderliche Länge zur Aufnahme des gesamten Aballinventars gemäss Tab. A2.3-3 und die bevorzugte Lagerfeldbreite gemäss Fig. A2.4-2. Die Angaben zu den BE/HAA-Lagerstollen sind exklusive Pilotlager und gehen von 3 Lagerfeldern mit je 15 bis 20 BE/HAA-Lagerstollen aus. Für LMA sind mindestens zwei Lagertunnel vorzusehen, da die Abfälle unterteilt in LMA-1 und LMA-2 in getrennten Lagerkammern eingelagert werden müssen.

	BE/HAA-Lagerstollen	LMA-Lagertunnel
		
Anzahl Lagerkammern	56	2
Anzahl Lagerfelder	3	1
Gesamte Lagerfeldfläche	2.5 km^2	0.09 km^2

Tab. A2.4-3: Anzahl SMA-Lagerkavernen mit bevorzugter Einlagerungslänge sowie ungefähr benötigte laterale Ausdehnung (Fläche) der Lagerfelder in Abhängigkeit des Kavernentyps bei idealer Geometrie.

Grundlage bilden die erforderlichen Einlagerungslängen gemäss Tab. A2.3-4 und die bevorzugte Lagerfeldbreite gemäss Fig. A2.4-2. Die Anzahl Lagerkavernen berücksichtigt zusätzlich eine Lagerkaverne für das Pilotlager sowie eine zusätzliche Lagerkaverne als Reserve. Die Angaben zur Fläche gehen von Lagerfeldern mit je ca. 10 bis 13 Lagerkavernen aus.

Legende: LK := Lagerkammer; LF := Lagerfelder

	K04	K06	K09	K12	K16	K20
						
Anz. Lagerkammern	43	31	21	17	13	11
Anzahl Lagerfelder	4	3	2	2	1	1
Gesamtfläche	1.9 km^2	1.4 km^2	1.0 km^2	0.8 km^2	0.6 km^2	0.5 km^2

A2.5 Lagerzone

Die Lagerzone wird durch bereichsbegrenzende und auslegungsbestimmende geologische Elemente begrenzt (vgl. Fig. A2.1-1 und Fig. A2.5-2). Gemäss dem verwendeten Projektkonzept werden alle untertägigen Anlagenteile innerhalb der Lagerzonen angeordnet. Zu den untertägigen Lagerbauten gehören neben den Lagerkammern in den Lagerfeldern auch die Testbereiche, das Pilotlager (in der Regel innerhalb eines Lagerfelds) sowie sämtliche untertägigen Erschliessungs- und Kontrollbauwerke.

Die Testbereiche werden in einem Felslabor zusammengefasst, in welchem die im Hinblick auf den Bau und Betrieb notwendigen Untersuchungen durchgeführt werden. Das Pilotlager dient zur Überwachung des Verhaltens des Barrierensystems. Das Pilotlager entspricht in seiner Auslegung den Lagerkammern und wird innerhalb eines Lagerfelds angeordnet.

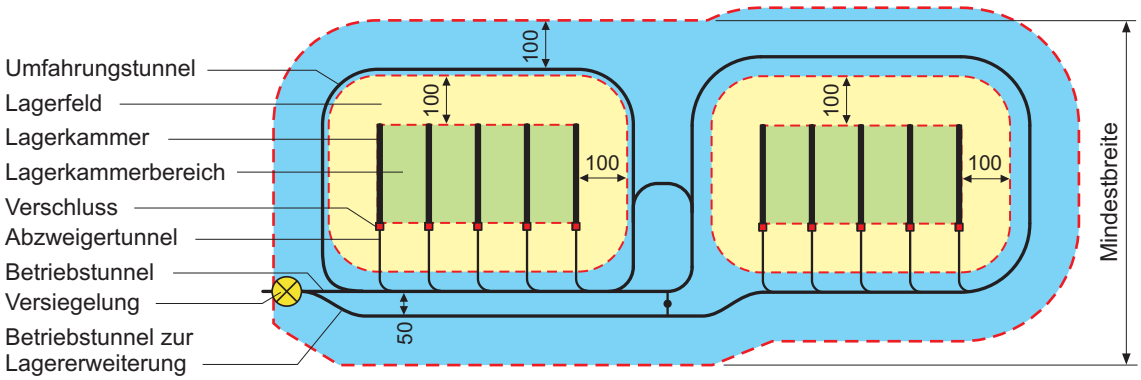
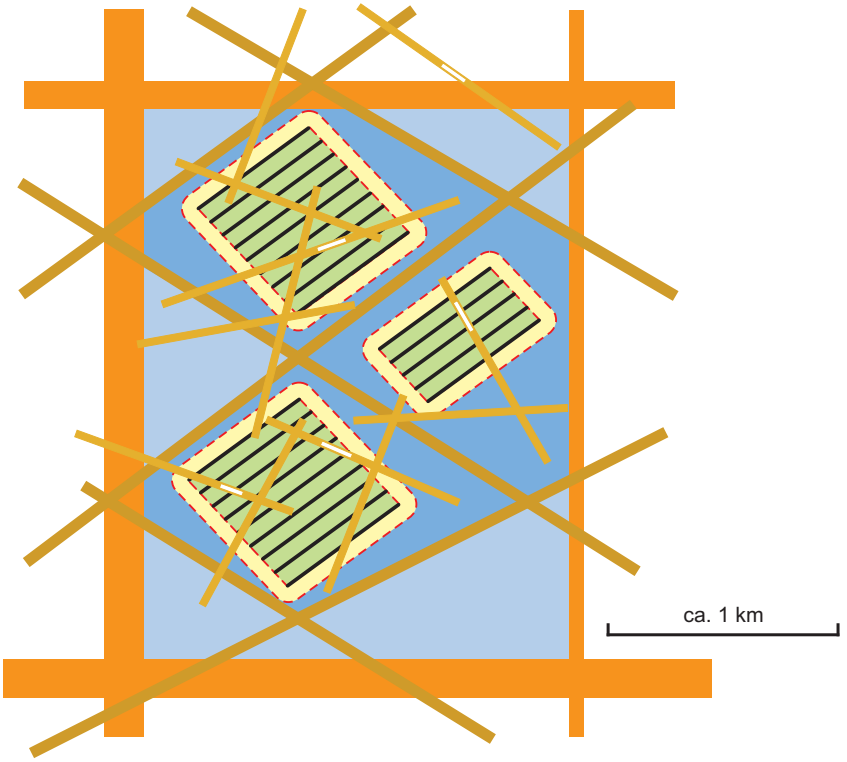


Fig. A2.5-1: Schematische Darstellung des Tiefenlager (Grundriss) mit seinen wichtigsten Elementen für das SMA- bzw. HAA-Lager.



Signatur	Beschreibung	Bedeutung	Nachweis
	Regionale Störungszone	bereichsbegrenzend	machbar
	Auslegungsbestimmende Störungszone	bestimmt Anordnung der Lagerstollen	
	kleinere wasserführende Störungszone	sicherheitsrelevant	bedingt machbar
	kleinere wasserführende Störungszone mit Channels	sicherheitsrelevant	
	Lagerkammern	–	–
	Lagerkammerbereich	–	–
	Lagerfeld	–	–
	nutzbare Lagerzone	–	–
	nicht nutzbare Lagerzone	–	–

Fig. A2.5-2: Klassifizierung von Diskontinuitäten im Wirtgestein.

Es wird unterschieden zwischen regionalen geologischen Elementen, welche die potenziell möglichen Bereiche begrenzen und auslegungsbestimmenden Elementen innerhalb von Bereichen (werden erst bei der Exploration des entsprechenden Bereichs lokalisiert); beiden Elementen muss mit den Lagerkammern unter Einhaltung eines Sicherheitsabstands ausgewichen werden. Weiter können geologische Elemente (Störungen, Klüfte, teilweise mit Channels) vorhanden sein, denen wegen ihrer Häufigkeit und/oder Explorierbarkeit mit den Lagerkammern nicht ausgewichen werden kann und die deshalb die Barrierenwirkung des Wirtgesteins direkt beeinflussen; sie sind deshalb sicherheitsbestimmend.

Die Lagerfelder werden durch Erschliessungsbauwerke innerhalb der Lagerebene verbunden (Fig. A2.5-1). Jede Lagerkammer wird über ein Anschlussbauwerk (Abzweigertunnel) individuell erschlossen. Damit können die sicherheitstechnischen Anforderungen nach rascher Verfüllung und sicherem Verschluss der Lagerkammer nach der fertigen Einlagerung zuverlässig umgesetzt werden. Das Verschlussbauwerk jeder Lagerkammer (Versiegelung) wird in diesem Abzweigertunnel platziert. Das bedeutet, dass für jede Lagerkammer eine zusätzliche fixe Länge für die individuelle Erschliessung und Verschluss berücksichtigt werden muss:

- Zusätzliche Fixlänge BE/HAA-Lagerstollen für Erschliessung und Verschluss: 120 m
- Zusätzliche Fixlänge SMA-Lagerkavernen für Erschliessung und Verschluss: 120 m

Der Zugang zu den Lagerkammern zur Einlagerung der radioaktiven Abfälle erfolgt über einen Betriebstunnel, welcher alle Abzweigertunnel jedes Lagerfelds verbindet. Um die etappierte Lagererweiterung zur Aufnahme des gesamten umhüllenden Abfallinventars umsetzen zu können, sind die Lagerkammern der zweiten Etappe über einen separaten, zweiten Betriebstunnel zur Lagererweiterung anzuschliessen. Je nach Auslegung des Tiefenlagers und den standortspezifischen Randbedingungen kann es erforderlich sein, die Lagerfelder mit einem Tunnel zu umfahren (Umfahrungstunnel). Im Falle des HAA-Lagers wird anstelle des Umfahrungstunnels ein Bautunnel erstellt, welcher den Bau weiterer Lagerkammern parallel zum Einlagerungsbetrieb ermöglicht.

Bei der Auslegung der Lagerkonfigurationen sind die Mindestabstände, wie sie für die Lagerfelder zugrunde gelegt wurden, zu berücksichtigen (Tab. A2.4-1). Dort, wo die untertägigen Erschliessungsbauwerke die Lagerzone verlassen, sind dauerhafte Versiegelungen anzuordnen. Ein Bereich kann aus einer oder mehreren, durch auslegungsbestimmende geologische Elemente unterteilte Lagerzonen bestehen (vgl. Fig. A2.5-2). Fig. A2.1-1 zeigt schematisch die wichtigsten Elemente einer Lagerzone sowie eine mögliche Anordnung der Lagerfelder und der übrigen untertägigen Anlagen innerhalb der Lagerzone.

Voraussetzung für die Anordnung der einzelnen untertägigen Anlagenteile in der Lagerzone ist eine ausreichende laterale Ausdehnung (Fläche), deren nutzbare Breite (Form) die Anordnung von mindestens einem Lagerfeld und den dazu erforderlichen Erschliessungsbauwerken innerhalb der Lagerzone zulässt. Um eine zuverlässige Anordnung des Tiefenlagers gewährleisten zu können, soll die nutzbare Breite mindestens der erforderlichen Mindestbreite der Lagerzone und einem Zuschlag zum Ausgleich eines unregelmässigen Verlaufs der bereichsbegrenzenden und auslegungsbestimmenden geologischen Elemente von beidseitig 150 m entsprechen (vgl. Fig. A2.1-1). Die Mindestbreite der Lagerzone (Zielvorgabe) kann für die zugrunde gelegten Lagerkonfigurationen wie folgt angegeben werden:

- Mindestbreite der Lagerzone für HAA-Lager: 1200 m
- Mindestbreite der Lagerzone für SMA-Lager: 700 m

Die Mindestbreite der Lagerzone setzt sich zusammen aus der bevorzugten Lagerfeldbreite von 900 m (BE/HAA-Lagerstollen) bzw. 400 m (SMA-Lagerkavernen), Zuschlägen für die Einhaltung von Mindestabständen zwischen Erschliessungsbauwerken (Betriebstunnel, Betriebstunnel zur Lagererweiterung) von 50 m, Korridoren für die Anordnung dieser Erschliessungsbauwerke (je ± 10 m) sowie einem Mindestabstand zu bereichsbegrenzenden oder auslegungsbestimmenden geologischen Elementen von 2 × 100 m (vgl. Fig. A2.5-3).

Aus der Mindestbreite und dem Zuschlag zum Ausgleich eines unregelmässigen Verlaufs der bereichsbegrenzenden und auslegungsbestimmenden geologischen Elemente (2 × 150 m) ergibt sich somit eine erforderliche nutzbare Breite von:

- Nutzbare Breite der Lagerzone für HAA-Lager: ≥ 1500 m
- Nutzbare Breite der Lagerzone für SMA-Lager: ≥ 1000 m

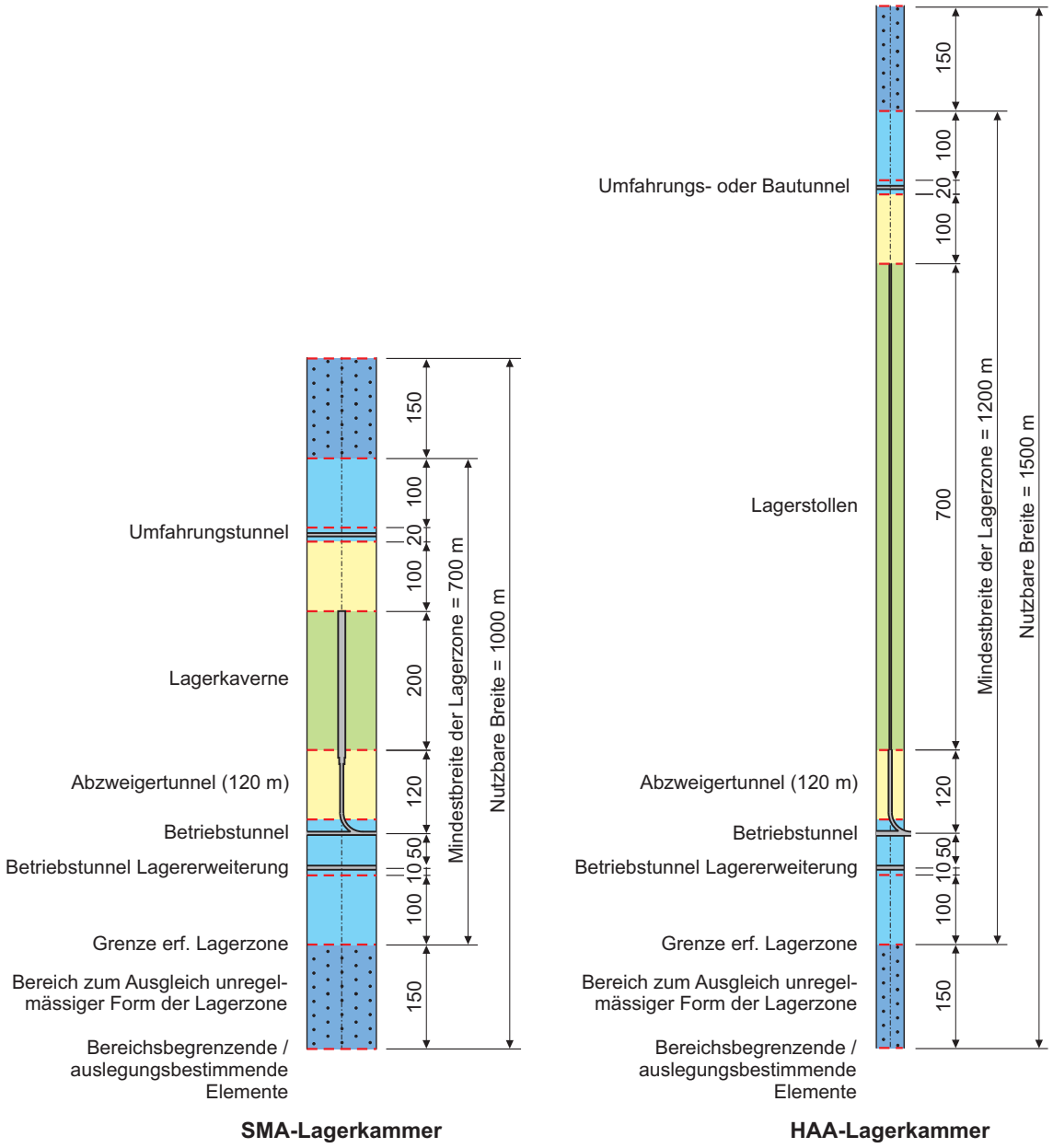


Fig. A2.5-3: Mindestbreite und nutzbare Breite für Lagerzonen SMA und HAA.

LMA-Lagertunnel sind Bestandteil des HAA-Lagers. Aufgrund der kleinen Abfallmenge bzw. der geringen Länge zur Aufnahme des gesamten LMA-Abfallinventars können LMA-Lagertunnel innerhalb der bevorzugten Mindestbreite der Lagerzone für BE/HAA-Lagerstollen angeordnet werden.

A2.6 Lagerkonfigurationen

A2.6.1 Modellhafte Lagerkonfigurationen für HAA und SMA-Lager

Basierend auf den vorgängig aufgelisteten Angaben lassen sich zahlreiche Lagerkonfigurationen unterschiedlicher Grundrissform und -grösse ableiten. Fig. A2.6-1 zeigt stellvertretend eine modellhafte Lagerkonfiguration für ein HAA-Lager für das umhüllende Abfallinventar, Fig. A2.6-2 für ein SMA-Lager. Da die radioaktiven Abfälle nicht alle auf einmal anfallen, werden die Lagerfelder in Etappen erstellt. Im Hinblick auf eine etappenweise Lagererweiterung sind daher mehrere Lagerfelder mit den entsprechenden Erschliessungsbauwerken vorzusehen.

Nachfolgend wird der Platzbedarf ausgehend von den vorangegangenen Planungsannahmen bei optimaler und bei ungünstiger geologischer Konfiguration ermittelt. Unter optimaler geologischer Konfiguration wird eine modellhafte Konfiguration für das umhüllende Abfallinventar verstanden, bei welchem alle Lagerkammern sowie die dazugehörigen untertägigen Erschliessungs- und Kontrollbauwerke (Betriebs- und Bautunnel, Testbereiche, Zentraler Bereich, Schachtfuss, Kontrollstollen etc.) innerhalb einer Lagerzone platziert und die Lagerkammern parallel zu einander und mit mehr oder weniger gleicher Geometrie (Länge, Querprofil) und in der gleichen, subhorizontalen Lagerebene angeordnet werden können. Sind diese Voraussetzungen nicht gegeben (ungünstige geologische Konfiguration), so ist in der Regel eine deutlich grössere laterale Ausdehnung erforderlich, um die Abfallmenge zuverlässig und sicher einlagern zu können.

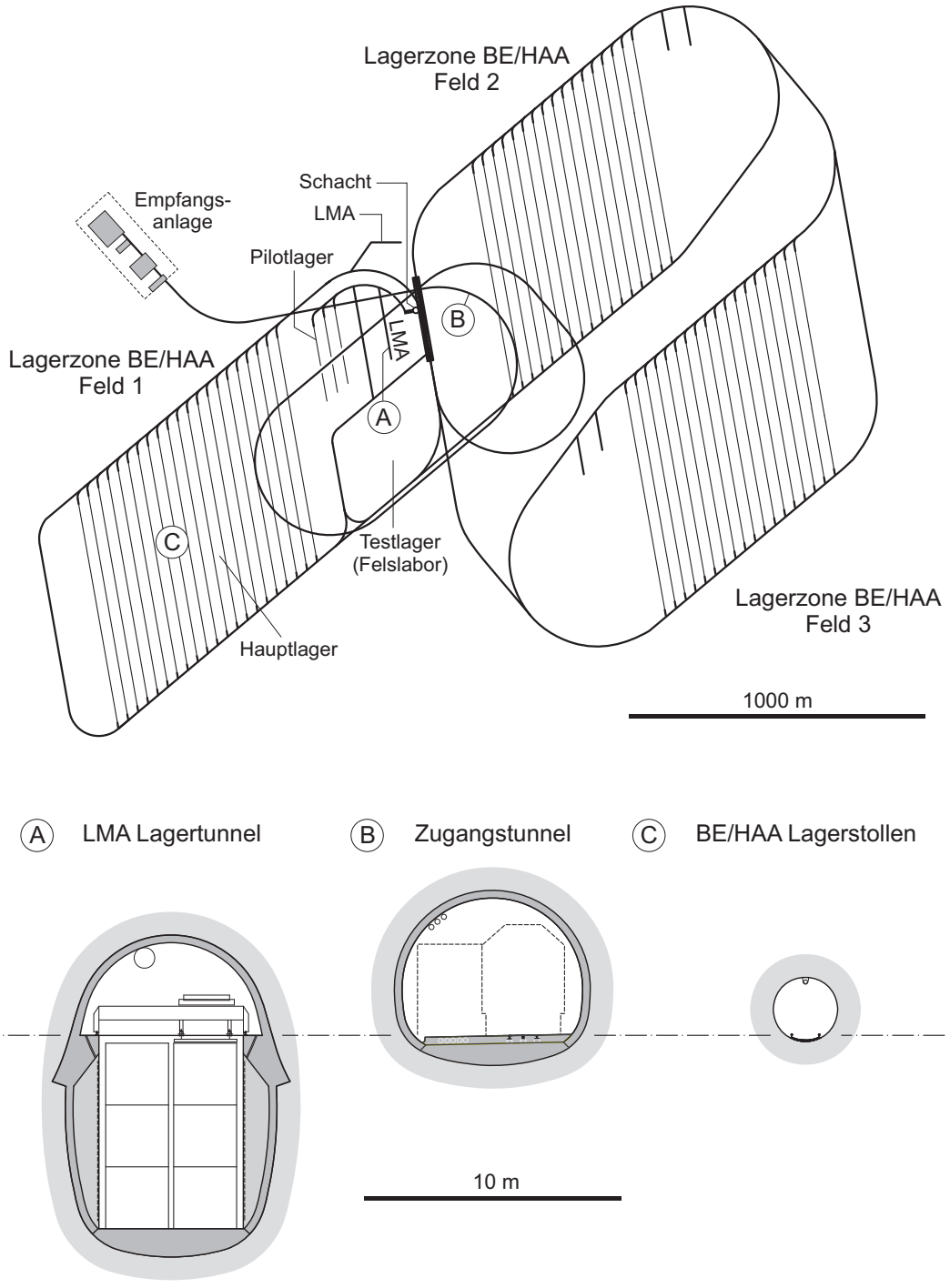


Fig. A2.6-1: Modellhafter Grundriss einer Lagerkonfiguration für ein HAA-Lager für das umhüllende Abfallinventar.

Das Lagerfeld 1 ist auf die Abfallmenge für eine erste Etappe ausgelegt, die Lagerfelder 2 und 3 zur Aufnahme der zusätzlichen Abfallmengen für das umhüllende Abfallinventar. Diese Figur ist identisch mit Fig. 2.5-2.

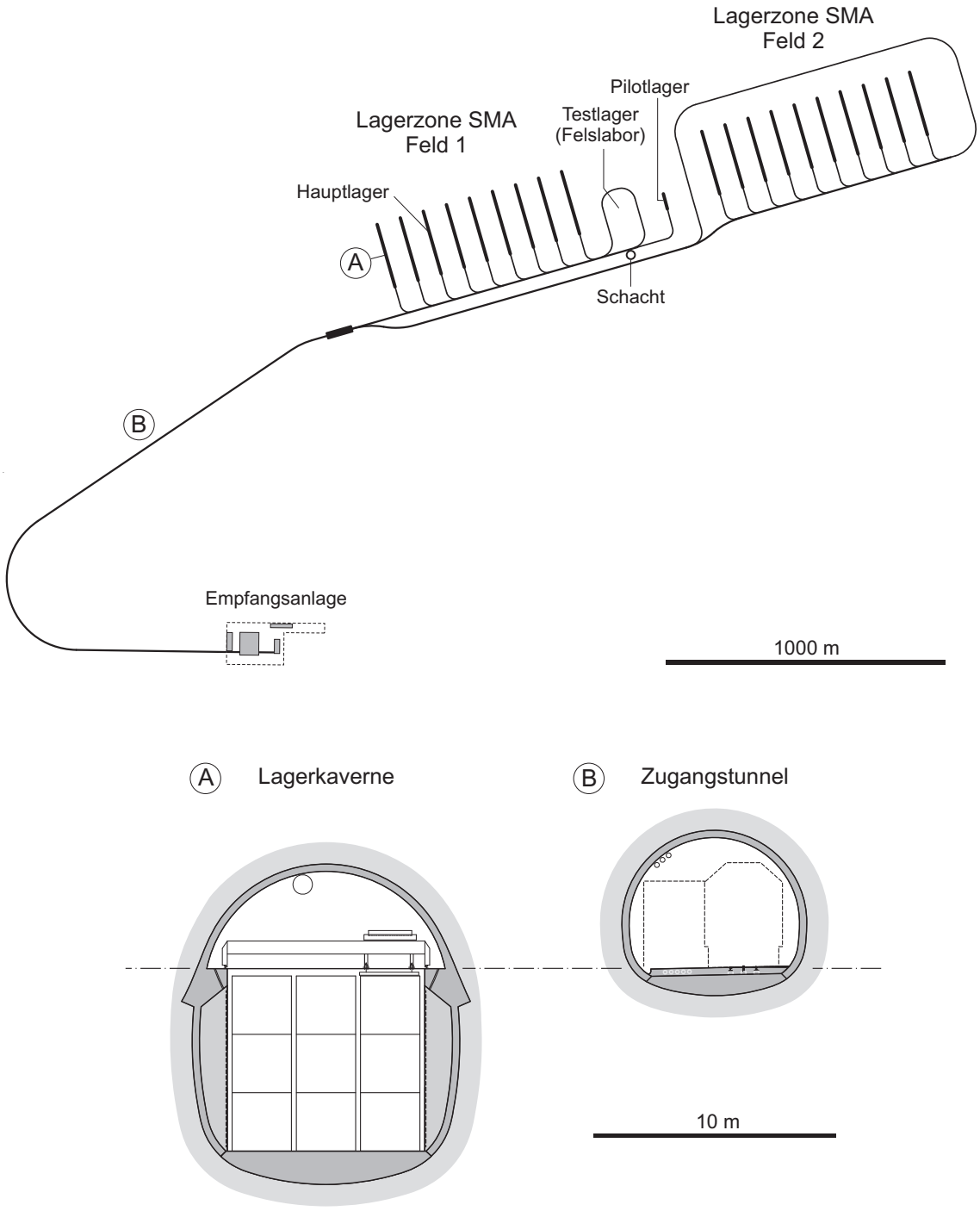


Fig. A2.6-2: Modellhafter Grundriss einer Lagerkonfiguration für ein SMA-Lager mit dem Kavernentyp K09 für das umhüllende Abfallinventar.

Das Lagerfeld 1 ist auf die Abfallmenge für eine erste Etappe ausgelegt, das Lagerfeld 2 zur Aufnahme der zusätzlichen Abfallmengen für das umhüllende Abfallinventar. Diese Figur ist identisch mit Fig. 2.5-1.

A2.6.2 Laterale Ausdehnung der Lagerzone bei optimaler geologischer Konfiguration

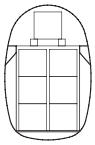
Die laterale Ausdehnung (Fläche) der erforderlichen Lagerzone bei optimaler geologischer Konfiguration setzt sich aus folgenden Elementen zusammen:

- Fläche der erforderlichen Lagerfelder
- Fläche für die Erschliessungsbauwerke zu den Lagerfeldern
- Fläche für Zentralen Bereich, Schachtfuss und Testbereiche
- Fläche für Pilotlager und LMA-Lagertunnel (HAA-Lager)[124].

Die Fläche der erforderlichen Lagerfelder wurde in Abschnitt A2.4 bestimmt und ist in Tab. A2.6-1 und Tab. A2.6-2 nochmals aufgeführt. Die Fläche für die Erschliessungsbauwerke kann aus der Mindestbreite der Lagerzone gemäss Abschnitt A2.5 (vgl. Fig. A2.5-3) sowie der Anzahl Lagerkammern abgeschätzt werden.[125] Für den Zentralen Bereich, den Schachtfuss sowie den Testbereich werden die Flächenanteile wie folgt bestimmt:

- Zusatzfläche für Zentraler Bereich, Schachtfuss, Testbereich (sowie für LMA und Pilotlager beim HAA-Lager):
  - HAA-Lager: Mindestbreite der Lagerzone × Länge von 500 m: 0.6 km^2
  - SMA-Lager: Mindestbreite der Lagerzone × Länge von 250 m: 0.2 km^2

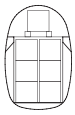
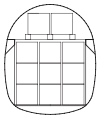
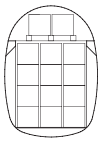
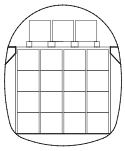
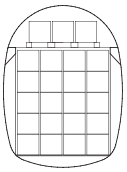
Tab. A2.6-1: Erforderliche laterale Ausdehnung der Lagerzone (Fläche) bei optimaler Lagerkonfiguration für ein HAA-Lager.

Fläche für:	BE/HAA-Lagerstollen	LMA-Lagertunnel
		
Anzahl Lagerfelder	3	1
Lagerfelder	2.5 km^2	0.09 km^2
Erschliessungsbauwerke	0.8 km^2	
Testbereich etc.	0.6 km^2	
Erf. Lagerzone (Total)	4.0 km^2	

[124] Beim SMA-Lager ist das Pilotlager bereits in der Fläche für die Lagerfelder berücksichtigt.

[125] Zusatzfläche für Erschliessungsbauwerke =
[(Mindestbreite Lagerzone – erf. Breite Lagerfeld) / erf. Breite Lagerfeld] * erf. Fläche Lagerfeld.

Tab. A2.6-2: Erforderliche laterale Ausdehnung der Lagerzone (Fläche) bei optimaler Lagerkonfiguration für ein SMA-Lager.

Fläche für:	K04	K06	K09	K12	K16	K20
						
Anzahl Lagerfelder	4	3	2	2	1	1
Lagerfelder	1.9 km^2	1.4 km^2	1.0 km^2	0.8 km^2	0.6 km^2	0.5 km^2
Erschliessungsbauw.	1.4 km^2	1.0 km^2	0.7 km^2	0.6 km^2	0.4 km^2	0.4 km^2
Testbereich etc.	0.2 km^2	0.2 km^2	0.2 km^2	0.2 km^2	0.2 km^2	0.2 km^2
Erf. Lagerzone (Total)	3.5 km^2	2.6 km^2	1.9 km^2	1.6 km^2	1.2 km^2	1.1 km^2

Sind aus räumlichen (Wirtgesteinsmächtigkeit) oder geomechanischen (Stabilität, Deformationen) Gründen nur kleine SMA-Lagerkavernen (Kavernentyp K04 oder K06) realisierbar, so steigt der bautechnische und betriebliche Aufwand deutlich (Lüftung, Logistik). Solche Lagerkonfigurationen werden als nicht optimal beurteilt.

In Tab. A2.6-3 sind Mindestanforderungen an die laterale Ausdehnung (Fläche und Breite) angegeben, welche auf vereinfachte Art und Weise die Überprüfung von potenziell möglichen Bereichen erlauben. Bereiche, welche diese Anforderungen nicht erfüllen, werden wegen ungenügender Grösse und/oder ungeeigneter Form ausgeschlossen.

Tab. A2.6-3: Mindestanforderung an laterale Ausdehnung (Fläche und Breite) zur Überprüfung der potenziell mögliche Bereiche für optimale geologische Konfigurationen.

Lagertyp	**Beschreibung**	**Laterale Ausdehnung (Fläche)**	**Nutzbare Breite (Form)**
HAA-Lager	Lagerzone ≥ erforderliche Lagerzone für HAA-Lager mit optimaler Lagerkonfiguration	4 km^2	1500 m
SMA-Lager	Lagerzone ≥ erforderliche Lagerzone für SMA-Lager mit optimaler Lagerkonfiguration und SMA-Lagerkavernen Typ K09 oder grösser.	2 km^2	1000 m

A2.6.3 Laterale Ausdehnung der Lagerzone bei ungünstiger geologischer Konfiguration

Die Fläche der erforderlichen Lagerzone bei ungünstiger geologischer Konfiguration setzt sich aus der erforderlichen Fläche bei optimaler Anordnung und Zusatzflächen infolge ungünstiger geologischer Konfiguration zusammen.

Eine ungünstige geologische Konfiguration liegt beispielsweise dann vor, wenn das Tiefenlager aufgrund von auslegungsbestimmenden geologischen Elementen (z.B. Störungszonen) in mehrere Lagerfelder aufgeteilt und in getrennten Lagerzonen angeordnet werden müsste (Fig. A2.6-3). Aufgrund der Erschliessung zwischen den Lagerfeldern, der Anordnung weiterer Versiegelungen sowie der Einhaltung von Mindestabständen zu den auslegungsbestimmenden Störungszonen ist eine Zusatzfläche zu berücksichtigen.

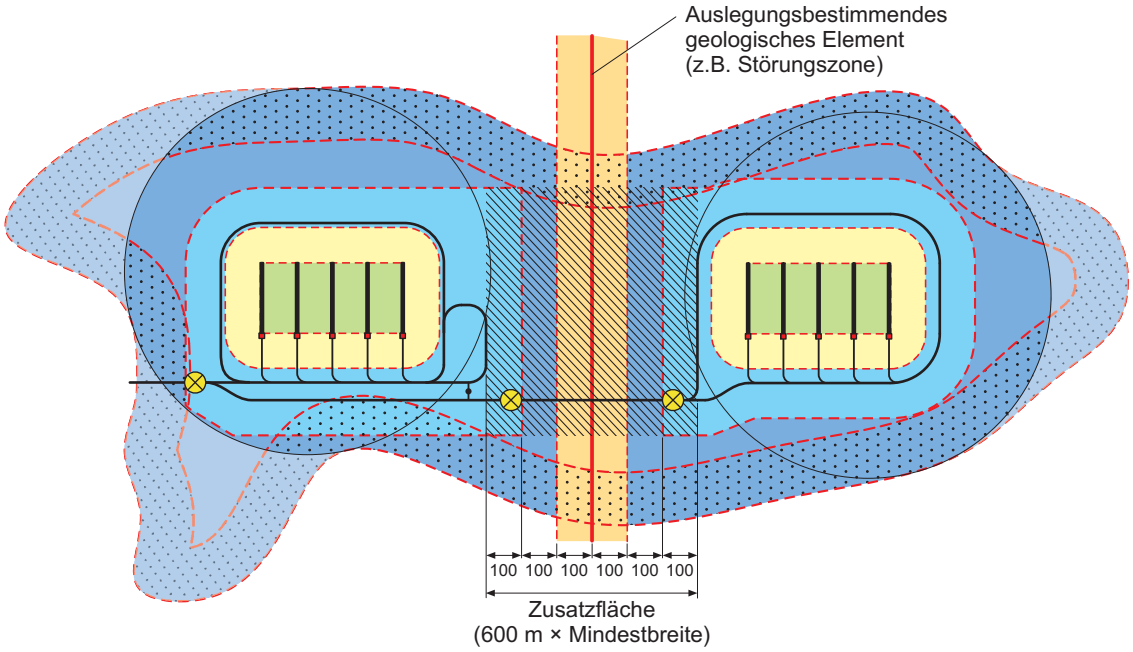


Fig. A2.6-3: Schematische Darstellung (beispielhaft) der Lagerzone für das SMA- bzw. das HAA-Lager bei ungünstiger geologischer Konfiguration infolge einer auslegungsbestimmenden Störungszone.

Aufgrund der auslegungsbestimmenden Störungszone entfällt ein Teil der potenziell nutzbaren Lagerzone innerhalb der bereichsbegrenzenden geologischen Elemente. Dieser Teil entspricht einer Zusatzfläche, welche bei der Überprüfung der lateralen Ausdehnung berücksichtigt wird.

Weitere ungünstige geologische Konfigurationen liegen vor, wenn aufgrund der Wirtgesteinsgeometrie (Mächtigkeit, Schichtneigung, Welligkeit der Wirtgesteinsschichtgrenzen etc.) die Einlagerungslänge verkürzt oder aufgrund der geomechanischen Bedingungen (Gesteinsfestigkeit, *in-situ* Spannungen, Trennflächengefüge) die Hohlraumgrösse reduziert werden muss. Die Lagerfeldfläche und damit auch die laterale Ausdehnung der erforderlichen Lagerzone hängen von der gewählten Einlagerungslänge und Hohlraumgrösse ab. Die beiden Diagramme in Fig. A2.6-4 zeigen die Veränderung der erforderlichen Lagerzonenfläche in Abhängigkeit zur gewählten Einlagerungslänge und Hohlraumgrösse (letzteres nur für SMA-Lagerkavernen). Der Platzbedarf für die erforderliche Lagerzone steigt bei Einlagerungslängen unter 400 m (BE/HAA-Lagerstollen) bzw. unter 150 m (SMA-Lagerkavernen) überproportional stark an.

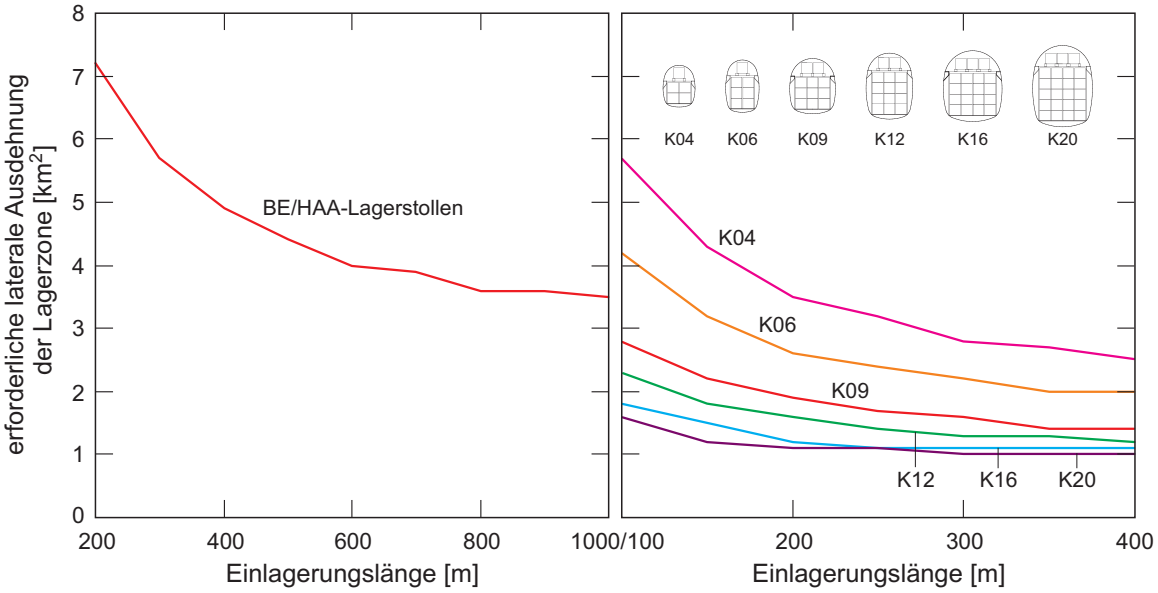


Fig. A2.6-4: Erforderliche Lagerzone in Abhängigkeit zur Einlagerungslänge für BE/HAA-Lagerstollen (links) und in Abhängigkeit zur Einlagerungslänge und Kavernengrösse für SMA-Lagerkavernen (rechts).

Die Lagerzone setzt sich zusammen aus der erforderlichen Lagerfeldfläche sowie einer Zusatzfläche für die Erschliessungsbauwerke und Testbereiche. Die Unstetigkeiten ergeben sich aufgrund der Einteilung in eine Anzahl gleich langer Lagerkammern als Verhältnis der gesamten Länge zur Aufnahme des Abfallinventars zur gewählten Einlagerungslänge.

Können die Lagerfelder bzw. die Lagerkammern nicht gleich ausgerichtet (Streichwinkel der Lagerkammerachse variiert) oder nicht in der gleichen Ebene angeordnet werden, sind zusätzliche Erschliessungsbauwerke mit entsprechendem Platzbedarf erforderlich.

In Tab. A2.6-4 werden mögliche ungünstige Konfigurationen beschrieben und zur Abschätzung deren Zusatzflächen aufgeführt.

Bei der Auswahl von bevorzugten Bereichen wird auf vereinfachte Art und Weise überprüft, ob ein Bereich auch unter Annahme von ungünstigen (und aufgrund der momentanen Datenlage nicht genau bekannten) geologischen Konfigurationen eine ausreichende Grösse und eine geeignete Form aufweist, um ein SMA- oder HAA-Lager zuverlässig realisieren zu können. Es kann davon ausgegangen werden, dass ein SMA- oder HAA-Lager auch unter ungünstigen geologischen Konfigurationen zuverlässig erstellt werden kann, wenn die laterale Ausdehnung etwa das 1½ fache der mindestens erforderlichen lateralen Ausdehnung gemäss Tab. A2.6-3 beträgt. Dies entspricht beispielsweise ungefähr einem zusätzlichen Flächenbedarf, wenn zwei auslegungsbestimmende Störungszonen die effektiv nutzbare Lagerzone reduzieren oder andere Kombinationen von ungünstigen Konfigurationen gemäss Tab. A2.6-4 auftauchen. In Tab. A2.6-5 sind die entsprechenden Anforderungen an die laterale Ausdehnung (Fläche und Breite) angegeben.

Tab. A2.6-4: Mögliche ungünstige geologischer Konfigurationen und deren Zusatzflächen.

	Beschreibung der ungünstigen geologischer Konfiguration	**Zusatzfläche**	
		HAA-Lager	**SMA-Lager**
1	Anordnung der Lagerfelder in zwei durch auslegungsbestimmende Störungszone unterteilte Lagerzonen. (vgl. Fig. A2.6-3). Annahme für Zusatzfläche: Mindestbreite der Lagerzone × 600 m	0.7 km^2	0.4 km^2
2	Die Einlagerungslänge der Lagerkammer beträgt nur 50 % der bevor-zugten Länge (s. Fig. A2.6-4) aufgrund ungünstiger geologischer Konfigurationen. Dazu gehören: reduzierte Wirtgesteinsmächtigkeit, erhöhte Schichtneigung der Wirtgesteinsformation, Welligkeit der Wirtgesteinsschichtgrenzen im Hangenden und Liegenden etc.	1.4 km^2	0.9 km^2 [126]
3	Die Lagerfelder oder die Lagerkammern sind nicht gleich ausgerichtet, bzw. liegen nicht auf der gleichen Ebene. Dies erfordert zusätzliche Erschliessungsbauwerke (Annahme zwei zusätzliche Erschliessungstunnel) → ca. 60 % der Fläche für Erschliessungsbauwerke gemäss Tab. A2.6-1 bzw. Tab. A2.6-2	0.5 km^2	0.4 km^2

Tab. A2.6-5: Mindestanforderung an die laterale Ausdehnung (Fläche und Breite) zur Überprüfung der bevorzugten Bereiche für ungünstige geologische Konfigurationen.

Lagertyp	**Beschreibung**	**Laterale Ausdehnung (Fläche)**	**Nutzbare Breite (Form)**
HAA-Lager	Lagerzone ≥ erforderliche Lagerzone für HAA-Lager mit optimaler Lagerkonfiguration + Zusatzfläche von 2 km^2 (gemäss Tab. A2.6-4). Diese Zusatzfläche entspricht ungefähr der Fläche infolge von 2 auslegungsbestimmenden Störungszonen.	6 km^2	1500 m
SMA-Lager	Lagerzone ≥ erforderliche Lagerzone für SMA-Lager mit optimaler Lagerkonfiguration + Zusatzfläche von 1 km^2 (gemäss Tab. A2.6-4). Diese Zusatzfläche entspricht ungefähr der Fläche infolge von 2 auslegungsbestimmenden Störungszonen. oder Erforderliche Lagerzone für SMA-Lager mit optimaler Lagerkonfiguration und SMA-Lagerkavernen Typ K06 oder grösser (gemäss Tab. A2.6-2).	3 km^2	1000 m

[126] Zusatzfläche für SMA-Lagerkaverne Typ K09.

A2.6.4 Grundlagen zur Abschätzung des Platzangebotes

Mit der lateralen Ausdehnung (Fläche) und der nutzbaren Breite (Form) wird vereinfacht geprüft, ob der vorhandene Bereich ausreichend Platz zur Einlagerung des umhüllenden Abfallinventars aufweist. Eine weitere, detaillierte Bewertung der räumlichen Verhältnisse im Untergrund eines bevorzugten Bereichs erfolgt durch den Vergleich zwischen dem Platzangebot (räumliche Ausdehnung und Form geeigneter WG/EG-Formationen unter Berücksichtigung der Ungewissheiten bzgl. der geologischen Verhältnisse) und dem erforderlichen Platzbedarf.

Das potenzielle Platzangebot innerhalb eines Bereichs entspricht der Abfallmenge, welche unter Ausnützung des gesamten Bereichs eingelagert werden könnte. Dazu werden für das SMA- und das HAA-Lager Grundmodule (entspricht einem Lagerfeld mit einheitlicher Anzahl Lagerkammern und Grundfläche, vgl. Fig. A2.6-5) basierend auf den zugrunde gelegten Lagerkonfigurationen abgeleitet und diese unter Berücksichtigung von sicherheitstechnischen und bautechnischen Anforderungen im gesamten Bereich platziert. Die Platzierung der Grundmodule in subhorizontal gelagerten Wirtgesteinsformationen (Bereiche ausserhalb von bereichsbegrenzenden geologischen Elementen) ist primär abhängig von den felsmechanischen Bedingungen (Grösse der Lagerkammern, Orientierung der Hauptspannungen, Tiefenlage), von der räumlichen Wirtgesteinstopographie (Mächtigkeit, Schichtneigung, Welligkeit der Wirtgesteinsschichtgrenzen), von den Barriereneigenschaften des Wirtgesteins (Mindestabstände), von der Komplexität der lokalen geologischen Verhältnisse (Flexibilität bei unvorhergesehenen geologischen Komplikationen, Reserven) sowie von der Lagerauslegung bzw. der zugelassenen Lagerkonfiguration (Anordnung der Lagerkammern, untertägige Erschliessung etc.). Aus der Summe aller platzierten Grundmodule und unter Berücksichtigung der Grösse der Lagerkammern kann die maximal einlagerbare Abfallmenge abgeleitet werden. Das Grundmodul ist so ausgelegt, dass es aus bautechnischer und betrieblicher Sicht einer vernünftigen Mindestgrösse für ein Lagerfeld entspricht.

Als Grundmodul für das HAA-Lager wird ein Lagerfeld mit 10 BE/HAA-Lagerstollen (Einlagerungslänge 700 m) und einer Grundfläche von ca. 0.42 km^2 bezeichnet, welches ungefähr Platz für ein Abfallvolumen von 3600 m^3 (Endlagerbehälter verpackt) bzw. ca. 18 % des umhüllenden Abfallinventars aufweist (vgl. Fig. A2.6-5).

Als Grundmodul für das SMA-Lager wird ein Lagerfeld bestehend aus 9 Lagerkavernen mit einer bevorzugten Einlagerungslänge von 200 m bezeichnet (vgl. Fig. A2.6-5). Tab. A2-14 listet das Platzangebot (Abfallvolumen konditioniert und in Endlagerbehälter verpackt) in Abhängigkeit des Kavernentyps auf.

Die Bewertung des Platzangebots in subhorizontal gelagerten Wirtgesteinsformationen (Bereiche ausserhalb von bereichsbegrenzenden geologischen Elementen), resp. von tektonischen Akkumulationen, ist primär abhängig vom Abfallinventar, von den felsmechanischen Bedingungen (Grösse der Lagerkammern, Orientierung der Hauptspannungen, Tiefenlage), von der räumlichen Wirtgesteinstopographie (Mächtigkeit, vgl. auch Indikator 'Mächtigkeit'; Schichtneigung, Welligkeit), von den Barriereneigenschaften des Wirtgesteins (inkl. Transportpfadlänge, vgl. auch Indikator 'Länge der Freisetzungspfade'), von der Komplexität der lokalen geologischen Verhältnisse (Flexibilität bei unvorhergesehenen geologischen Komplikationen, Reserven) sowie von der Lagerauslegung bzw. der zugelassenen Lagerkonfiguration (Anordnung der Lagerkammern, untertägige Erschliessung etc.).

Eine Grobbewertung der räumlichen Verhältnisse erfolgt anhand einer vereinfachten Prüfung der vorhandenen Bereichsfläche mit dem Indikator 'Laterale Ausdehnung'.

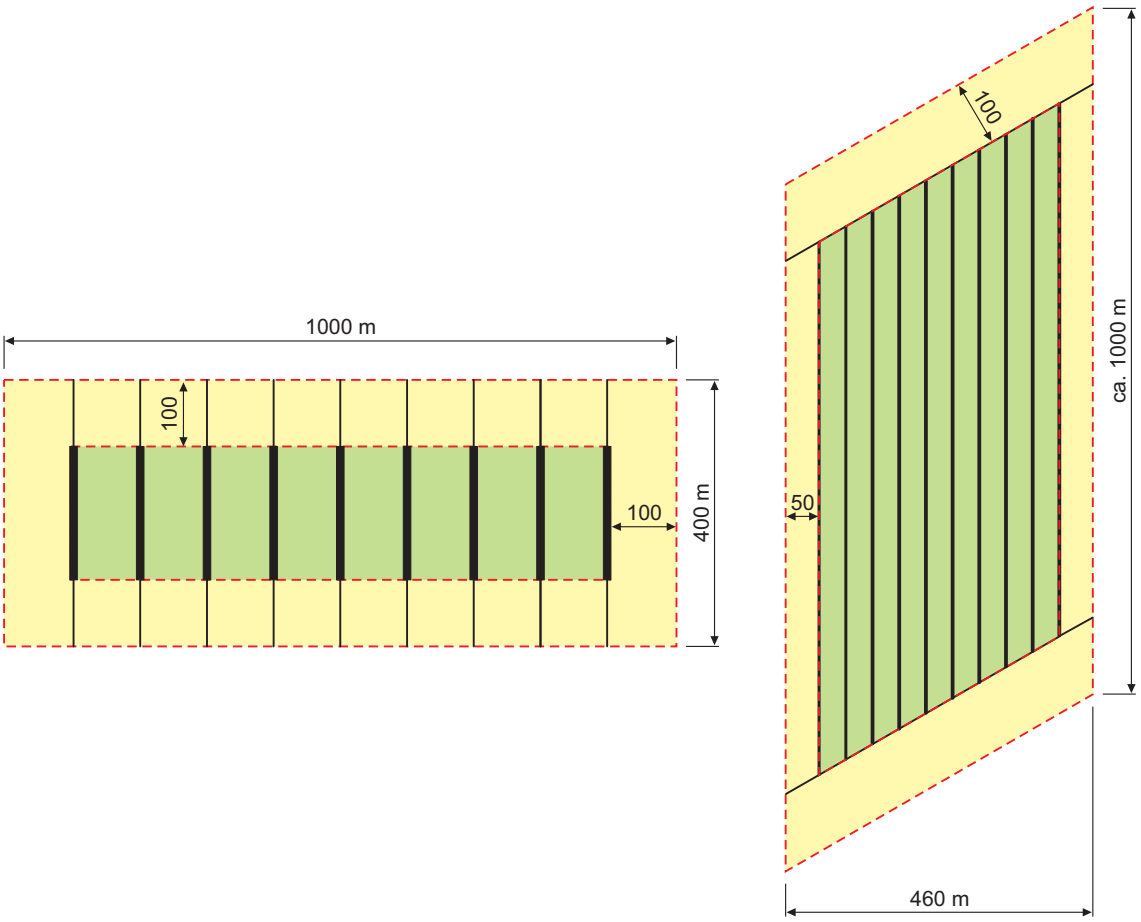
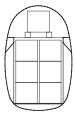
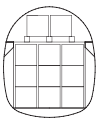
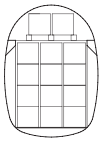
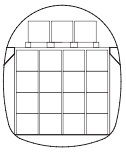
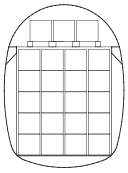


Fig. A2.6-5: Grundmodul SMA (links) und HAA (rechts).
Legende: grün := Lagerkammerbereich; gelb := Lagerfeld

Tab. A2.6-6: Abfallvolumen konditioniert und in Endlagerbehälter verpackt pro SMA-Lagerkaverne und pro Grundmodul SMA in Abhängigkeit des Kavernentyps.

	K04	K06	K09	K12	K16	K20
Abfallvolumen pro:						
Lagerkaverne	4'950 m^3	6'930 m^3	10'890 m^3	13'870 m^3	18'820 m^3	22'780 m^3
Grundmodul	44'550 m^3	62'370 m^3	98'100 m^3	124'830 m^3	169'380 m^3	205'020 m^3

Anhang 3 Wichtige Inputdaten für die sicherheitstechnischen Rechnungen

A3.1 Inventar

Tab. A3.1-1: MIRAM-Abfallsorten im Überblick.

Diese Angaben basieren auf dem Abfallinventar aus den bestehenden KKW bei einer angenommenen Betriebsdauer von 50 Jahren und einer Sammelperiode für die Abfälle aus Medizin, Industrie und Forschung bis 2050 (s. Nagra 2007). Die Eigenschaften der Abfälle sind aber auch für allfällige zukünftige KKW repräsentativ (s. Kap. 3.2.2).

MIRAM-Abfallsorte (1)	MIRAM-Bezeichnung (2)	Anzahl Gebinde (3)	Kat. KEV (4)	Referenz-zuteilung (5)	Alternative Zuteilung (5)	Abfall-gruppe (6)
BA-B-F1	Filterkerzen zementiert in 200-l-Fass	219	SMA	SMA	SMA	1
BA-B-F2	Filterkerzen zementiert in 1 m^3-BC	8	SMA	SMA	SMA	1
BA-B-H1	Harze in Polystyrol in 200-l-Fass	3805	SMA	SMA	SMA	2
BA-B-K1	Konzentrate zementiert in 200-l-Fass	233	SMA	SMA	SMA	1
BA-B-K2	Konzentrate zementiert in 1 m^3-BC	170	SMA	SMA	SMA	1
BA-B-M1	Mischabfälle zementiert in 200-l-Fass	1375	SMA	SMA	SMA	2
BA-B-NP1	Nachbetriebsphase-Abfälle in 200-l-Fass	268	SMA	SMA	SMA	2
BA-B-S1	Schlämme zementiert in 200-l-Fass	584	SMA	SMA	SMA	2
BA-B-V1	Schlacken aus Plasma-Anlage in 200-l-Fass	839	SMA	SMA	SMA	1
BA-B-V2	Aschen zementiert in 200-l-Fass	206	SMA	SMA	SMA	1
BA-G-F1	Filtermaterial zementiert in 200-l-Fass	48	ATA	LMA	LMA	1
BA-G-H1	Harze bituminiert in 200-l-Fass	632	SMA	SMA	SMA	2
BA-G-H2	Harze bituminiert in 1 m^3-BC	12	SMA	SMA	SMA	1
BA-G-H3	Harze zementiert in 200-l-Fass	7	SMA	SMA	SMA	1
BA-G-K1	Konzentrate bituminiert in 200-l-Fass	1655	SMA	SMA	SMA	2
BA-G-K2	Konzentrate bituminiert in 1 m^3-BC	12	SMA	SMA	SMA	2
BA-G-M1	Mischabfälle zementiert in 200-l-Fass	344	SMA	SMA	SMA	2
BA-G-NP1	Nachbetriebsphase-Abfälle in 200-l-Fass	330	SMA	SMA	SMA	2
BA-G-V1	Schlacken aus Plasma-Anlage in 200-l-Fass	380	SMA	SMA	SMA	1
BA-G-V2	Aschen zementiert in 200-l-Fass	139	SMA	SMA	SMA	1
BA-L-H1	Harze und Konzentrate zementiert in 200-l-Fass	10491	SMA	SMA	SMA	2
BA-L-M1	Mischabfälle zementiert in 200-l-Fass	1286	SMA	SMA	SMA	2
BA-L-NP1	Nachbetriebsphase-Abfälle in 200-l-Fass	741	SMA	SMA	SMA	2
BA-L-S1	Schlämme zementiert in 200-l-Fass	10	SMA	SMA	SMA	1
BA-L-V1	Schlacken aus Plasma-Anlage in 200-l-Fass	1066	SMA	SMA	SMA	1
BA-L-V2	Aschen zementiert in 200-l-Fass	237	SMA	SMA	SMA	1
BA-M-F1_ATA	Filterkerzen zementiert in 200-l-Fass	3	ATA	LMA	LMA	1
BA-M-F1_SMA	Filterkerzen zementiert in 200-l-Fass	11	SMA	SMA	SMA	1
BA-M-F2	Filtermaterial zementiert in 200-l-Fass	9	SMA	SMA	SMA	1
BA-M-H1	Harze zementiert in 200-l-Fass	5863	SMA	SMA	SMA	2
BA-M-M1	Mischabfälle zementiert in 200-l-Fass	735	SMA	SMA	SMA	2
BA-M-NP1	Nachbetriebsphase-Abfälle in 200-l-Fass	490	SMA	SMA	SMA	2
BA-M-S1	Schlämme zementiert in 200-l-Fass	45	SMA	SMA	SMA	1

Tab. A3.1-1: (Fortsetzung)

MIRAM-Abfallsorte (1)	MIRAM-Bezeichnung (2)	Anzahl Gebinde (3)	Kat. KEV (4)	Referenz-zuteilung (5)	Alternative Zuteilung (5)	Abfall-gruppe (6)
BA-M-V1	Schlacken aus Plasma-Anlage in 200-l-Fass	655	SMA	SMA	SMA	1
BA-M-V2	Aschen zementiert in 200-l-Fass	193	SMA	SMA	SMA	1
BA-P-AM1	BAG-Zylinder mit Am-241 zementiert in 200-l-Fass	55	ATA	LMA	LMA	1
BA-P-AM2	BAG-Zylinder mit Am-241 zementiert in 1 m^3-BC	8	ATA	LMA	LMA	1
BA-P-AO1_ATA	BAG-Zylinder H-3/C-14/Ra-226 (ohne Am-241) zementiert in 200-l-Fass	2	ATA	LMA	LMA	2
BA-P-AO1_SMA	BAG-Zylinder H-3/C-14/Ra-226 (ohne Am-241) zementiert in 200-l-Fass	23	SMA	SMA	SMA	2
BA-P-AO2	BAG-Zylinder H-3/C-14/Ra-226 (ohne Am-241) zementiert in 1m^3-BC	7	SMA	SMA	SMA	1
BA-P-AO3_ATA	BAG-Zylinder (ohne Am-241) zementiert in 4.5 m^3-KC	1	ATA	LMA	LMA	2
BA-P-AO3_SMA	BAG-Zylinder (ohne Am-241) zementiert in 4.5 m^3-KC	25	SMA	SMA	SMA	2
BA-P-BI1	Bitumen/Glas-Muster WA zementiert in 200-l-Fass	1	ATA	LMA	LMA	1
BA-P-CE1	Isolde-Targets CERN zementiert in 200-l-Fass	26	SMA	SMA	SMA	1
BA-P-HL1	Pu-haltige Abfälle zementiert in 200-l-Fass	333	ATA	LMA	LMA	2
BA-P-HL2	Pu-/β-/γ-haltige Abfälle zementiert in 200-l-Fass	38	ATA	LMA	LMA	1
BA-P-HL3	Pu-/β-/γ-haltige Abfälle zementiert in 1m^3-BC	9	SMA	SMA	SMA	1
BA-P-HL4	Pu-/β-/γ-haltige Abfälle zementiert in 4.5 m^3-KC	8	ATA	LMA	LMA	2
BA-P-HL5_ATA	Pu-/β-/γ-haltige Abfälle zementiert in 200-l-Fass	131	ATA	LMA	LMA	2
BA-P-HL5_SMA	Pu-/β-/γ-haltige Abfälle zementiert in 200-l-Fass	1977	SMA	SMA	SMA	2
BA-P-HL6_ATA	Pu-kont. Sperrgut zementiert in 200-l-Fass	2	ATA	LMA	LMA	2
BA-P-HL6_SMA	Pu-kont. Sperrgut zementiert in 200-l-Fass	265	SMA	SMA	SMA	2
BA-P-HL7	Pu-kont. Bauschutt zementiert in 200-l-Fass	186	SMA	SMA	SMA	1
BA-P-HL8	Laborausrüstungen zementiert in 200-l-Fass	16	SMA	SMA	SMA	2
BA-P-HL9	Pu-Lösungen zementiert in 1.2 m^3-Container	104	ATA	LMA	LMA	1
BA-P-M1	Mischabfälle BAG verpresst/zementiert in 200-l-Fass	2427	SMA	SMA	SMA	2
BA-P-M2_ATA	Mischabfälle BAG zementiert in 200-l-Fass	1	ATA	LMA	LMA	1
BA-P-M2_SMA	Mischabfälle BAG zementiert in 200-l-Fass	910	SMA	SMA	SMA	1
BA-P-MI1	Mischabfälle BAG H-3/C-14/Ra-226 zementiert in 200-l-Fass	1043	SMA	SMA	LMA	1
BA-P-MI2_ATA	Mischabfälle BAG zementiert in 1m^3-BC	1	ATA	LMA	LMA	1
BA-P-MI2_SMA	Mischabfälle BAG zementiert in 1m^3-BC	8	SMA	SMA	SMA	1

Tab. A3.1-1: (Fortsetzung)

MIRAM-Abfallsorte (1)	MIRAM-Bezeichnung (2)	Anzahl Gebinde (3)	Kat. KEV (4)	Referenz-zuteilung (5)	Alternative Zuteilung (5)	Abfall-gruppe (6)
BA-P-O1	Mischabfälle zementiert in 200-l-Fass	498	SMA	SMA	SMA	1
BA-P-O2	Militär-Abfälle zementiert in 4.5 m^3-KC	6	SMA	SMA	SMA	1
BA-P-O3_ATA	Filterabfälle zementiert in 200-l-Fass	1	ATA	LMA	LMA	1
BA-P-O3_SMA	Filterabfälle zementiert in 200-l-Fass	51	SMA	SMA	SMA	1
BA-P-O4_ATA	Uran-Abfälle zementiert in 200-l-Fass	6	ATA	LMA	LMA	1
BA-P-O4_SMA	Uran-Abfälle zementiert in 200-l-Fass	57	SMA	LMA	LMA	1
BA-P-S1	Schlämme zementiert in 200-l-Fass	867	SMA	SMA	SMA	1
BA-P-V1	Schlacken aus Plasma-Anlage in 200-l-Fass	521	SMA	SMA	SMA	1
BA-P-V2	Aschen zementiert in 200-l-Fass	248	SMA	SMA	SMA	1
BA-P-W1	PSI-West Beschleunigerabfälle zementiert in 4.5 m^3-KC	330	SMA	SMA	SMA	1
BA-Z-1	Betriebsabfälle zementiert in 200-l-Fass	195	SMA	SMA	SMA	2
BE-D-2	Brennelemente UO_2/MOX-DWR	380	HAA	HAA	HAA	*)
BE-D-3	Brennelemente UO_2-DWR	408	HAA	HAA	HAA	*)
BE-S-1	Brennelemente UO_2-SWR	843	HAA	HAA	HAA	*)
RA-B-E1	Reaktoreinbauten zementiert in 200-l-Fass	23	SMA	SMA	SMA	1
RA-B-E2	Reaktoreinbauten in Mosaik-II-Behältern	19	SMA	LMA	LMA	1
RA-G-E1	Reaktoreinbauten zementiert in 200-l-Fass	23	SMA	SMA	SMA	1
RA-G-E2	Reaktoreinbauten in Mosaik-II-Behältern	26	SMA	LMA	LMA	1
RA-G-E3	Reaktoreinbauten zementiert in 1m^3-BC	3	SMA	SMA	SMA	1
RA-L-E1	Reaktoreinbauten zementiert in 200-l-Fass	210	SMA	SMA	SMA	1
RA-L-E2	Reaktoreinbauten in Mosaik-II-Behältern	30	SMA	SMA	SMA	1
RA-L-E3	Brennelementkästen zementiert in 200-l-Fass	123	SMA	SMA	SMA	1
RA-L-F1	Filterelemente UWS zementiert in 200-l-Fass	6	SMA	SMA	SMA	1
RA-M-E1	Reaktoreinbauten zementiert in 200-l-Fass	64	SMA	SMA	SMA	1
RA-M-E2	Reaktoreinbauten in Mosaik-II-Behältern	19	SMA	SMA	SMA	1
RA-M-E3	Brennelementkästen zementiert in 200-l-Fass	287	SMA	SMA	SMA	1
RA-M-E4	Kleinteile zementiert in 200-l-Fass	6	SMA	SMA	SMA	1
RA-M-E5	Schwachaktive Lanzen zementiert in 200-l-Fass	6	SMA	SMA	SMA	1
RA-M-E6	Bolzen zementiert in 200-l-Fass	13	SMA	SMA	SMA	1
RA-M-E7	Vergiftungsbleche zementiert in 1 m^3-BC	48	SMA	SMA	SMA	1
RA-M-F1	Filterelemente UWS zementiert in 200-l-Fass	7	SMA	SMA	SMA	1
SA-B-B1	Aktivierter Beton zementiert in 26 m^3-LC1	66	SMA	SMA	SMA	1
SA-B-B10	Kontaminierter Beton zementiert in 26 m^3-LC1	58	SMA	SMA	SMA	1
SA-B-B2	Aktivierter Beton zementiert in 14.3 m^3-LC2	72	SMA	SMA	SMA	1
SA-B-S1	Aktivierter Stahl zementiert in 26 m^3-LC1	7	SMA	SMA	SMA	1
SA-B-S10	Kontaminiertes Material zementiert in 26 m^3-LC1	84	SMA	SMA	SMA	1

Tab. A3.1-1: (Fortsetzung)

MIRAM-Abfallsorte (1)	MIRAM-Bezeichnung (2)	Anzahl Gebinde (3)	Kat. KEV (4)	Referenz-zuteilung (5)	Alternative Zuteilung (5)	Abfall-gruppe (6)
SA-B-S2	Aktiviertes Material zementiert in 14.3 m^3-LC2	44	SMA	SMA	SMA	1
SA-B-S20	Kontaminierter Stahl zementiert in 14.3 m^3-LC2	23	SMA	SMA	SMA	1
SA-B-SM	Aktivierter Stahl in Mosaik-II-Behältern zementiert in 26 m^3-LC1	66	SMA	SMA	LMA	1
SA-B-VS	Sekundärabfälle zementiert in 26 m^3-LC1	20	SMA	SMA	SMA	2
SA-G-B1	Aktivierter Beton zementiert in 26 m^3-LC1	11	SMA	SMA	SMA	1
SA-G-B2	Aktivierter Beton zementiert in 14.3 m^3-LC2	85	SMA	SMA	SMA	1
SA-G-B20	Kontaminierter Beton zementiert in 14.3 m^3-LC2	31	SMA	SMA	SMA	1
SA-G-S20	Kontaminierter Stahl zementiert in 14.3 m^3-LC2	72	SMA	SMA	SMA	1
SA-G-S2H	Aktivierter Stahl hoher Aktivität zementiert in 14.3 m^3-LC2	13	SMA	SMA	SMA	1
SA-G-S2N	Aktivierter Stahl niedriger Aktivität zementiert in 14.3 m^3-LC2	16	SMA	SMA	SMA	1
SA-G-SM	Aktivierter Stahl in Mosaik-II-Behältern zementiert in 26 m^3-LC1	35	SMA	SMA	LMA	1
SA-G-VS	Sekundärabfälle zementiert in 26 m^3-LC1	17	SMA	SMA	SMA	2
SA-L-B1	Aktivierter Beton zementiert in 26 m^3-LC1	33	SMA	SMA	SMA	1
SA-L-B2	Aktivierter Beton zementiert in 14.3 m^3-LC2	68	SMA	SMA	SMA	1
SA-L-B20	Kontaminierter Beton zementiert in 14.3 m^3-LC2	43	SMA	SMA	SMA	1
SA-L-S20	Kontaminierter Stahl zementiert in 14.3 m^3-LC2	224	SMA	SMA	SMA	1
SA-L-S2H	Aktivierter Stahl hoher Aktivität zementiert in 14.3 m^3-LC2	15	SMA	SMA	SMA	1
SA-L-S2N	Aktivierter Stahl niedriger Aktivität zementiert in 14.3 m^3-LC2	96	SMA	SMA	SMA	1
SA-L-SM	Aktivierter Stahl in Mosaik-II-Behältern zementiert in 26 m^3-LC1	55	SMA	SMA	LMA	1
SA-L-VS	Sekundärabfälle zementiert in 26 m^3-LC1	38	SMA	SMA	SMA	2
SA-M-B1	Aktivierter Beton zementiert in 26 m^3-LC1	14	SMA	SMA	SMA	1
SA-M-B20	Kontaminierter Beton zementiert in 14.3 m^3-LC2	89	SMA	SMA	SMA	1
SA-M-S20	Kontaminierter Stahl zementiert in 14.3 m^3-LC2	56	SMA	SMA	SMA	1
SA-M-S2H	Aktivierter Stahl hoher Aktivität zementiert in 14.3 m^3-LC2	12	SMA	SMA	SMA	1
SA-M-S2N	Aktivierter Stahl niedriger Aktivität zementiert in 14.3 m^3-LC2	43	SMA	SMA	SMA	1
SA-M-SM	Aktivierter Stahl in Mosaik-II-Behältern zementiert in 26 m^3-LC1	19	SMA	SMA	LMA	1
SA-M-VS	Sekundärabfälle zementiert in 26 m^3-LC1	13	SMA	SMA	SMA	2
SA-P-DI1	DIORIT-Abfälle zementiert in 200-l-Fass	11	SMA	SMA	SMA	1
SA-P-DI2	DIORIT-Peraluman zementiert in 4.5 m^3-KC	55	SMA	SMA	LMA	1

Tab. A3.1-1: (Fortsetzung)

MIRAM-Abfallsorte (1)	MIRAM-Bezeichnung (2)	Anzahl Gebinde (3)	Kat. KEV (4)	Referenz-zuteilung (5)	Alternative Zuteilung (5)	Abfall-gruppe (6)
SA-P-DI3	DIORIT-Metall/Beton zementiert in 4.5 m^3-KC	63	SMA	SMA	SMA	1
SA-P-HL1	HL-Stilllegungsabfälle zementiert in 200-l-Fass	103	ATA	LMA	LMA	1
SA-P-HL2_ATA	HL-Stilllegungsabfälle (Baustoffe und Metalle) zementiert in 200-l-Fass	28	ATA	LMA	LMA	2
SA-P-HL2_SMA	HL-Stilllegungsabfälle (Baustoffe und Metalle) zementiert in 200-l-Fass	469	SMA	SMA	SMA	2
SA-P-PR1	PROTEUS Stilllegungsabfall zementiert in 4.5 m^3-KC	16	SMA	SMA	SMA	1
SA-P-PV1	PVA-Stilllegungsabfall/Keramikkacheln zementiert in 4.5 m^3-KC	14	SMA	SMA	SMA	1
SA-P-SA1	SAPHIR Stilllegungsabfall zementiert in 4.5 m^3-KC	19	SMA	SMA	SMA	1
SA-P-W1	PSI-West Kupfer zementiert in 4.5 m^3-KC	42	SMA	SMA	SMA	1
SA-P-W10	PSI-West Kupfer zementiert in 16 m^3-GC	9	SMA	SMA	SMA	1
SA-P-W2	PSI-West Edelstahl zementiert in 4.5 m^3-KC	15	SMA	SMA	LMA	1
SA-P-W20	PSI-West Edelstahl zementiert in 16 m^3-GC	3	SMA	SMA	SMA	1
SA-P-W3	PSI-West Aluminium zementiert in 4.5 m^3-KC	41	SMA	SMA	SMA	1
SA-P-W30	PSI-West Aluminium zementiert in 16 m^3-GC	8	SMA	SMA	SMA	1
SA-P-W4	PSI-West Stahl zementiert in 4.5 m^3-KC	575	SMA	SMA	SMA	1
SA-P-W40	PSI-West Stahl zementiert in 16 m^3-GC	109	SMA	SMA	SMA	1
SA-P-W5	PSI-West Stahl/Mörtel zementiert in 4.5 m^3-KC	772	SMA	SMA	SMA	1
SA-P-W50	PSI-West Stahl/Mörtel zementiert in 16 m^3-GC	139	SMA	SMA	SMA	1
SA-P-WG	PSI-West Strahlfänger zementiert in 16 m^3-GC	1	SMA	SMA	SMA	1
SA-Z-1	Stilllegungsabfälle zementiert in 26 m^3-LC1	13	SMA	SMA	SMA	1
SA-Z-LU1	Lucens-Abfälle zementiert in 26 m^3-LC1	7	SMA	SMA	LMA	1
SA-Z-LU2	Lucens-Abfälle zementiert in 14.3 m^3-LC2	6	SMA	SMA	SMA	1
SA-Z-LU3	Lucens-Abfälle zementiert in 1 m^3-BC	13	SMA	SMA	SMA	1
WA-F-1	Verglaste Abfälle AREVA in 180-l-Kokille	439	HAA	HAA	HAA	*)
WA-F-2	Abfälle AREVA bituminiert in 215-l-Fass	390	ATA	LMA	LMA	2
WA-F-4A	Hülsen und Endstücke AREVA in 180-l-Kokille	634	ATA	LMA	LMA	1
WA-U-1	Verglaste Abfälle Sellafield Ltd in 180-l-Kokille	205	HAA	HAA	HAA	*)

(1) Bezeichnung gemäss MIRAM (Nagra 2007, Nagra 2008d).
(2) Entspricht der Bezeichnung in Nagra (2008d). Im Vergleich mit Nagra (2007) noch etwas präziser.
(3) Anzahl Einzelgebinde gemäss (Nagra 2007) für Referenzszenario "50 Jahre KKW-Betrieb".
(4) Abfallkategorie gemäss Definition KEV (2004); s. MIRAM (Nagra 2007, Nagra 2008d).
(5) Abfallzuteilung (s. Kap. 3.3).
(6) Abfallgruppeneinteilung bzgl. Gehalt an Komplexbildnern (unterschiedliche Sorptionswerte); s. Kap. 2.5.
*) Keine Einteilung in Abfallgruppen für BE und verglaste HAA.

Tab. A3.1-2: Sicherheitsrelevante Nuklide (Einzelnuklide).

BE/HAA: Auswahl in Anlehnung an Projekt Entsorgungsnachweis (Nagra 2002d, Tab. A5-1).

LMA: Auswahl in Anlehnung an Projekt Entsorgungsnachweis (Nagra 2002d, Tab. A5-1). Zusätzlich gilt neu ein Nuklid für die LMA als sicherheitsrelevant, falls es für die SMA als sicherheitsrelevant gilt. So wird sichergestellt, dass auch bei Abfallzuteilungen, für die ein Teil der SMA dem LMA-Lager zugeteilt wird, die entsprechenden Nuklide ebenfalls berücksichtigt werden.

SMA: Auswahl in Anlehnung an Projekt SMA/WLB (Nagra 1994b).

Nuklid	**BE**	**HAA**	**LMA**	**SMA**
^{10}Be	✓	–	✓	✓
^{14}C	✓	✓	✓	✓
^{36}Cl	✓	–	✓	✓
^{40}K	–	–	✓	✓
^{41}Ca	✓	–	–	–
^{60}Co	–	–	✓	✓
^{59}Ni	✓	✓	✓	✓
^{63}Ni	✓	✓	✓	✓
^{79}Se	✓	✓	✓	✓
^{90}Sr	✓	✓	✓	✓
^{93}Zr	✓	✓	✓	–
^{93m}Nb	✓	✓	✓	–
^{94}Nb	✓	✓	✓	✓
^{93}Mo	✓	✓	✓	✓
^{99}Tc	✓	✓	✓	–
^{107}Pd	✓	✓	–	–
^{108m}Ag	✓	✓	✓	✓
^{121m}Sn	–	–	✓	–
^{126}Sn	✓	✓	✓	✓
^{129}I	✓	✓	✓	✓
^{135}Cs	✓	✓	✓	–
^{137}Cs	✓	✓	✓	✓
^{151}Sm	✓	✓	✓	–
^{154}Eu	–	–	✓	–
^{166m}Ho	✓	✓	–	–

Tab. A3.1-3: Sicherheitsrelevante Nuklide (Zerfallskettennuklide).

Auswahl übernommen von Projekt Entsorgungsnachweis (Nagra 2002d, Tab. A5-2).

4N	**4N+1**	**4N+2**	**4N+3**
^{244}Cm	^{245}Cm	^{246}Cm	^{243}Cm
^{240}Pu	^{241}Pu	^{242m}Am	^{243}Am
^{236}U	^{241}Am	^{242}Pu	^{239}Pu
^{232}U	^{237}Np	^{238}Pu	^{235}U
^{232}Th	^{233}U	^{238}U	^{231}Pa
^{228}Ra	^{229}Th	^{234}U	^{227}Ac
^{228}Th		^{230}Th	
		^{226}Ra	
		^{210}Pb	
		^{210}Po	

Tab. A3.1-4: Inventar der sicherheitsrelevanten Nuklide in einem BE-Behälter des Typs BE-S-1 (9 SWR UO_2 BE mit einem Abbrand von 48 GWd/t_{IHM} nach 40 Jahren Zerfall).

Die Werte in dieser Tabelle entsprechen denjenigen in Tab. A2.1.1 in Nagra (2002c). Das Inventar pro Behälter dieses Typs, so wie es im Projekt Entsorgungsnachweis verwendet wurde, bildet auch die Grundlage für Nagra (2007); die Anzahl Behälter wurde jedoch angepasst (s. Tab. A3.1-1).

Radionuklid	**Brennstoff** [Bq]	**Struktur-materialien** [Bq]	**Radionuklid**	**Brennstoff** [Bq]	**Struktur-materialien** [Bq]
^{10}Be	1.8×10^{7}	2.9×10^{3}	^{227}Ac	3.3×10^{5}	-
$^{14}C_{anorg}$	6.7×10^{10}	0	^{228}Th	1.9×10^{8}	6.8×10^{1}
$^{14}C_{org}$	0	5.7×10^{10}	^{229}Th	1.4×10^{4}	-
^{36}Cl	8.6×10^{8}	1.4×10^{9}	^{230}Th	3.2×10^{7}	1.6×10^{1}
^{41}Ca	2.2×10^{8}	7.0×10^{7}	^{232}Th	4.1×10^{1}	-
^{59}Ni	8.9×10^{8}	1.3×10^{11}	^{231}Pa	7.6×10^{5}	-
^{63}Ni	9.2×10^{10}	1.3×10^{13}	^{232}U	1.8×10^{8}	6.5×10^{1}
^{79}Se	1.6×10^{9}	8.0×10^{3}	^{233}U	6.7×10^{6}	4.6×10^{0}
^{90}Sr	2.2×10^{15}	6.0×10^{9}	^{234}U	9.7×10^{10}	8.3×10^{4}
^{93}Zr	1.5×10^{11}	1.8×10^{10}	^{235}U	9.1×10^{8}	-
^{93m}Nb	1.2×10^{11}	1.4×10^{10}	^{236}U	2.1×10^{10}	6.0×10^{3}
^{94}Nb	2.1×10^{8}	1.3×10^{10}	^{238}U	1.9×10^{10}	2.2×10^{4}
^{93}Mo	8.3×10^{7}	3.3×10^{8}	^{237}Np	3.2×10^{10}	4.6×10^{4}
^{99}Tc	1.1×10^{12}	6.7×10^{7}	^{238}Pu	2.6×10^{14}	6.0×10^{8}
^{107}Pd	1.0×10^{10}	1.2×10^{5}	^{239}Pu	2.2×10^{13}	2.2×10^{8}
^{108m}Ag	1.4×10^{9}	4.3×10^{4}	^{240}Pu	4.0×10^{13}	3.0×10^{8}
^{126}Sn	3.0×10^{10}	3.2×10^{5}	^{241}Pu	1.5×10^{15}	1.9×10^{10}
^{129}I	2.7×10^{9}	1.9×10^{4}	^{242}Pu	1.9×10^{11}	2.9×10^{6}
^{135}Cs	3.7×10^{10}	1.8×10^{5}	^{241}Am	3.0×10^{14}	3.7×10^{9}
^{137}Cs	3.5×10^{15}	1.9×10^{10}	^{242m}Am	5.7×10^{11}	7.1×10^{6}
^{151}Sm	1.6×10^{13}	1.1×10^{8}	^{243}Am	2.2×10^{12}	3.8×10^{7}
^{166m}Ho	2.1×10^{9}	1.0×10^{4}	^{243}Cm	6.7×10^{11}	1.0×10^{7}
^{210}Pb	9.4×10^{4}	-	^{244}Cm	8.0×10^{13}	1.4×10^{9}
^{210}Po	9.1×10^{4}	-	^{245}Cm	5.6×10^{10}	1.0×10^{6}
^{226}Ra	2.9×10^{5}	-	^{246}Cm	1.2×10^{10}	2.6×10^{5}
^{228}Ra	3.2×10^{1}	-			

Tab. A3.1-5: Inventar der sicherheitsrelevanten Nuklide in einem BE-Behälter des Typs BE-D-2 (3 DWR UO_2 BE und 1 DWR MOX BE mit einem Abbrand von 48 GWd/t_{IHM} nach 40 Jahren Zerfall).

Die Werte in dieser Tabelle entsprechen denjenigen in Tab. A2.1.2 in Nagra (2002c). Das Inventar pro Behälter dieses Typs, so wie es im Projekt Entsorgungsnachweis verwendet wurde, bildet auch die Grundlage für Nagra (2007); die Anzahl Behälter wurde jedoch angepasst (s. Tab. A3.1-1).

Radionuklid	**Brennstoff** [Bq]	**Struktur-materialien** [Bq]	**Radionuklid**	**Brennstoff** [Bq]	**Struktur-materialien** [Bq]
^{10}Be	1.7×10^{7}	4.5×10^{3}	^{227}Ac	3.0×10^{5}	-
$^{14}C_{anorg}$	5.6×10^{10}	0	^{228}Th	1.7×10^{8}	5.1×10^{1}
$^{14}C_{org}$	0	3.2×10^{10}	^{229}Th	1.1×10^{4}	-
^{36}Cl	6.9×10^{8}	7.0×10^{8}	^{230}Th	3.0×10^{7}	1.0×10^{1}
^{41}Ca	1.8×10^{8}	3.4×10^{7}	^{232}Th	3.1×10^{1}	-
^{59}Ni	7.2×10^{8}	1.2×10^{11}	^{231}Pa	7.0×10^{5}	-
^{63}Ni	7.3×10^{10}	1.2×10^{13}	^{232}U	1.7×10^{8}	4.9×10^{1}
^{79}Se	1.4×10^{9}	4.4×10^{3}	^{233}U	5.4×10^{6}	3.0×10^{0}
^{90}Sr	1.9×10^{15}	3.4×10^{9}	^{234}U	9.5×10^{10}	5.1×10^{4}
^{93}Zr	1.3×10^{11}	9.4×10^{9}	^{235}U	8.4×10^{8}	-
^{93m}Nb	1.0×10^{11}	8.0×10^{9}	^{236}U	1.6×10^{10}	3.7×10^{3}
^{94}Nb	1.8×10^{8}	3.6×10^{10}	^{238}U	1.6×10^{10}	1.5×10^{4}
^{93}Mo	7.3×10^{7}	7.1×10^{8}	^{237}Np	2.8×10^{10}	2.9×10^{4}
^{99}Tc	1.0×10^{12}	1.8×10^{8}	^{238}Pu	3.2×10^{14}	3.6×10^{8}
^{107}Pd	1.1×10^{10}	6.5×10^{4}	^{239}Pu	2.9×10^{13}	1.5×10^{8}
^{108m}Ag	1.2×10^{9}	2.2×10^{4}	^{240}Pu	6.6×10^{13}	2.0×10^{8}
^{126}Sn	3.3×10^{10}	1.8×10^{5}	^{241}Pu	2.5×10^{15}	1.2×10^{10}
^{129}I	2.7×10^{9}	1.1×10^{4}	^{242}Pu	3.1×10^{11}	1.5×10^{6}
^{135}Cs	4.4×10^{10}	1.2×10^{5}	^{241}Am	4.9×10^{14}	2.4×10^{9}
^{137}Cs	3.3×10^{15}	1.1×10^{10}	^{242m}Am	2.3×10^{12}	5.6×10^{6}
^{151}Sm	1.9×10^{13}	7.0×10^{7}	^{243}Am	4.0×10^{12}	2.0×10^{7}
^{166m}Ho	2.0×10^{9}	5.2×10^{3}	^{243}Cm	2.0×10^{12}	5.5×10^{6}
^{210}Pb	8.3×10^{4}	-	^{244}Cm	1.8×10^{14}	7.1×10^{8}
^{210}Po	8.0×10^{4}	-	^{245}Cm	1.8×10^{11}	4.8×10^{5}
^{226}Ra	2.6×10^{5}	-	^{246}Cm	3.3×10^{10}	1.2×10^{5}
^{228}Ra	2.4×10^{1}	-			

Tab. A3.1-6: Inventar der sicherheitsrelevanten Nuklide in einem BE-Behälter des Typs BE-D-3 (4 DWR UO_2 BE mit einem Abbrand von 48 GWd/t_{IHM} nach 40 Jahren Zerfall).

Die Werte in dieser Tabelle entsprechen denjenigen in Tab. A2.1.3 in Nagra (2002c). Das Inventar pro Behälter dieses Typs, so wie es im Projekt Entsorgungsnachweis verwendet wurde, bildet auch die Grundlage für Nagra (2007); die Anzahl Behälter wurde jedoch angepasst (s. Tab. A3.1-1).

Radionuklid	**Brennstoff** [Bq]	**Struktur-materialien** [Bq]	**Radionuklid**	**Brennstoff** [Bq]	**Struktur-materialien** [Bq]
^{10}Be	1.7×10^{7}	4.5×10^{3}	^{227}Ac	3.9×10^{5}	-
$^{14}C_{anorg}$	6.2×10^{10}	0	^{228}Th	2.0×10^{8}	4.7×10^{1}
$^{14}C_{org}$	0	3.6×10^{10}	^{229}Th	1.4×10^{4}	-
^{36}Cl	8.1×10^{8}	8.2×10^{8}	^{230}Th	3.4×10^{7}	1.1×10^{1}
^{41}Ca	2.2×10^{8}	4.0×10^{7}	^{232}Th	4.0×10^{1}	-
^{59}Ni	8.4×10^{8}	1.2×10^{11}	^{231}Pa	9.0×10^{5}	-
^{63}Ni	8.6×10^{10}	1.3×10^{13}	^{232}U	2.0×10^{8}	4.5×10^{1}
^{79}Se	1.6×10^{9}	4.8×10^{3}	^{233}U	6.5×10^{6}	3.0×10^{0}
^{90}Sr	2.2×10^{15}	3.7×10^{9}	^{234}U	1.0×10^{11}	5.4×10^{4}
^{93}Zr	1.5×10^{11}	1.0×10^{10}	^{235}U	1.1×10^{9}	-
^{93m}Nb	1.2×10^{11}	8.7×10^{9}	^{236}U	2.0×10^{10}	3.9×10^{3}
^{94}Nb	1.9×10^{8}	3.7×10^{10}	^{238}U	1.7×10^{10}	1.6×10^{4}
^{93}Mo	7.6×10^{7}	7.3×10^{8}	^{237}Np	3.1×10^{10}	2.8×10^{4}
^{99}Tc	1.1×10^{12}	1.9×10^{8}	^{238}Pu	2.3×10^{14}	3.9×10^{8}
^{107}Pd	9.6×10^{9}	7.2×10^{4}	^{239}Pu	2.2×10^{13}	1.4×10^{8}
^{108m}Ag	1.3×10^{9}	2.5×10^{4}	^{240}Pu	3.6×10^{13}	2.0×10^{8}
^{126}Sn	3.0×10^{10}	2.0×10^{5}	^{241}Pu	1.5×10^{15}	1.2×10^{10}
^{129}I	2.6×10^{9}	1.2×10^{4}	^{242}Pu	1.7×10^{11}	1.7×10^{6}
^{135}Cs	3.9×10^{10}	1.2×10^{5}	^{241}Am	2.8×10^{14}	2.3×10^{9}
^{137}Cs	3.4×10^{15}	1.2×10^{10}	^{242m}Am	6.2×10^{11}	5.0×10^{6}
^{151}Sm	1.6×10^{13}	6.7×10^{7}	^{243}Am	2.0×10^{12}	2.3×10^{7}
^{166m}Ho	1.9×10^{9}	6.2×10^{3}	^{243}Cm	6.5×10^{11}	6.1×10^{6}
^{210}Pb	1.0×10^{5}	-	^{244}Cm	7.5×10^{13}	8.7×10^{8}
^{210}Po	9.8×10^{4}	-	^{245}Cm	5.0×10^{10}	5.9×10^{5}
^{226}Ra	3.1×10^{5}	-	^{246}Cm	1.2×10^{10}	1.5×10^{5}
^{228}Ra	3.1×10^{1}	-			

Tab. A3.1-7: Inventar der sicherheitsrelevanten Nuklide in einem HAA-Behälter des Typs WA-U-1 mit einer Kokille mit verglastem HAA von Sellafield Ltd. nach 40 Jahren Zerfall.

Die Werte in dieser Tabelle entsprechen denjenigen in Tab. A2.1.4 in Nagra (2002c). Das Inventar pro Behälter dieses Typs, so wie es im Projekt Entsorgungsnachweis verwendet wurde, bildet auch die Grundlage für Nagra (2007); die Anzahl Behälter wurde jedoch angepasst (s. Tab. A3.1-1).

Radionuklid	**Aktivität** [Bq]	**Radionuklid**	**Aktivität** [Bq]
$^{14}C_{anorg}$	7.1×10^{7}	^{229}Th	6.3×10^{3}
^{59}Ni	6.7×10^{8}	^{230}Th	1.1×10^{7}
^{63}Ni	7.1×10^{10}	^{231}Pa	2.0×10^{6}
^{79}Se	1.6×10^{9}	^{232}Th	-
^{90}Sr	1.6×10^{15}	^{232}U	2.3×10^{5}
^{93}Zr	1.3×10^{11}	^{233}U	3.5×10^{6}
^{93}Mo	5.0×10^{7}	^{234}U	9.9×10^{7}
^{93m}Nb	1.1×10^{11}	^{235}U	3.0×10^{5}
^{94}Nb	9.9×10^{6}	^{236}U	3.7×10^{6}
^{99}Tc	9.4×10^{11}	^{238}U	6.0×10^{6}
^{107}Pd	7.5×10^{9}	^{237}Np	2.0×10^{10}
^{108m}Ag	4.7×10^{8}	^{238}Pu	7.7×10^{11}
^{126}Sn	5.1×10^{10}	^{239}Pu	6.7×10^{10}
^{129}I	2.1×10^{6}	^{240}Pu	2.3×10^{11}
^{135}Cs	3.9×10^{10}	^{241}Pu	2.2×10^{12}
^{137}Cs	2.3×10^{15}	^{242}Pu	3.5×10^{8}
^{151}Sm	1.7×10^{13}	^{241}Am	1.0×10^{14}
^{166m}Ho	1.5×10^{8}	^{242m}Am	1.2×10^{12}
^{210}Pb	8.1×10^{4}	^{243}Am	8.8×10^{11}
^{210}Po	7.9×10^{4}	^{243}Cm	2.9×10^{11}
^{226}Ra	1.9×10^{5}	^{244}Cm	1.2×10^{13}
^{227}Ac	1.6×10^{6}	^{245}Cm	6.5×10^{9}
^{228}Ra	-	^{246}Cm	1.2×10^{9}
^{228}Th	2.3×10^{5}		

Tab. A3.1-8: Inventar der sicherheitsrelevanten Nuklide in einem HAA-Behälter des Typs WA-F-1 mit einer Kokille mit verglastem HAA von AREVA nach 40 Jahren Zerfall.

Die Werte in dieser Tabelle entsprechen denjenigen in Tab. A2.1.5 in Nagra (2002c). Das Inventar pro Behälter dieses Typs, so wie es im Projekt Entsorgungsnachweis verwendet wurde, bildet auch die Grundlage für Nagra (2007); die Anzahl Behälter wurde jedoch angepasst (s. Tab. A3.1-1).

Radionuklid	**Aktivität** [Bq]	**Radionuklid**	**Aktivität** [Bq]
$^{14}C_{anorg}$	1.9×10^{8}	^{229}Th	5.5×10^{3}
^{59}Ni	2.4×10^{9}	^{230}Th	3.1×10^{6}
^{63}Ni	2.6×10^{11}	^{231}Pa	8.3×10^{5}
^{79}Se	1.2×10^{9}	^{232}Th	-
^{90}Sr	1.3×10^{15}	^{232}U	1.0×10^{6}
^{93}Zr	9.4×10^{10}	^{233}U	3.1×10^{6}
^{93}Mo	5.1×10^{7}	^{234}U	1.0×10^{8}
^{93m}Nb	7.7×10^{10}	^{235}U	1.2×10^{6}
^{94}Nb	6.8×10^{8}	^{236}U	1.7×10^{7}
^{99}Tc	8.4×10^{11}	^{238}U	1.9×10^{7}
^{107}Pd	6.5×10^{9}	^{237}Np	1.7×10^{10}
^{108m}Ag	5.4×10^{8}	^{238}Pu	3.1×10^{11}
^{126}Sn	3.7×10^{10}	^{239}Pu	2.1×10^{10}
^{129}I	1.6×10^{6}	^{240}Pu	1.9×10^{11}
^{135}Cs	2.0×10^{10}	^{241}Pu	8.9×10^{11}
^{137}Cs	1.9×10^{15}	^{242}Pu	1.1×10^{8}
^{151}Sm	1.4×10^{13}	^{241}Am	3.1×10^{13}
^{166m}Ho	1.8×10^{8}	^{242m}Am	6.0×10^{11}
^{210}Pb	2.3×10^{4}	^{243}Am	7.6×10^{11}
^{210}Po	2.2×10^{4}	^{243}Cm	2.7×10^{11}
^{226}Ra	5.4×10^{4}	^{244}Cm	1.5×10^{13}
^{227}Ac	6.3×10^{5}	^{245}Cm	5.9×10^{9}
^{228}Ra	-	^{246}Cm	1.1×10^{9}
^{228}Th	1.1×10^{6}		

Tab. A3.1-9: Inventar der sicherheitsrelevanten Nuklide der LMA (Referenzzuteilung RZ, alternative Zuteilung AZ), Referenzjahr 2050.

Daten berechnet mit Hilfe der Tab. A3.1-1 und dem Nuklidinventar pro Abfallsorte aus Nagra (2007).

Radionuklid	**Inventar LMA Referenzzuteilung** [Bq]	**Inventar LMA alternative Zuteilung** [Bq]
^{10}Be	7.0×10^{6}	3.1×10^{8}
$^{14}C_{anorg}$	9.3×10^{12}	9.3×10^{12}
$^{14}C_{org}$	1.4×10^{13}	4.3×10^{14}
^{36}Cl	3.7×10^{10}	4.9×10^{12}
^{40}K	0	7.6×10^{6}
^{59}Ni	1.3×10^{14}	1.3×10^{15}
^{60}Co	7.1×10^{14}	1.5×10^{17}
^{63}Ni	1.6×10^{16}	2.4×10^{17}
^{79}Se	2.9×10^{9}	2.1×10^{11}
^{90}Sr	2.5×10^{15}	2.6×10^{15}
^{93m}Nb	4.0×10^{12}	4.9×10^{13}
^{93}Mo	4.3×10^{11}	1.8×10^{13}
^{93}Zr	4.6×10^{12}	4.6×10^{12}
^{94}Nb	1.8×10^{13}	2.5×10^{13}
^{99}Tc	1.9×10^{12}	2.5×10^{12}
^{108m}Ag	7.2×10^{14}	7.3×10^{14}
^{121m}Sn	5.4×10^{12}	5.5×10^{12}
^{126}Sn	1.6×10^{10}	1.6×10^{10}
^{129}I	4.9×10^{10}	4.9×10^{10}
^{135}Cs	1.4×10^{11}	1.4×10^{11}
^{137}Cs	3.0×10^{15}	3.0×10^{15}
^{151}Sm	6.8×10^{13}	6.8×10^{13}
^{154}Eu	1.2×10^{13}	1.4×10^{13}
^{210}Pb	1.8×10^{11}	2.0×10^{11}
^{210}Po	1.8×10^{11}	2.0×10^{11}
^{226}Ra	2.6×10^{11}	2.9×10^{11}
^{227}Ac	9.8×10^{7}	1.0×10^{8}
^{228}Ra	7.4×10^{7}	2.2×10^{8}
^{228}Th	2.3×10^{9}	8.9×10^{9}
^{229}Th	3.4×10^{7}	4.6×10^{7}
^{230}Th	5.1×10^{7}	5.5×10^{7}
^{231}Pa	2.0×10^{7}	2.7×10^{7}
^{232}Th	7.6×10^{7}	2.5×10^{8}

Tab. A3.1-9: (Fortsetzung)

Radionuklid	**Inventar LMA Referenzzuteilung** [Bq]	**Inventar LMA alternative Zuteilung** [Bq]
^{232}U	2.2×10^{9}	8.5×10^{9}
^{233}U	9.9×10^{7}	3.7×10^{9}
^{234}U	1.5×10^{11}	1.5×10^{11}
^{235}U	6.3×10^{9}	6.4×10^{9}
^{236}U	1.3×10^{10}	1.3×10^{10}
^{237}Np	2.7×10^{10}	2.7×10^{10}
^{238}Pu	7.9×10^{13}	7.9×10^{13}
^{238}U	1.3×10^{11}	1.3×10^{11}
^{239}Pu	4.1×10^{13}	4.1×10^{13}
^{240}Pu	3.0×10^{13}	3.0×10^{13}
^{241}Am	1.7×10^{14}	1.7×10^{14}
^{241}Pu	8.2×10^{14}	8.2×10^{14}
^{242m}Am	1.6×10^{11}	1.6×10^{11}
^{242}Pu	7.4×10^{10}	7.5×10^{10}
^{243}Am	3.8×10^{11}	3.8×10^{11}
^{243}Cm	1.1×10^{11}	1.1×10^{11}
^{244}Cm	2.5×10^{13}	2.7×10^{13}
^{245}Cm	4.4×10^{9}	4.8×10^{9}
^{246}Cm	8.0×10^{8}	7.7×10^{9}

Bei der Berechnung der Löslichkeit der Elemente C_{anorg} , Co und Ni sind die Gehalte der stabilen Isotope im Zement berücksichtigt worden (vgl. Tab. A3.2-4). Daher sind folgende stabile Inventare einzubeziehen:

Referenzzuteilung

	C_{anorg}	*Co*	*Ni*
LMA-1	8.6×10^{2} *mol*	*1.3 mol*	*6.4 mol*
LMA-2	3.8×10^{2} *mol*	*0.56 mol*	*2.8 mol*

Alternative Zuteilung

	C_{anorg}	*Co*	*Ni*
LMA-1	3.2×10^{3} *mol*	*4.8 mol*	*24 mol*
LMA-2	3.8×10^{2} *mol*	*0.56 mol*	*2.8 mol*

Tab. A3.1-10: Inventar der sicherheitsrelevanten Nuklide der SMA (Referenzzuteilung RZ, Alternative Zuteilung AZ), Referenzjahr 2050.

Daten berechnet mit Hilfe der Tab. A3.1-1 und dem Nuklidinventar pro Abfallsorte aus Nagra (2007).

Radionuklid	**Inventar SMA Referenzzuteilung** [Bq]	**Inventar SMA alternative Zuteilung** [Bq]
^{10}Be	1.4×10^{9}	1.1×10^{9}
$^{14}C_{anorg}$	1.1×10^{13}	1.1×10^{13}
$^{14}C_{org}$	4.3×10^{14}	1.4×10^{13}
^{36}Cl	5.2×10^{12}	3.2×10^{11}
^{40}K	1.6×10^{9}	1.6×10^{9}
^{59}Ni	1.2×10^{15}	6.4×10^{13}
^{60}Co	1.5×10^{17}	1.7×10^{15}
^{63}Ni	2.3×10^{17}	1.1×10^{16}
^{79}Se	2.1×10^{11}	7.9×10^{9}
^{90}Sr	1.8×10^{13}	1.1×10^{13}
^{93}Mo	1.8×10^{13}	1.1×10^{12}
^{94}Nb	7.0×10^{12}	7.7×10^{11}
^{108m}Ag	7.5×10^{12}	2.3×10^{11}
^{126}Sn	4.2×10^{10}	4.2×10^{10}
^{129}I	1.6×10^{8}	1.6×10^{8}
^{137}Cs	1.6×10^{14}	1.5×10^{14}
^{210}Pb	5.6×10^{10}	4.0×10^{10}
^{210}Po	5.5×10^{10}	4.0×10^{10}
^{226}Ra	1.0×10^{11}	7.4×10^{10}
^{227}Ac	1.4×10^{7}	1.0×10^{7}
^{228}Ra	6.0×10^{8}	4.5×10^{8}
^{228}Th	7.2×10^{9}	6.6×10^{8}
^{229}Th	1.3×10^{7}	1.3×10^{6}
^{230}Th	1.2×10^{7}	7.4×10^{6}
^{231}Pa	8.3×10^{6}	1.1×10^{6}
^{232}Th	6.5×10^{8}	4.8×10^{8}
^{232}U	6.5×10^{9}	2.1×10^{8}
^{233}U	4.0×10^{9}	4.1×10^{8}
^{234}U	1.9×10^{10}	1.4×10^{10}

Tab. A3.1-10: (Fortsetzung)

Radionuklid	**Inventar SMA Referenzzuteilung** [Bq]	**Inventar SMA alternative Zuteilung** [Bq]
^{235}U	1.2×10^{9}	1.1×10^{9}
^{236}U	4.3×10^{8}	1.8×10^{8}
^{237}Np	2.5×10^{7}	1.9×10^{7}
^{238}Pu	1.7×10^{12}	1.5×10^{12}
^{238}U	1.1×10^{10}	9.8×10^{9}
^{239}Pu	4.9×10^{11}	3.7×10^{11}
^{240}Pu	3.2×10^{11}	2.6×10^{11}
^{241}Am	2.3×10^{12}	2.0×10^{12}
^{241}Pu	2.3×10^{13}	2.1×10^{13}
^{242m}Am	1.1×10^{9}	6.9×10^{8}
^{242}Pu	1.4×10^{9}	1.3×10^{9}
^{243}Am	2.6×10^{10}	2.2×10^{10}
^{243}Cm	5.1×10^{9}	4.5×10^{9}
^{244}Cm	2.5×10^{12}	4.1×10^{11}
^{245}Cm	6.4×10^{8}	2.3×10^{8}
^{246}Cm	7.3×10^{9}	4.4×10^{8}

A3.2 Nahfelddaten

A3.2.1 SMA und LMA

Tab. A3.2-1: VPAC Modellparameter für die Berechnung des advektiv-diffusiven Radionuklidtransports im Nahfeld des SMA-Lagers.

Modellparameter	**Referenzwert**
Länge Lagertunnel	Referenzzuteilung / Alternative Zuteilung: 800 m (SMA-1): 4 Tunnel mit je 200 m Länge 600 m (SMA-2): 3 Tunnel mit je 200 m Länge
Lichtraumfläche Lagertunnel	110 m^2 (SMA-1 und SMA-2) [1)]
Kavernenverfüllung	Zementmörtel [2)]
Porosität	0.2
Sorptionswirksamer Anteil der Festphase (Zementmatrix)	350 kg/m^3
Hydraulische Durchlässigkeit	10^{-6} m/s
Dispersionslänge (longitudinal / transversal)	2 / 0.2 m
Effektiver Diffusionskoeffizient	2×10^{-10} m^2/s

1) Entspricht SMA-Lagerkavernen des Typs K09 (vgl. Anhang A2).

2) In den Berechnungen zur Radionuklidausbreitung mit dem Programmcode VPAC werden die Systemkomponenten "Abfallmatrix", "Containerverfüllung", "Containerwand" und "Kavernenverfüllung" modellhaft in einer gemeinsamen Materialklasse zusammengefasst. Eine hydraulisch wirksame Kavernenverkleidung wird nicht unterstellt.

Tab. A3.2-2: STMAN Modellparameter für die Berechnung der (diffusiven) Radionuklidfreisetzung aus dem Nahfeld des LMA-Lagers.

Modellparameter	**Referenzwert**
Länge Lagertunnel	Referenzzuteilung: 100 m (LMA-1) 50 m (LMA-2)
	Alternative Zuteilung: 300 m (LMA-1) 50 m (LMA-2)
Radius Lagertunnel	4.95 m (LMA-1 und LMA-2)
Porosität der Zementmatrix	0.2
Sorptionswirksamer Anteil der Festphase (Zementmatrix)	350 kg/m^3
Einschlusszeit bzw. Aufsättigungsdauer	100 a

Tab. A3.2-3: Sorptionsdaten für die SMA- und LMA-Abfallgruppen 1 und 2 für das Zement-Nahfeld: Nicht-degradierter Zement ("Zement") und degradierter Zement ("Calcit").

Die Werte in Klammern gelten für die Abfallgruppe LMA-2, d.h. Abfallsorten der Abfallgruppe 2 im LMA-Lager (oxidierende Bedingungen aufgrund der Oxidationsmittel in der Abfallsorte WA-F-2). Für SMA-2 (d.h. Abfallsorten der Abfallgruppe 2 im SMA-Lager) gelten die Werte ohne Klammern. Aus Nagra (2008j).

Element	**Abfallgruppe 1** $\mathbf{K_d}$ [m^3/kg]		**Abfallgruppe 2** $\mathbf{K_d}$ [m^3/kg]	
	Zement	**Calcit**	**Zement**	**Calcit**
Be	0	0	0	0
C_{anorg} *	0.4	0.001	0.4	0.001
C_{org}	0	0	0	0
Cl	0.005	0	0.005	0
K	0	0	0	0
Co *	0.01	0.002	0	0.002
Ni *	1	5×10^{-4}	0	5×10^{-4}
Se	0.03	0	0.03 (0.001)	0
Sr	0.001	5×10^{-5}	0.001	5×10^{-5}
Zr	10	0.7	1	0.7
Nb	1	0	1	0
Mo	0	0	0	0
Tc	0.001	0	0.001	0
Ag	0	0	0	0
Sn	10	0	1	0
I	0.001	0	0.001	0
Cs	5×10^{-4}	0	5×10^{-4}	0
Sm	20	1	2	1
Eu	20	1	2	1
Pb	0.5	0.1	0.05	0.1
Po	0	0	0	0
Ra	0.05	5×10^{-5}	0.05	5×10^{-5}
Ac	20	1	2	1
Th	5	0.7	0.5	0.7
Pa	0.1	0.04	0.1	0.04
U	2	0.2	2	0.2
Np	5	0.1	0.5 (0.1)	0.1
Pu	5	0.1	0.5 (0.1)	0.1
Am	20	1	2	1
Cm	20	1	2	1

* Für das LMA-Nahfeld wird in den mit dem Rechencode STMAN gerechneten Rechenfällen die Wirksamkeit von Löslichkeitslimiten unterstellt. Da die genannten Sorptionswerte für C_{anorg}, Co und Ni aus "shared Solubilities" ermittelt wurden, werden für das LMA-Nahfeld bei Verwendung von Löslichkeitslimiten (vgl. Tab. A3.2-4) die entsprechenden K_d-Werte auf 0 gesetzt, um diese Information nicht zweimal zu verwenden.

Tab. A3.2-4: Löslichkeitslimiten im LMA-Nahfeld.

Aus Nagra (2008j).

Element	**Abfallgruppe 1** [Mol/L]	**Abfallgruppe 2** [Mol/L]
Ac	2×10^{-6}	2×10^{-6}
Ag	3×10^{-6}	–
Am	2×10^{-9}	2×10^{-9}
Be	–	-
C_{anorg} *	2×10^{-4}	2×10^{-4}
C_{org}	–	–
Cl	–	–
Cm	2×10^{-9}	2×10^{-9}
Co *	7×10^{-7}	–
Cs	–	–
Eu	2×10^{-6}	2×10^{-6}
I	–	–
K	–	–
Mo	3×10^{-5}	3×10^{-5}
Nb	–	–
Ni *	3×10^{-7}	–
Np	5×10^{-9}	–
Pa	1×10^{-8}	1×10^{-8}
Pb	3×10^{-3}	3×10^{-3}
Po	–	–
Pu	4×10^{-11}	6×10^{-10}
Ra	1×10^{-5}	1×10^{-5}
Se	1×10^{-5}	–
Sm	2×10^{-6}	2×10^{-6}
Sn	1×10^{-7}	1×10^{-7}
Sr	3×10^{-3}	3×10^{-3}
Tc	–	–
Th	3×10^{-9}	3×10^{-9}
U	5×10^{-7}	5×10^{-7}
Zr	6×10^{-6}	6×10^{-6}

* Bei Anwendung dieser Löslichkeitslimiten werden die entsprechenden Sorptionswerte auf Null gesetzt (vgl. Fussnote in Tab. A3.2-3).

A3.2.2 HAA

Tab. A3.2-5 und A3.2-6 fassen die relevanten Modellparameter als Basis für die Berechnung der Nahfeldfreisetzung für den Fall der abgebrannten Brennelemente und der verglasten hochaktiven Abfälle zusammen.

In Tab. A3.2-7 sind die elementspezifischen Eigenschaften (Löslichkeitslimiten, effektive Diffusionskoeffizienten, Sorptionskonstanten und Porositätsfaktoren) und in Tab. A3.2-8 die zeitabhängigen Auflöseraten für die abgebrannten Brennelemente (UO_2-Matrix) zusammengestellt.

Tab. A3.2-5: Modellparameter für die Berechnung der (diffusiven) Radionuklidfreisetzung aus dem Nahfeld des HAA-Lagers im Fall der abgebrannten Brennelemente.

Aus Tab. A2.2.4 in Nagra (2002c).

Modellparameter	**Referenzwert**
Behälterlebensdauer	10'000 a
UO_2-Auflöserate	Gemäss Tab. A3.2-8
Länge des Brennelement-Behälters	4.6 m
Innerer Bentonitradius	0.525 m
Äusserer Bentonitradius	1.15 m
Porosität (Bentonit)	0.36
Dichte der Festphase (Bentonit)	2'760 kg/m^3
Effektive Diffusionskonstante (Bentonit)	Gemäss Tab. A3.2-7

Tab. A3.2-6: Modellparameter für die Berechnung der (diffusiven) Radionuklidfreisetzung aus dem Nahfeld des HAA-Lagers im Fall der verglasten hochaktiven Abfälle.

Aus Tab. A2.3 in Nagra (2002c).

Modellparameter	**Referenzwert**
Behälterlebensdauer	10'000 a
Glaskorrosionsrate	5.5×10^{-4} kg/(m^{2}a) (BNFL) 7.3×10^{-5} kg/(m^{2}a) (COGEMA)
Länge des Glaskörpers	1.03 m
Anfangsradius der äquivalenten Glaskugeln	0.0178 m (15-fach erhöhte Oberfläche)
Innerer Bentonitradius	0.47 m
Äusserer Bentonitradius	1.15 m
Porosität (Bentonit)	0.36
Dichte der Festphase (Bentonit)	2'760 kg/m^3
Effektive Diffusionskonstante (Bentonit)	Gemäss Tab. A3.2-7

Tab. A3.2-7: Elementspezifische Eigenschaften von Bentonit.
Aus Nagra (2008j).

Element	**Löslichkeitslimite** [Mol/L]	**Effektiver Diffusions-koeffizient** [m^2/a]	**Sorptions-konstante** [m^3/kg]	**Porositäts-faktor** [-]
Ac	1×10^{-6}	6.3×10^{-3}	4	1
Ag	3×10^{-6}	6.3×10^{-3}	0	1
Am	1×10^{-6}	6.3×10^{-3}	4	1
Be	1×10^{-6}	6.3×10^{-3}	0.2	1
C_{anorg}	3×10^{-3}	9.5×10^{-5}	6×10^{-5}	0.14
C_{org}	-	6.3×10^{-3}	0	1
Ca	1×10^{-2}	6.3×10^{-3}	3×10^{-3}	1
Cl	-	9.5×10^{-5}	0	0.14
Cm	1×10^{-6}	6.3×10^{-3}	4	1
Cs	-	6.3×10^{-3}	0.03	1
Ho	5×10^{-7}	6.3×10^{-3}	4	1
I	-	9.5×10^{-5}	5×10^{-4}	0.14
Mo	1×10^{-6}	9.5×10^{-5}	0	0.14
Nb	3×10^{-5}	6.3×10^{-3}	1	1
Ni	3×10^{-5}	6.3×10^{-3}	0.2	1
Np	5×10^{-9}	6.3×10^{-3}	60	1
Pa	1×10^{-5}	6.3×10^{-3}	5	1
Pb	2×10^{-6}	6.3×10^{-3}	7	1
Pd	5×10^{-8}	6.3×10^{-3}	5	1
Po	-	9.5×10^{-5}	6×10^{-2}	0.14
Pu	5×10^{-8}	6.3×10^{-3}	4	1
Ra	5×10^{-8}	6.3×10^{-3}	2×10^{-3}	1
Se	5×10^{-9}	9.5×10^{-5}	0	0.14
Sm	5×10^{-7}	6.3×10^{-3}	4	1
Sn	1×10^{-8}	6.3×10^{-3}	800	1
Sr	1×10^{-4}	6.3×10^{-3}	3×10^{-3}	1
Tc	4×10^{-9}	6.3×10^{-3}	0.2	1
Th	7×10^{-7}	6.3×10^{-3}	60	1
U	3×10^{-9}	6.3×10^{-3}	40	1
Zr	2×10^{-9}	6.3×10^{-3}	10	1

Tab. A3.2-8: Zeitabhängige fraktionale Auflöseraten für UO_2/MOX (Brennelement)-Matrizen.

Aus Tab. A2.2.2 in Nagra (2002c).

Zeit [a]	**Auflöserate** [a^{-1}]	
	Gewichteter Mittelwert für BE-Behälter Typ BE-2 (1 MOX und 3 UO_2 – DWR-BE); Abbrand: 48 GWd/t_{HM}	**Werte für BE-Behälter Typen BE-1 (SWR) und BE-3 (DWR); Abbrand: 48 GWd/t_{HM}**
1.0×10^4	7.9×10^{-7}	5.3×10^{-7}
1.5×10^4	6.1×10^{-7}	4.2×10^{-7}
2.0×10^4	4.7×10^{-7}	3.3×10^{-7}
3.0×10^4	2.8×10^{-7}	2.1×10^{-7}
5.1×10^4	1.4×10^{-7}	1.1×10^{-7}
6.4×10^4	9.8×10^{-8}	7.6×10^{-8}
8.1×10^4	7.3×10^{-8}	5.6×10^{-8}
1.1×10^5	5.4×10^{-8}	4.0×10^{-8}
1.5×10^5	4.2×10^{-8}	3.0×10^{-8}
2.1×10^5	3.7×10^{-8}	2.7×10^{-8}
3.1×10^5	3.4×10^{-8}	2.5×10^{-8}
5.2×10^5	2.9×10^{-8}	2.2×10^{-8}
8.2×10^5	2.4×10^{-8}	1.8×10^{-8}
1.0×10^6	2.1×10^{-8}	1.6×10^{-8}
1.6×10^6	1.8×10^{-8}	1.3×10^{-8}
2.1×10^6	1.6×10^{-8}	1.2×10^{-8}
3.1×10^6	1.3×10^{-8}	1.1×10^{-8}
4.9×10^6	1.1×10^{-8}	1.0×10^{-8}
7.0×10^6	1.1×10^{-8}	1.0×10^{-8}
1.0×10^7	1.0×10^{-8}	1.0×10^{-8}
2.0×10^7	1.0×10^{-8}	1.0×10^{-8}
1.0×10^8	1.0×10^{-8}	1.0×10^{-8}

A3.3 Geosphärendaten

Tab. A3.3-1: VPAC Modellparameter für die Geosphäre.

Annahmen für die orientierenden sicherheitstechnischen Rechnungen im vorliegenden Projekt.

	Hydraulische Durchlässigkeit [m/s]	**Dispersions-länge longitudinal/ transversal** [m]	**Porosität** [-]	**Effektiver Diffusions-koeffizient** [m^2/s]	**Dichte der Festphase** [kg/m^3]
Wirtgestein	variabel	2/0.2	0.06	5×10^{-12}	2'660
Kluft/ Störungszone (Kluftkanal)	variabel	2/0.2	1.0	1×10^{-9}	0

Tab. A3.3-2: Sorptionskonstanten für das Wirtgestein.

Aus Bradbury et al. (2008).

Element	**Datenbank: Tonstein Referenzwerte** [m^3/kg]	**Datenbank: Calcit** [m^3/kg]
Ac	10	1
Ag	0	0
Am	10	1
Be	9×10^{-1}	5×10^{-4}
C_{anorg}	1×10^{-3}	1×10^{-3}
C_{org}	0	0
Ca	1×10^{-3}	5×10^{-5}
Cl	0	0
Cm	10	1
Co	4×10^{-1}	2×10^{-3}
Cs	6×10^{-1}	0
Eu	50	1
I	0	0
K	4×10^{-3}	0
Mo	1×10^{-2}	0
Nb	4	5×10^{-3}
Ni	9×10^{-1}	5×10^{-4}
Np	50	1×10^{-1}
Pa	5	4×10^{-2}
Pb	2	1×10^{-1}
Pd	5	1×10^{-1}

Tab. A3.3-2: (Fortsetzung)

Element	**Datenbank: Tonstein Referenzwerte** [m^3/kg]	**Datenbank: Calcit** [m^3/kg]
Po	1×10^{-1}	0
Pu	10	1
Ra	7×10^{-4}	5×10^{-5}
Se	0	0
Sn	100	1×10^{-2}
Sr	1×10^{-3}	5×10^{-5}
Tc	10	5×10^{-3}
Th	50	7×10^{-1}
U	20	2×10^{-1}
Zr	10	1×10^{-2}

Tab. A3.3-3: Konfigurationsdaten für homogen-poröses WG/EG.

Annahmen für die orientierenden sicherheitstechnischen Rechnungen im vorliegenden Projekt.

Grösse	**Einheit**	**Bandbreite**		**Wert**	**Bemerkung**
		Min	Max		
Gradient i (Betrag)	m/m	0.1	1		
Gradient i (Richtung)	–	Horizontal / schräg / vertikal		vertikal	[1)]
Hydraulische Durchlässigkeit der Matrix k_M	m/s	10^{-13}	10^{-7}		breiter Parameterbereich; soll erwartete Werte für potenzielle Wirtgesteine einschliessen
Peclet-Zahl Pe	–			10	Annahme
Transportpfadlänge l	m	1	100		

[1)] Modellrechnungen für die SMA- bzw. LMA-Lagerkammern zum Einfluss der Anströmrichtung auf die Radionuklidfreisetzung haben gezeigt, dass jene nur einen vernachlässigbar geringen Einfluss auf das Dosismaximum hat (Nagra 2008g). Im vorliegenden Bericht wurde generell die Situation einer vertikalen Strömung betrachtet.

Tab. A3.3-4: Konfigurationsdaten für geklüftetes WG/EG.

Annahmen für die orientierenden sicherheitstechnischen Rechnungen im vorliegenden Projekt.

Grösse	**Einheit**	**Bandbreite**		**Wert**	**Bemerkung**
		Min	**Max**		
Gradient i (Betrag)	m/m	0.1	1		
Gradient i (Richtung)	–	Horizontal / schräg / vertikal		vertikal	[1)]
Grossräumige hydraulische Durchlässigkeit k des Wirtgesteins	m/s	10^{-13}	10^{-7}		breiter Parameterbereich; soll erwartete Werte für potenzielle Wirtgesteine einschliessen
Kluftabstand d_{Kluft}	m			1	s. Kap. 2.5.4.1 Konzeptualisierung
Transmissivität der Kluft T_{Kluft}	m^2/s	10^{-13}	10^{-7}		$T_{Kluft} = k \times d_{Kluft}$
Kluftöffnungsweite	m			0.001	
Peclet-Zahl Pe	–			10	
Transportpfadlänge l	m	10	100		

[1)] Modellrechnungen zum Einfluss der Anströmrichtung auf die Radionuklidfreisetzung haben gezeigt, dass jene nur einen vernachlässigbar geringen Einfluss auf das Dosismaximum hat (Nagra 2008g). Im vorliegenden Bericht wurde generell die Situation einer vertikalen Strömung betrachtet.

Tab. A3.3-5: Konfigurationsdaten für steilstehende Störungszonen im Wirtgestein bzw. einschlusswirksamen Gebirgsbereich.

Annahmen für die orientierenden sicherheitstechnischen Rechnungen im vorliegenden Projekt.

Grösse	**Einheit**	**Bandbreite**		**Wert**	**Bemerkung**
		Min	**Max**		
Gradient i (Betrag)	m/m	0.1	1		
Gradient i (Richtung)	-	Horizontal / schräg / vertikal		vertikal	[1]
Hydraulische Durchlässigkeit Matrix, k	m/s	10^{-10}	10^{-9}		[2]
Abstand der Störungszonen $d_{St.-Z.}$	m	30	100		
Transmissivität der Störungszonen $T_{St.-Z.}$	m^2/s	10^{-10}	10^{-6}		
Fliessporosität der Störungszone $\varepsilon_{F,St.-Z}$ - Fliesskanal	–			1.0	entsprechend offene Kluft
Porosität des Füllmaterials $\varepsilon_{V,St.-Z.}$	–			0.06	entsprechend Matrix
Effektive Diffusionskonstante – Fliesskanal, $D_{e,F,St.-Z.}$	m^2/s			10^{-9}	entsprechend offene Kluft
Effektive Diffusionskonstante – Füllmaterial, $D_{e,V,St.-Z.}$	m^2/s			5×10^{-12}	entsprechend Matrix
Eindringtiefe Matrixdiffusion	m			0.5	
Peclet-Zahl Pe	–			10	
Transportpfadlänge l	m	20	50		

[1] Modellrechnungen zum Einfluss der Anströmrichtung auf die Radionuklidfreisetzung haben gezeigt, dass jene nur einen vernachlässigbar geringen Einfluss auf das Dosismaximum hat (Nagra 2008g). Im vorliegenden Bericht wurde generell die Situation einer vertikalen Strömung betrachtet.

[2] Da der Schwerpunkt auf der Abschätzung des Einflusses der Störungszonen liegen soll, und um die Zahl der Rechenfälle zu beschränken, werden nur zwei Wirtgesteinsdurchlässigkeiten betrachtet.

A3.4 Biosphärendaten

Tab. A3.4-1: Biosphären-Transfer-Koeffizienten (BTK) für den Referenzfall (A-I).

Der BTK für ein bestimmtes Radionuklid wird mit dem Biosphären-Code TAME (Nagra 2002d) wie folgt berechnet: Für jedes Radionuklid wird ein konstanter Radionuklidfluss von 1 Bq/a als Eingangsfunktion vorgegeben. Der Code berechnet damit eine zeitlich variable Ausgangsfunktion (die Jahresdosis), die einem konstanten Wert zustrebt ("*steady state"* Wert). Der BTK ist das Verhältnis der entsprechenden *steady-state* Jahresdosis [Sv/a] zum Eingangswert von 1 Bq/a. Aus Nagra (2008e).

Nuklid	**Biosphären-Transfer-Koeffizient** [Sv/Bq]	**Nuklid**	**Biosphären-Transfer-Koeffizient** [Sv/Bq]
^{10}Be	4.88×10^{-16}	^{226}Ra	3.63×10^{-13}
^{14}C	9.22×10^{-16}	^{227}Ac	1.49×10^{-15}
^{36}Cl	1.07×10^{-14}	^{228}Ra	8.22×10^{-15}
^{40}K	1.16×10^{-14}	^{228}Th	4.79×10^{-18}
^{41}Ca	4.33×10^{-16}	^{229}Th	1.17×10^{-13}
^{59}Ni	1.62×10^{-16}	^{230}Th	3.94×10^{-12}
^{60}Co	3.56×10^{-17}	^{231}Pa	1.73×10^{-11}
^{63}Ni	6.18×10^{-18}	^{232}Th	2.85×10^{-11}
^{79}Se	1.01×10^{-13}	^{232}U	1.31×10^{-14}
^{90}Sr	4.01×10^{-15}	^{233}U	5.66×10^{-14}
^{93}Mo	3.74×10^{-15}	^{234}U	9.32×10^{-14}
^{93m}Nb	1.42×10^{-18}	^{235}U	9.80×10^{-13}
^{93}Zr	9.42×10^{-15}	^{236}U	2.72×10^{-14}
^{94}Nb	2.09×10^{-13}	^{237}Np	3.88×10^{-14}
^{99}Tc	6.75×10^{-14}	^{238}Pu	2.94×10^{-16}
^{107}Pd	9.96×10^{-17}	^{238}U	2.99×10^{-14}
^{108m}Ag	1.22×10^{-14}	^{239}Pu	5.23×10^{-14}
^{121m}Sn	1.93×10^{-17}	^{240}Pu	2.13×10^{-14}
^{126}Sn	5.34×10^{-13}	^{241}Am	1.19×10^{-15}
^{129}I	2.95×10^{-13}	^{241}Pu	4.02×10^{-17}
^{135}Cs	3.64×10^{-14}	^{242m}Am	4.85×10^{-16}
^{137}Cs	1.99×10^{-16}	^{242}Pu	9.04×10^{-14}
^{151}Sm	7.16×10^{-19}	^{243}Am	5.21×10^{-14}
^{154}Eu	4.66×10^{-18}	^{243}Cm	1.37×10^{-16}
^{166m}Ho	1.92×10^{-14}	^{244}Cm	9.38×10^{-17}
^{210}Pb	4.16×10^{-15}	^{245}Cm	5.96×10^{-14}
^{210}Po	9.13×10^{-18}	^{246}Cm	1.77×10^{-14}

Anhang 4 Dosisdominierende Abfallsorten: Methodik, Rechentool, Resultate

A4.1 Einleitung

Im vorliegenden Anhang werden die Methodik der Bestimmung der dosisdominierenden Abfallsorten, das entsprechende Rechentool und die Resultate vorgestellt. Ausgehend vom Inventar bestehend aus allen Abfallsorten[127] der KEV-Abfallkategorien ATA und SMA werden diejenigen Abfallsorten identifiziert, für welche im Falle einer Freisetzung der Radionuklide über den Grundwasserpfad und im Falle einer erosiven Freilegung des Lagers die höchsten Dosisbeiträge resultieren. Dabei werden für ein breites Spektrum von generischen Wirtgesteinstypen und -situationen (Wirtgesteinstyp, Wasserführung des Wirtgesteins, ohne/mit Transport in Störungszonen, erosive Freilegung des Lagers nach langen Zeiten) Dosisberechnungen durchgeführt. Zu diesem Zweck wurde eine interaktive Berechnungs- und Bewertungsapplikation erstellt. Die Applikation erlaubt, die spezifischen Beiträge einzelner Abfallsorten zur Summendosis beliebiger Untergruppen der betrachteten Abfallsorten zu berechnen, z.B. sortiert nach abnehmenden Dosisbeiträgen[128].

A4.2 Überblick

Die Analyse des Gesamtinventars bzgl. der dosisdominierenden Abfallsorten umfasst die folgenden Schritte:

1. Definition des betrachteten Abfallinventars (SMA und ATA gemäss Definition KEV, s. Kap. 2.5.2)
2. Definition des Nahfelds (s. Kap. 2.5.3)
3. Definition von generischen Wirtgesteinssituationen (s. Kap. 2.5.4)
4. Definition der Biosphäre (s. Kap. 2.5.5)
5. Umsetzung in einem Rechentool
6. Durchführung von Typkurven-Berechnungen für alle generischen Wirtgesteinssituationen
7. Einbau der Typkurven in die interaktive Berechnungs- und Bewertungsapplikation
8. Auswertung

Im nächsten Kapitel werden die Schritte 5 bis 8 detailliert erläutert.

A4.3 Methodik zur Berechnung der dosisdominierenden Abfallsorten und Umsetzung in einem Rechentool

Basierend auf der Konzeptualisierung des Nahfelds, der Geosphäre und der Biosphäre und deren Parametrisierung werden Modellrechnungen zur Radionuklidausbreitung durchgeführt. Für die vorliegenden Analysen wurden dazu für das Nahfeld VPAC (Nagra 2008f), für die Geosphäre PICNIC (Nagra 2002d) und für die Biosphäre sog. Biosphären-Transfer-Koeffizienten (vgl. Kap. 2.5.5) verwendet; grundsätzlich ist die Methodik aber nicht an spezifische Rechentools gebunden.

---

[127] Insgesamt gibt es 21 ATA- und 126 SMA-Abfallsorten, wobei diejenigen Sorten, die in einen ATA- und einen SMA-Anteil aufgeteilt sind, als zwei separate Sorten gezählt werden.

[128] Für diese Methodik und die entsprechende Applikation wird teilweise auch das Kürzel "DDAS" ("dosisdominierende Abfallsorten") verwendet.

VPAC berechnet auf der Basis von gemischt-hybriden finiten Elementen (FE) die Grundwasserströmung und den Radionuklidtransport in vollständig gesättigten, heterogenen geologischen Medien. VPAC wurde als Instrument für Grundwasserfluss- und Transportberechnungen sowohl im Nahfeld (Lagerkavernen) als auch in der Geosphäre entwickelt.

Das Programmpaket PICNIC berechnet den Radionuklidtransport ausschliesslich in der Geosphäre. PICNIC stellt die zu betrachtende Geosphärenkonfiguration mittels eines Netzwerks aus 1D-Segmenten dar, die beispielsweise eine ungestörte, homogen-poröse Gesteinsmatrix oder einen diskreten Kluftkanal abbilden. PICNIC bietet die Möglichkeit, die Auswirkungen einer Kanalisierung des Transports innerhalb von Klüften oder Störungszonen – entsprechend einem reduzierten Transportquerschnitt in diesen Strukturen – in einfacher Weise angenähert abzubilden ("Channeling").

Die Ausbreitungsrechnungen für das Nahfeld erfolgen mit VPAC, der Transport in der Geosphäre wird mit PICNIC ermittelt. Eine Ausnahme stellt der Fall eines homogen-porösen Wirtgesteins ohne Klüftung dar; in diesem Fall wird mit VPAC auch die Ausbreitung in der Geosphäre berechnet. Ansonsten definiert die mit VPAC berechnete Radionuklidfreisetzung aus dem Nahfeld den Quellterm für die Geosphärenrechnungen mit PICNIC.

A4.3.1 Modellgeometrie

Im Sinne einer generischen Auslegung des SMA-Lagers werden Lagerkavernen des Typs K09 mit einer Länge von jeweils 195 m und einem horizontalen Abstand von 85 m betrachtet (Nagra 2005b). Als Mächtigkeit des betrachteten Gesteinsblocks werden 300 m angenommen (150 m unterhalb und 150 m oberhalb der Kavernen-Mittelebenen). Die Kavernen werden vertikal angeströmt[129]. Die verwendete Modellgeometrie (FE-Netz) für den Fall eines homogen-porösen Wirtgesteins ist in Fig. A4.3-1 dargestellt. Aus Symmetriegründen wird nur eine Hälfte einer Kaverne und das angrenzende Wirtgestein bis zur Spiegelebene zwischen zwei Kavernen modelliert. Entlang der Hauptachse der Kaverne, d.h. in z-Richtung, wird eine (willkürliche) Ausdehnung von einem Meter angenommen.

[129] Der Einfluss der modellierten Anströmrichtung der Kavernen auf die resultierende Radionuklidfreisetzung ist untersucht worden. Es konnte gezeigt werden, dass die Freisetzungsraten für die wichtigsten Radionuklide und ein breites Spektrum von hydrogeologischen Situationen nur wenig von der Anströmrichtung abhängen (Nagra 2008g). Da das FE-Modell für den Fall eines vertikalen Grundwasserflusses aufgrund der Ausnutzung von Symmetrieeigenschaften deutlich kleiner als z.B. für den Fall einer horizontalen Grundwasserströmung ist, wurde für die sicherheitstechnischen Rechnungen im vorliegenden Bericht generell die Situation einer vertikalen Strömung betrachtet.

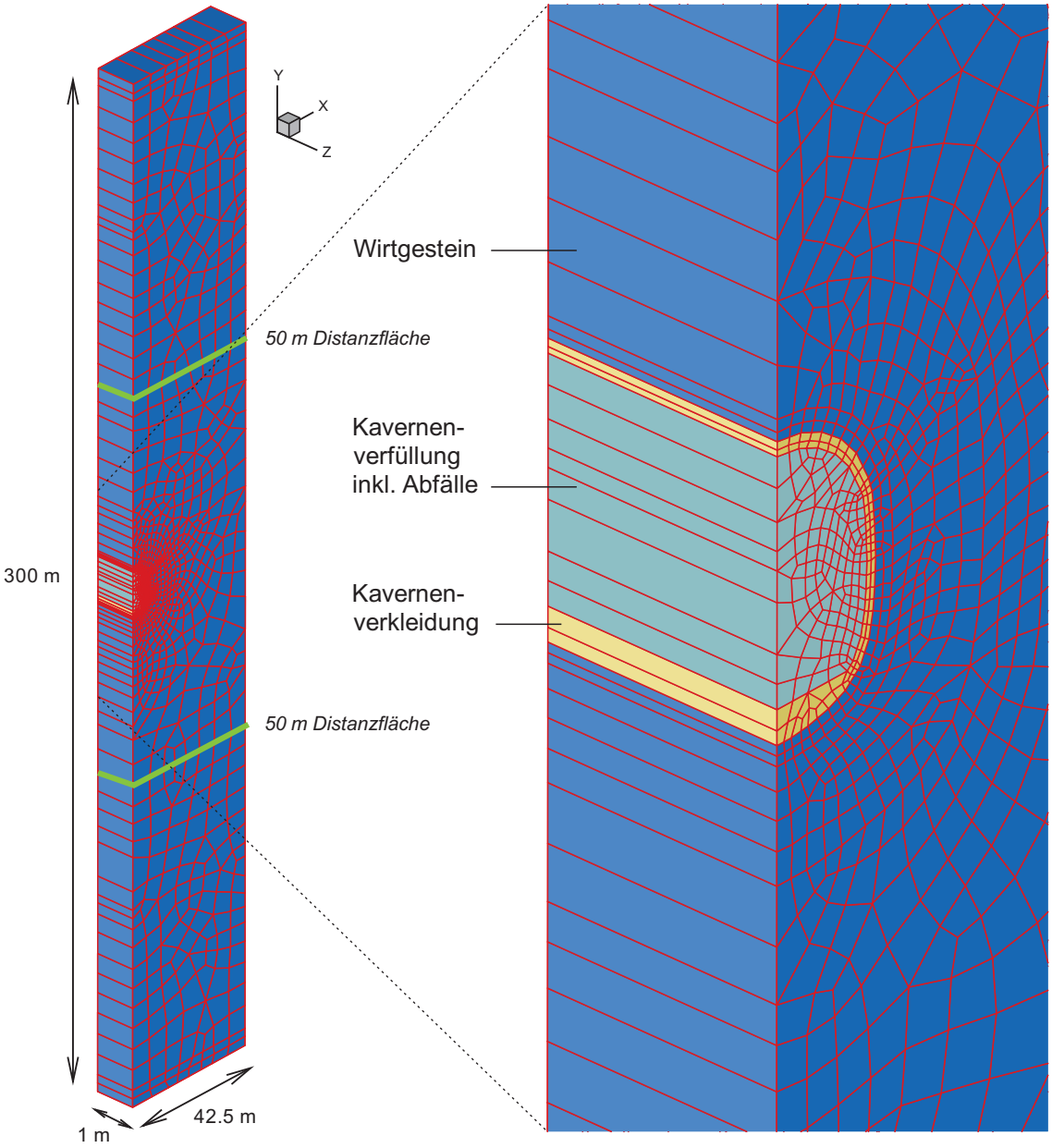


Fig. A4.3-1: Modellgeometrie für VPAC-Rechnungen (homogen-poröses Wirtgestein ohne Klüftung).

Fig. A4.3-2 zeigt das entsprechende FE-Netz für den Fall, in dem zusätzlich zwei Störungszonen berücksichtigt werden. Aus Symmetriegründen wird wiederum nur eine Hälfte der Kaverne und das angrenzende Wirtgestein bis zur Spiegelebene zwischen zwei Kavernen modelliert. In z-Richtung, also entlang der Hauptachse der Kaverne, wird aus Symmetriegründen ebenfalls nur die halbe Breite einer Störungszone sowie die halbe Distanz zwischen den beiden Störungszonen betrachtet.

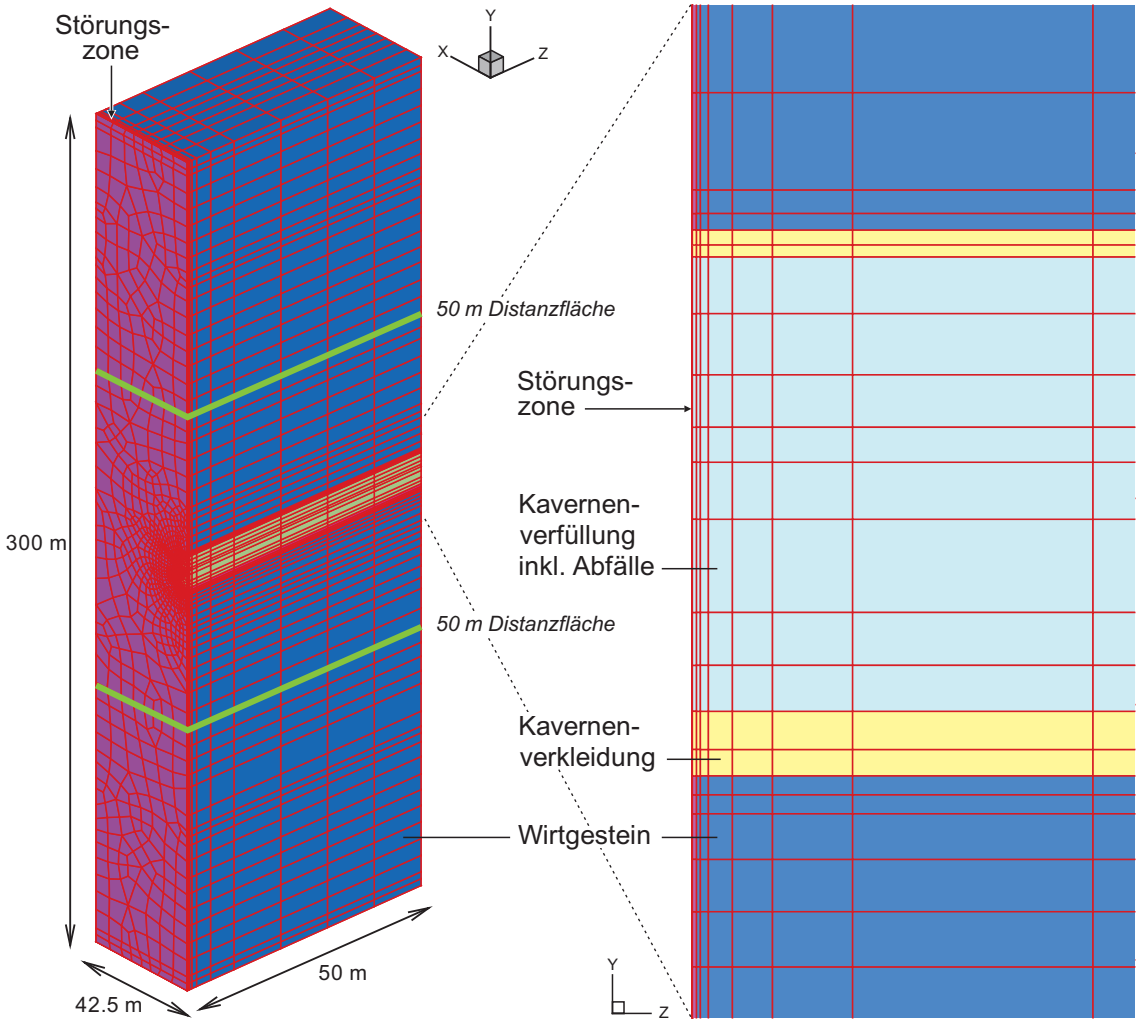


Fig. A4.3-2: Modellgeometrie für VPAC-Rechnungen (homogen-poröses Wirtgestein mit vertikalen Störungszonen).

A4.3.2 Abbildung des Nahfelds

In der Modellierung des Nahfelds mit VPAC wird das Innere der abgebildeten Kaverne als homogene Verfüllung bestehend aus den Abfallgebinden, den Endlagerbehältern sowie dem als Verfüllmaterial dienenden Zementmörtel zusammengefasst (Materialklasse "Verfüllmaterial"). Die Kavernenverkleidung weist die gleichen Materialeigenschaften auf, mit der Ausnahme, dass dieser Modellbereich kein initiales Radionuklidinventar enthält (Materialklasse "Kavernenverkleidung").

Die Retardation der Radionuklide infolge Sorption hängt im Nahfeld vom Zementgehalt bzw. dem Anteil an Calcit ab. Diese Anteile ändern sich mit der Zeit unter dem Einfluss des Lösungsaustauschs im Porenraum des Nahfelds. In der Modellierung ergibt sich damit ein zeitlich variables Sorptionsverhalten. In der Anwendung von VPAC wird dieses variable Sorptionsverhalten über sich zeitlich ändernde K_d-Werte umgesetzt. In einer ersten Phase entsprechen die Sorptionswerte jenen für nicht-degradierten Zement (generell "gute" Sorption). Es folgt eine zweite Phase mit einer linearen Abnahme (Zunahme) des Zementanteils (Calcitanteils) und entsprechend linearer Änderung der K_d-Werte. In einer dritten Phase entsprechen die Sorptionswerte jenen für degradierten Zement (generell geringere Sorption). Die zeitliche Abfolge und Dauer

der einzelnen Degradationsphasen ist vom Lösungsaustausch im Porenvolumen der Kaverne und dieser vom Wasserfluss durch die Kaverne abhängig (Nagra 2008j)

Löslichkeitslimiten werden im Nahfeld nicht unterstellt (konservative Vereinfachung).

Das ^{14}C-Inventar in den Abfällen wird abfallspezifisch in die drei Fraktionen "anorganisch", "organisch mit instantaner Freisetzung" und "organisch mit kongruenter Freisetzung" eingeteilt. Für die kongruente Freisetzung wird angenommen, dass sie im Gleichschritt mit der Korrosion der Abfallmatrix (z.B. aktivierter Stahl) erfolgt. Basierend auf pessimistischen Annahmen bzgl. Korrosionsrate und Geometrie der korrodierenden Stahlteile wird vereinfachend eine konstante fraktionale Freisetzungsrate von 10^{-4} pro Jahr angenommen (Nagra 2008j).

A4.3.3 Abbildung der Geosphäre

Die mit VPAC berechneten Radionuklidfreisetzungsraten aus dem Nahfeld werden als Quellterm für die Modellierung des Radionuklidtransports in der Geosphäre mittels PICNIC benutzt. Ungeklüftete Wirtgesteine werden als homogen-poröses Medium (HPM) in einem eindimensionalen PICNIC-Segment abgebildet. Im Falle eines kleinräumig geklüfteten Wirtgesteins wird die Radionuklidfreisetzung aus dem Nahfeld in ein eindimensionales PICNIC-Segment (Kluftöffnungsbreite 1 mm) eingespeist. Im Falle von steil stehenden Störungszonen werden die mit VPAC berechneten Nahfeldfreisetzungen aus der Störungszone und der Gesteinsmatrix in zwei separate PICNIC-Segmente (Gesteinsmatrix und Störungszone) eingespeist. Das Matrix-Segment kann hierbei entweder ein homogen-poröses Medium ohne Klüftung sein, oder die Situation einer kleinräumigen Klüftung abbilden (s. oben).

Die betrachtete Transportdistanz in der Geosphäre beträgt einheitlich 50 m bei einem vertikalen hydraulischen Gradienten von 0.1 m/m und einem entsprechenden Grundwasserfluss.

Für die Sorption der Radionuklide in der Geosphäre stehen abhängig von der zu betrachtenden Gesteinsmineralogie verschiedene Datensätze zur Verfügung (Anhang 3).

Löslichkeitslimiten werden in der Geosphäre nicht unterstellt.

A4.3.4 Abbildung der Biosphäre

Für die Umrechnung von Radionuklid-Freisetzungsraten aus der Geosphäre in Dosisraten werden die Referenzfall-Biosphären-Transfer-Koeffizienten verwendet (s. Kap. 2.5.5 sowie Tab. A3.4-1).

A4.4 Durchführung von Typkurven-Berechnungen für generische Wirtgesteinssituationen

Mit der Festlegung der zu betrachtenden Bandbreite der Modellparameter und der hydrogeologischen Szenarien resultiert eine Anzahl von Rechenfällen, die durchzuführen und auszuwerten sind. Die Berechnungen zur Radionuklidausbreitung werden vorerst mit einem Einheitsinventar (1 mol) durchgeführt. Als Resultat ergibt sich eine normierte Freisetzungsrate aus der Geosphäre [1/a] für jedes der betrachteten Radionuklide ("Typkurven").

Für die sicherheitstechnischen Betrachtungen im vorliegenden Bericht werden in den Freisetzungs- bzw. Dosisberechnungen im Allgemeinen alle Radionuklide berücksichtigt, welche unabhängig vom Zeitpunkt einen möglicherweise signifikanten Beitrag zur Gesamtdosis liefern können ("sicherheitsrelevante Radionuklide", s. Anhang 3).

Die orientierenden Sicherheitsbetrachtungen (Anhang 5) und die bisherigen Erfahrungen (Kap. 2.4) zeigen, dass sowohl das Maximum der Summendosis aller Abfallsorten als auch der einzelnen Beiträge der verschiedenen Abfallsorten durch wenige, insbesondere nicht- oder wenig sorbierende Einzelnuklide dominiert wird. Die folgende Auswahl von Einzelnukliden ist deshalb für die Berechnung der dosisdominierenden Abfallsorten ausreichend: C-14, Cl-36, K-40, Co-60, Ni-59, Ni-63, Sr-90, Mo-93, Nb-94, Se-79, Ag-108m, I-129, Ra-226 (als Einzelnuklid). Berechnungen mit dem vollen Nuklidvektor sind möglich, aufgrund des erhöhten Zeitaufwandes für Berechnung und Auswertung bei fehlendem Informationsgewinn aber nicht sinnvoll.

Die Modellrechnungen zur Radionuklidausbreitung für das Einheitsinventar und mit reduziertem Nuklidvektor liefern als Ergebnis für jedes betrachtete Nuklid normierte Freisetzungskurven aus der Geosphäre, die nachfolgend weiter ausgewertet werden.

A4.5 Auswertung der Typkurven in einer interaktive Berechnungs- und Bewertungsapplikation

Um die Ergebnisse der Typkurven-Berechnungen für die Bewertung der Dosisbeiträge der einzelnen Abfallsorten des betrachteten Inventars nutzen zu können, werden die Typkurven in einer interaktiven Berechnungs- und Bewertungsapplikation (Tabellenkalkulation) weiter ausgewertet.

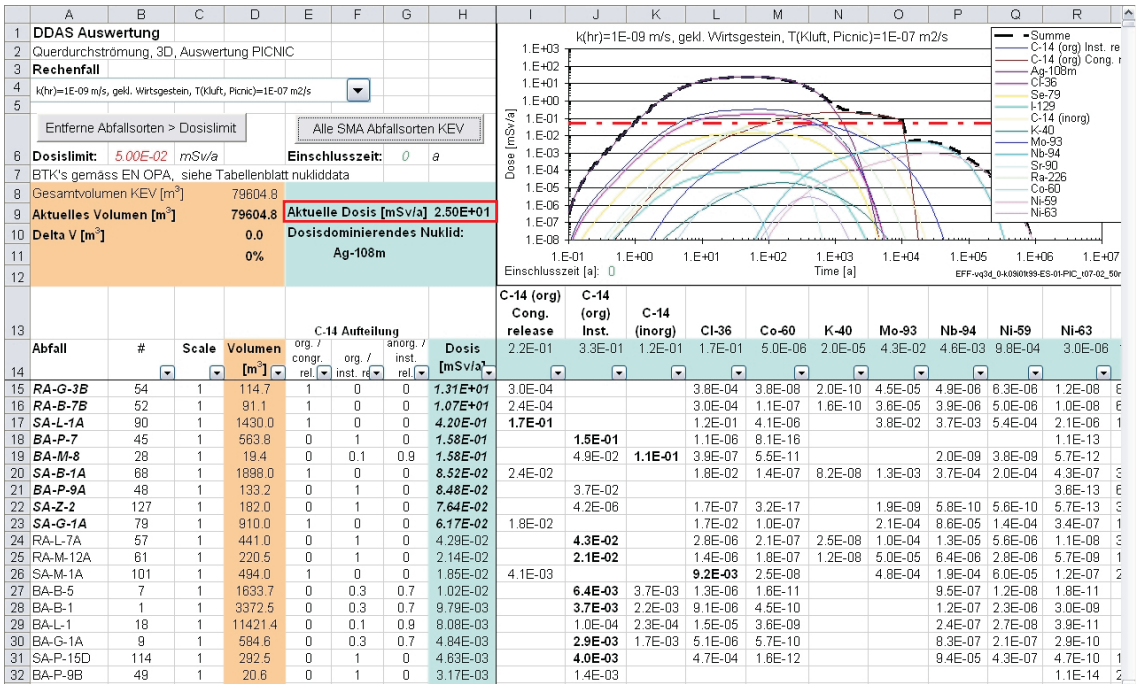
A4.5.1 Berechnung der Summendosis für das Gesamtinventar

In einem ersten Schritt werden zunächst rechenfallspezifisch, d.h. spezifisch für jede betrachtete hydrogeologische Situation, und abfallsortenspezifisch aus den normierten Freisetzungsraten Dosisbeiträge sowie die Summendosis für das betrachtete Gesamtinventar ermittelt. Dazu werden die normierten Freisetzungsraten [1/a] mit dem abfallsortenspezifischen Inventar [Bq] und den entsprechenden Referenzfall-Biosphären-Transfer-Koeffizienten [mSv/Bq] der Nuklide multipliziert, was somit zu nuklid- und abfallsortenspezifischen Dosisbeiträgen [mSv/a] führt. Die Summation über alle Nuklide und Abfallsorten des betrachteten Gesamtinventars ergibt für jede betrachtete hydrogeologische Situation die Gesamtsummendosis. Fig. A4.5-1 illustriert das Vorgehen anhand eines beispielhaften Rechenfalles.

A4.5.2 Auswahlmöglichkeiten

Ausgehend von der Summendosis für das Gesamtinventar können unter der Vorgabe, dass ein zu definierender Dosisgrenzwert nicht überschritten wird, diejenigen Abfallsorten mit dem jeweils grössten Beitrag zur Gesamtsummendosis sukzessive entfernt werden, bis der Dosis-Grenzwert eingehalten wird (beispielhaft dargestellt in Fig. A4.5-2).

Weiter bietet die Auswertungsapplikation die Möglichkeit, bei der Dosisberechnung eine Einschlusszeit der Abfälle mit einzubeziehen. In diesem Fall ist das freigesetzte Inventar um den während der Einschlusszeit zerfallenen Anteil reduziert.

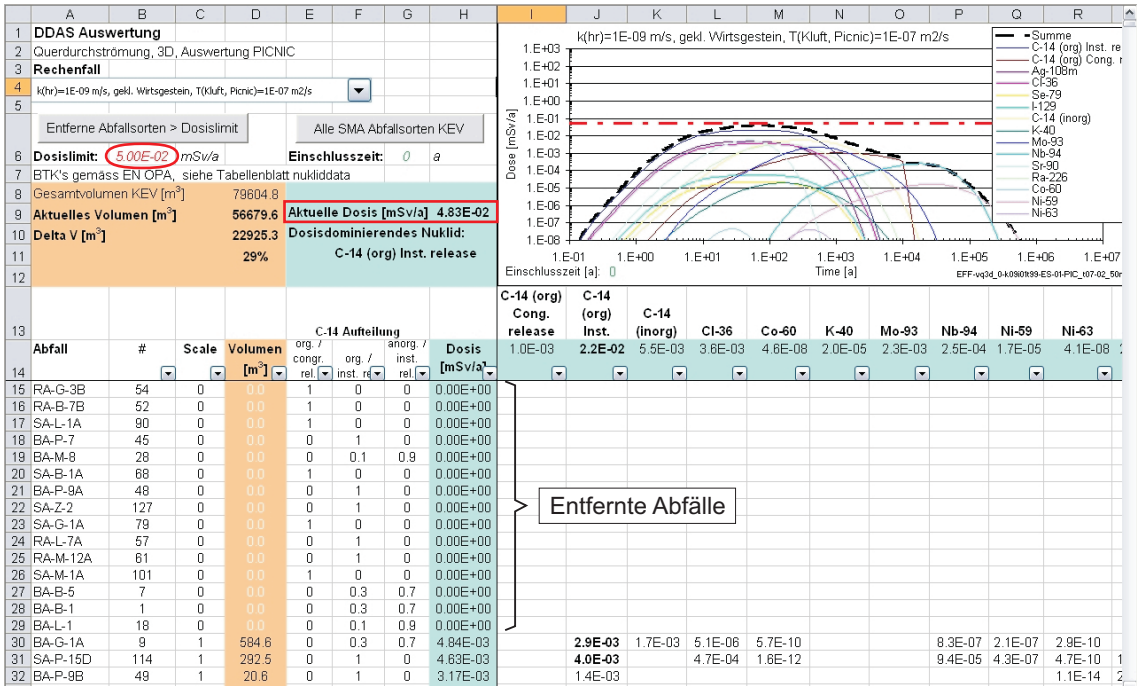


DDAS Auswertung
Querdurchströmung, 3D, Auswertung PICNIC
Rechenfall
k(hr)=1E-09 m/s, gekl. Wirtsgestein, T(Kluft, Picnic)=1E-07 m2/s
Entferne Abfallsorten > Dosislimit | Alle SMA Abfallsorten KEV
Dosislimit: 5.00E-02 mSv/a | Einschlusszeit: 0 a
BTK's gemäss EN OPA, siehe Tabellenblatt nukliddata
Gesamtvolumen KEV [m³] 79604.8
Aktuelles Volumen [m³] 79604.8 | Aktuelle Dosis [mSv/a] 2.50E+01
Delta V [m³] 0.0 | Dosisdominierendes Nuklid:
0% Ag-108m

C-14 Aufteilung

Abfall	#	Scale	Volumen [m³]	org. / congr. rel.	org. / inst. rel.	anorg. / inst. rel.	Dosis [mSv/a]	C-14 (org) Cong. release	C-14 (org) Inst.	C-14 (inorg)	Cl-36	Co-60	K-40	Mo-93	Nb-94	Ni-59	Ni-63
								2.2E-01	3.3E-01	1.2E-01	1.7E-01	5.0E-06	2.0E-05	4.3E-02	4.6E-03	9.8E-04	3.0E-06
RA-G-3B	54	1	114.7	1	0	0	1.31E+01	3.0E-04			3.8E-04	3.8E-08	2.0E-10	4.5E-05	4.9E-06	6.3E-06	1.2E-08
RA-B-7B	52	1	91.1	1	0	0	1.07E+01	2.4E-04			3.0E-04	1.1E-07	1.6E-10	3.6E-05	3.9E-06	5.0E-06	1.0E-08
SA-L-1A	90	1	1430.0	1	0	0	4.20E-01	1.7E-01			1.2E-01	4.1E-06		3.8E-02	3.7E-03	5.4E-04	2.1E-06
BA-P-7	45	1	563.8	0	1	0	1.58E-01		1.5E-01		1.1E-06	8.1E-16					1.1E-13
BA-M-8	28	1	19.4	0	0.1	0.9	1.58E-01		4.9E-02	1.1E-01	3.9E-07	5.5E-11			2.0E-09	3.8E-09	5.7E-12
SA-B-1A	68	1	1898.0	1	0	0	8.52E-02	2.4E-02			1.8E-02	1.4E-07	8.2E-08	1.3E-03	3.7E-04	2.0E-04	4.3E-07
BA-P-9A	48	1	133.2	0	1	0	8.48E-02		3.7E-02								3.6E-13
SA-Z-2	127	1	182.0	0	1	0	7.64E-02		4.2E-06		1.7E-07	3.2E-17		1.9E-09	5.8E-10	5.6E-10	5.7E-13
SA-G-1A	79	1	910.0	1	0	0	6.17E-02	1.8E-02			1.7E-02	1.0E-07		2.1E-04	8.6E-05	1.4E-04	3.4E-07
RA-L-7A	57	1	441.0	0	1	0	4.29E-02		4.3E-02		2.8E-06	2.1E-07	2.5E-08	1.0E-04	1.3E-05	5.6E-06	1.1E-08
RA-M-12A	61	1	220.5	0	1	0	2.14E-02		2.1E-02		1.4E-06	1.8E-07	1.2E-08	5.0E-05	6.4E-06	2.8E-06	5.7E-09
SA-M-1A	101	1	494.0	1	0	0	1.85E-02	4.1E-03			9.2E-03	2.5E-08		4.8E-04	1.9E-04	6.0E-05	1.2E-07
BA-B-5	7	1	1633.7	0	0.3	0.7	1.02E-02		6.4E-03	3.7E-03	1.3E-06	1.6E-11			9.5E-07	1.2E-08	1.8E-11
BA-B-1	1	1	3372.5	0	0.3	0.7	9.79E-03		3.7E-03	2.2E-03	9.1E-06	4.5E-10			1.2E-07	2.3E-06	3.0E-09
BA-L-1	18	1	11421.4	0	0.1	0.9	8.08E-03		1.0E-04	2.3E-04	1.5E-05	3.6E-09			2.4E-07	2.7E-08	3.9E-11
BA-G-1A	9	1	584.6	0	0.3	0.7	4.84E-03		2.9E-03	1.7E-03	5.1E-06	5.7E-10			8.3E-07	2.1E-07	2.9E-10
SA-P-15D	114	1	292.5	0	1	0	4.63E-03		4.0E-03		4.7E-04	1.6E-12			9.4E-05	4.3E-07	4.7E-10
BA-P-9B	49	1	20.6	0	1	0	3.17E-03		1.4E-03								1.1E-14

Fig. A4.5-1: Auswertung der dosisdominierenden Abfallsorten: Beispiel einer Berechnung der abfallsorten- und rechenfallspezifischen Dosisbeiträge.



DDAS Auswertung
Querdurchströmung, 3D, Auswertung PICNIC
Rechenfall
k(hr)=1E-09 m/s, gekl. Wirtsgestein, T(Kluft, Picnic)=1E-07 m2/s
Entferne Abfallsorten > Dosislimit | Alle SMA Abfallsorten KEV
Dosislimit: 5.00E-02 mSv/a | Einschlusszeit: 0 a
BTK's gemäss EN OPA, siehe Tabellenblatt nukliddata
Gesamtvolumen KEV [m³] 79604.8
Aktuelles Volumen [m³] 56679.6 | Aktuelle Dosis [mSv/a] 4.83E-02
Delta V [m³] 22925.3 | Dosisdominierendes Nuklid:
29% C-14 (org) Inst. release

C-14 Aufteilung

Abfall	#	Scale	Volumen [m³]	org. / congr. rel.	org. / inst. rel.	anorg. / inst. rel.	Dosis [mSv/a]	C-14 (org) Cong. release	C-14 (org) Inst.	C-14 (inorg)	Cl-36	Co-60	K-40	Mo-93	Nb-94	Ni-59	Ni-63
								1.0E-03	2.2E-02	5.5E-03	3.6E-03	4.6E-08	2.0E-05	2.3E-03	2.5E-04	1.7E-05	4.1E-08
RA-G-3B	54	0	0.0	1	0	0	0.00E+00										
RA-B-7B	52	0	0.0	1	0	0	0.00E+00										
SA-L-1A	90	0	0.0	1	0	0	0.00E+00										
BA-P-7	45	0	0.0	0	1	0	0.00E+00										
BA-M-8	28	0	0.0	0	0.1	0.9	0.00E+00										
SA-B-1A	68	0	0.0	1	0	0	0.00E+00										
BA-P-9A	48	0	0.0	0	1	0	0.00E+00										
SA-Z-2	127	0	0.0	0	1	0	0.00E+00										
SA-G-1A	79	0	0.0	1	0	0	0.00E+00										
RA-L-7A	57	0	0.0	0	1	0	0.00E+00										
RA-M-12A	61	0	0.0	0	1	0	0.00E+00										
SA-M-1A	101	0	0.0	1	0	0	0.00E+00										
BA-B-5	7	0	0.0	0	0.3	0.7	0.00E+00										
BA-B-1	1	0	0.0	0	0.3	0.7	0.00E+00										
BA-L-1	18	0	0.0	0	0.1	0.9	0.00E+00										
BA-G-1A	9	1	584.6	0	0.3	0.7	4.84E-03		2.9E-03	1.7E-03	5.1E-06	5.7E-10			8.3E-07	2.1E-07	2.9E-10
SA-P-15D	114	1	292.5	0	1	0	4.63E-03		4.0E-03		4.7E-04	1.6E-12			9.4E-05	4.3E-07	4.7E-10
BA-P-9B	49	1	20.6	0	1	0	3.17E-03		1.4E-03								1.1E-14

Entfernte Abfälle

Fig. A4.5-2: Auswertung der dosisdominierenden Abfallsorten: Beispiel für das sukzessive Entfernen der Abfälle mit den grössten Dosisbeiträgen, bis ein definierter Dosisgrenzwert eingehalten wird.

A4.6 Resultate

In Tab. A4.6-1 bis A4.6-17 werden die Resultate der Berechnungen der dosisdominierenden Abfallsorten für die in Kap. 3.3 definierten Rechenfälle dokumentiert, welche für die Ableitung der Abfallzuteilung verwendet wurden[130]. Es werden jeweils die 20 wichtigsten Abfallsorten aufgeführt, geordnet nach absteigenden Dosisbeiträgen. Die Tabellen sind wie folgt aufgebaut:

#:	Nummerierung der Abfallsorten 1 – 20, nach absteigenden Dosisbeiträgen
Abfallsorte:	Abfallsorte gemäss MIRAM (Nagra 2007, Nagra 2008d)
Dosisbeitrag:	Max. Dosisbeitrag jeder Abfallsorte
Gesamtdosis:	Maximum der Gesamtdosis, berechnet aus der Summenkurve aller Abfallsorten in und unterhalb der entsprechenden Zeile
V:	Verpacktes Volumen jeder Abfallsorte (in m^3 und in %, bezogen auf das gesamte verpackte Volumen der SMA und ATA von 77'466 m^3)
Kategorie:	Kategorie gemäss KEV (2004)

Tab. A4.6-18 zeigt eine zusammenfassende Übersicht aller Resultate.

[130] Diese Berechnungen basieren auf dem Abfallinventar aus den bestehenden KKW bei einer angenommenen Betriebsdauer von 50 Jahren und einer Sammelperiode für die Abfälle aus Medizin, Industrie und Forschung bis 2050. Die Eigenschaften der Abfälle und damit auch deren prozentuale Zuteilung auf das SMA- bzw. HAA-Lager (LMA-Teil) sind auch für das umhüllende Abfallinventar repräsentativ (s. Kap. 3.2.2).

Tab. A4.6-1: Dosisdominierende Abfallsorten für den Rechenfall R1 für eine hydraulische Durchlässigkeit von 10^{-9} m/s und ausgewertet mit dem Geosphären-Sorptionsdatensatz "Tonstein".

Geosphäre: Homogen-poröses Wirtgestein ohne Störungszonen.

Hydraulischer Gradient: 0.1 m/m (vertikal).

Geosphären-Transportpfadlänge: 50 m.

#	**Abfallsorte**	**Dosisbeitrag** [mSv/a]	**Gesamtdosis** [mSv/a]	**V** [m^3]	**V** [%]	**Kategorie**
1	RA-G-E2	1.3E+00	2.4E+00	225	0.29	SMA
2	RA-B-E2	9.9E-01	1.1E+00	165	0.21	SMA
3	SA-L-SM	3.4E-02	9.8E-02	1430	1.85	SMA
4	BA-P-MI1	1.9E-02	7.9E-02	751	0.97	SMA
5	WA-F-4A	1.2E-02	6.0E-02	1008	1.30	ATA
6	SA-B-SM	1.2E-02	5.0E-02	1716	2.22	SMA
7	SA-Z-LU1	9.5E-03	4.2E-02	182	0.23	SMA
8	SA-G-SM	8.9E-03	3.3E-02	910	1.17	SMA
9	SA-P-DI2	6.6E-03	2.7E-02	248	0.32	SMA
10	BA-P-MI2_ATA	4.9E-03	2.1E-02	4	0.00	ATA
11	BA-P-AO3_SMA	2.8E-03	1.6E-02	113	0.15	SMA
12	BA-P-AO3_ATA	2.7E-03	1.3E-02	5	0.01	ATA
13	SA-M-SM	2.6E-03	1.0E-02	494	0.64	SMA
14	BA-M-F1_ATA	1.1E-03	8.6E-03	2	0.00	ATA
15	WA-F-2	9.6E-04	7.5E-03	310	0.40	ATA
16	RA-L-E2	7.6E-04	6.7E-03	260	0.34	SMA
17	RA-L-E1	6.1E-04	6.2E-03	151	0.20	SMA
18	BA-B-H1	5.7E-04	5.6E-03	2740	3.54	SMA
19	BA-M-F1_SMA	5.2E-04	5.1E-03	8	0.01	SMA
20	RA-M-E2	4.8E-04	4.6E-03	165	0.21	SMA

Tab. A4.6-2: Dosisdominierende Abfallsorten für den Rechenfall R1 für eine hydraulische Durchlässigkeit von 10^{-9} m/s und ausgewertet mit dem Geosphären-Sorptionsdatensatz "Calcit".

Geosphäre: Homogen-poröses Wirtgestein ohne Störungszonen.

Hydraulischer Gradient: 0.1 m/m (vertikal).

Geosphären-Transportpfadlänge: 50 m.

#	**Abfallsorte**	**Dosisbeitrag** [mSv/a]	**Gesamtdosis** [mSv/a]	**V** [m^3]	**V** [%]	**Kategorie**
1	RA-G-E2	1.3E+00	2.5E+00	225	0.29	SMA
2	RA-B-E2	9.9E-01	1.1E+00	165	0.21	SMA
3	SA-L-SM	9.6E-02	1.7E-01	1430	1.85	SMA
4	BA-P-MI1	1.9E-02	9.5E-02	751	0.97	SMA
5	SA-B-SM	1.6E-02	7.6E-02	1716	2.22	SMA
6	WA-F-4A	1.4E-02	6.4E-02	1008	1.30	ATA
7	SA-G-SM	9.6E-03	5.2E-02	910	1.17	SMA
8	SA-Z-LU1	9.5E-03	4.5E-02	182	0.23	SMA
9	SA-P-DI2	6.6E-03	3.6E-02	248	0.32	SMA
10	BA-P-MI2_ATA	4.9E-03	3.0E-02	4	0.00	ATA
11	SA-M-SM	4.0E-03	2.5E-02	494	0.64	SMA
12	SA-P-W2	3.7E-03	2.2E-02	68	0.09	SMA
13	BA-P-AO3_SMA	3.0E-03	1.9E-02	113	0.15	SMA
14	BA-P-AO3_ATA	2.9E-03	1.6E-02	5	0.01	ATA
15	SA-P-W20	2.0E-03	1.3E-02	48	0.06	SMA
16	RA-L-E2	1.7E-03	1.1E-02	260	0.34	SMA
17	BA-M-F1_ATA	1.1E-03	9.8E-03	2	0.00	ATA
18	RA-M-E2	1.1E-03	8.7E-03	165	0.21	SMA
19	WA-F-2	9.6E-04	7.8E-03	310	0.40	ATA
20	RA-L-E1	7.5E-04	7.0E-03	151	0.20	SMA

Tab. A4.6-3: Dosisdominierende Abfallsorten für den Rechenfall R2 für eine hydraulische Durchlässigkeit von 10^{-9} m/s und ausgewertet mit dem Geosphären-Sorptionsdatensatz "Tonstein".

Geosphäre: Geklüftetes Wirtgestein ohne Störungszonen.

Klufttransmissivität: 10^{-8} m^2/s.

Hydraulischer Gradient: 0.1 m/m (vertikal).

Geosphären-Transportpfadlänge: 50 m.

#	**Abfallsorte**	**Dosisbeitrag** [mSv/a]	**Gesamtdosis** [mSv/a]	**V** [m^3]	**V** [%]	**Kategorie**
1	RA-G-E2	9.1E+00	1.6E+01	225	0.29	SMA
2	RA-B-E2	6.7E+00	7.0E+00	165	0.21	SMA
3	SA-Z-LU1	6.5E-02	2.8E-01	182	0.23	SMA
4	SA-L-SM	6.2E-02	2.2E-01	1430	1.85	SMA
5	SA-B-SM	4.1E-02	1.8E-01	1716	2.22	SMA
6	BA-P-MI1	3.8E-02	1.4E-01	751	0.97	SMA
7	SA-G-SM	2.8E-02	1.0E-01	910	1.17	SMA
8	SA-P-DI2	1.8E-02	7.8E-02	248	0.32	SMA
9	WA-F-4A	1.7E-02	6.0E-02	1008	1.30	ATA
10	BA-P-MI2_ATA	9.9E-03	4.5E-02	4	0.00	ATA
11	BA-P-AO3_SMA	5.8E-03	3.5E-02	113	0.15	SMA
12	SA-M-SM	5.7E-03	2.9E-02	494	0.64	SMA
13	BA-P-AO3_ATA	5.6E-03	2.5E-02	5	0.01	ATA
14	BA-M-F1_ATA	2.2E-03	1.9E-02	2	0.00	ATA
15	RA-L-E2	1.8E-03	1.7E-02	260	0.34	SMA
16	BA-B-H1	1.6E-03	1.6E-02	2740	3.54	SMA
17	RA-L-E1	1.3E-03	1.4E-02	151	0.20	SMA
18	WA-F-2	1.3E-03	1.3E-02	310	0.40	ATA
19	RA-M-E2	1.1E-03	1.2E-02	165	0.21	SMA
20	BA-M-F1_SMA	1.0E-03	1.1E-02	8	0.01	SMA

Tab. A4.6-4: Dosisdominierende Abfallsorten für den Rechenfall R2 für eine hydraulische Durchlässigkeit von 10^{-9} m/s und ausgewertet mit dem Geosphären-Sorptionsdatensatz "Calcit".

Geosphäre: Geklüftetes Wirtgestein ohne Störungszonen.

Klufttransmissivität: 10^{-8} m^2/s.

Hydraulischer Gradient: 0.1 m/m (vertikal).

Geosphären-Transportpfadlänge: 50 m.

#	**Abfallsorte**	**Dosisbeitrag** [mSv/a]	**Gesamtdosis** [mSv/a]	**V** [m^3]	**V** [%]	**Kategorie**
1	RA-G-E2	9.1E+00	1.6E+01	225	0.29	SMA
2	RA-B-E2	6.7E+00	7.3E+00	165	0.21	SMA
3	WA-F-4A	2.9E-01	5.9E-01	1008	1.30	ATA
4	SA-L-SM	1.9E-01	4.3E-01	1430	1.85	SMA
5	SA-Z-LU1	6.5E-02	2.6E-01	182	0.23	SMA
6	SA-B-SM	4.9E-02	1.9E-01	1716	2.22	SMA
7	BA-P-MI1	3.8E-02	1.5E-01	751	0.97	SMA
8	SA-G-SM	2.9E-02	1.1E-01	910	1.17	SMA
9	SA-P-DI2	1.8E-02	8.5E-02	248	0.32	SMA
10	BA-P-MI2_ATA	9.9E-03	6.7E-02	4	0.00	ATA
11	SA-M-SM	8.7E-03	5.8E-02	494	0.64	SMA
12	SA-P-W2	7.7E-03	5.0E-02	68	0.09	SMA
13	BA-P-HL4	7.2E-03	4.3E-02	36	0.05	ATA
14	BA-P-AO3_SMA	6.1E-03	4.1E-02	113	0.15	SMA
15	BA-P-AO3_ATA	5.9E-03	3.5E-02	5	0.01	ATA
16	SA-P-W20	4.1E-03	2.9E-02	48	0.06	SMA
17	RA-L-E2	3.7E-03	2.5E-02	260	0.34	SMA
18	RA-M-E2	2.3E-03	2.2E-02	165	0.21	SMA
19	BA-M-F1_ATA	2.2E-03	2.0E-02	2	0.00	ATA
20	WA-F-2	2.1E-03	1.8E-02	310	0.40	ATA

Tab. A4.6-5: Dosisdominierende Abfallsorten für den Rechenfall R3 für eine hydraulische Durchlässigkeit von 10^{-9} m/s und ausgewertet mit dem Geosphären-Sorptionsdatensatz "Tonstein".

Geosphäre: Homogen-poröses Wirtgestein mit zwei vertikalen Störungszonen ohne Channeling.

Transmissivität der Störungszonen: 10^{-8} m^2/s.

Hydraulischer Gradient: 0.1 m/m (vertikal).

Geosphären-Transportpfadlänge: 50 m.

#	**Abfallsorte**	**Dosisbeitrag** [mSv/a]	**Gesamtdosis** [mSv/a]	**V** [m^3]	**V** [%]	**Kategorie**
1	RA-G-E2	1.3E+00	2.4E+00	225	0.29	SMA
2	RA-B-E2	9.6E-01	1.0E+00	165	0.21	SMA
3	SA-L-SM	3.9E-02	9.9E-02	1430	1.85	SMA
4	WA-F-4A	3.8E-02	7.8E-02	1008	1.30	ATA
5	BA-P-MI1	1.8E-02	6.8E-02	751	0.97	SMA
6	SA-B-SM	1.2E-02	5.0E-02	1716	2.22	SMA
7	SA-Z-LU1	9.3E-03	4.1E-02	182	0.23	SMA
8	SA-G-SM	9.0E-03	3.3E-02	910	1.17	SMA
9	SA-P-DI2	6.4E-03	2.7E-02	248	0.32	SMA
10	BA-P-MI2_ATA	4.7E-03	2.1E-02	4	0.00	ATA
11	BA-P-AO3_SMA	2.8E-03	1.6E-02	113	0.15	SMA
12	SA-M-SM	2.7E-03	1.3E-02	494	0.64	SMA
13	BA-P-AO3_ATA	2.7E-03	1.1E-02	5	0.01	ATA
14	BA-M-F1_ATA	1.0E-03	8.7E-03	2	0.00	ATA
15	WA-F-2	1.0E-03	7.6E-03	310	0.40	ATA
16	RA-L-E2	8.3E-04	6.8E-03	260	0.34	SMA
17	BA-P-HL4	7.4E-04	6.3E-03	36	0.05	ATA
18	RA-L-E1	6.0E-04	6.2E-03	151	0.20	SMA
19	BA-B-H1	5.7E-04	5.6E-03	2740	3.54	SMA
20	RA-M-E2	5.2E-04	5.1E-03	165	0.21	SMA

Tab. A4.6-6: Dosisdominierende Abfallsorten für den Rechenfall R3 für eine hydraulische Durchlässigkeit von 10^{-9} m/s und ausgewertet mit dem Geosphären-Sorptions-datensatz "Calcit".

Geosphäre: Homogen-poröses Wirtgestein mit zwei vertikalen Störungszonen ohne Channeling.

Transmissivität der Störungszonen: 10^{-8} m^2/s.

Hydraulischer Gradient: 0.1 m/m (vertikal).

Geosphären-Transportpfadlänge: 50 m.

#	**Abfallsorte**	**Dosisbeitrag** [mSv/a]	**Gesamtdosis** [mSv/a]	**V** [m^3]	**V** [%]	**Kategorie**
1	RA-G-E2	1.3E+00	2.4E+00	225	0.29	SMA
2	RA-B-E2	9.6E-01	1.1E+00	165	0.21	SMA
3	SA-L-SM	9.4E-02	1.7E-01	1430	1.85	SMA
4	WA-F-4A	4.8E-02	9.3E-02	1008	1.30	ATA
5	BA-P-MI1	1.8E-02	8.1E-02	751	0.97	SMA
6	SA-B-SM	1.6E-02	6.3E-02	1716	2.22	SMA
7	SA-G-SM	9.6E-03	5.1E-02	910	1.17	SMA
8	SA-Z-LU1	9.3E-03	4.4E-02	182	0.23	SMA
9	SA-P-DI2	6.4E-03	3.6E-02	248	0.32	SMA
10	BA-P-MI2_ATA	4.7E-03	3.0E-02	4	0.00	ATA
11	SA-M-SM	4.0E-03	2.5E-02	494	0.64	SMA
12	SA-P-W2	3.5E-03	2.2E-02	68	0.09	SMA
13	BA-P-AO3_SMA	2.9E-03	1.8E-02	113	0.15	SMA
14	BA-P-AO3_ATA	2.8E-03	1.6E-02	5	0.01	ATA
15	SA-P-W20	1.9E-03	1.3E-02	48	0.06	SMA
16	RA-L-E2	1.6E-03	1.1E-02	260	0.34	SMA
17	BA-P-HL4	1.1E-03	9.6E-03	36	0.05	ATA
18	WA-F-2	1.1E-03	9.5E-03	310	0.40	ATA
19	RA-M-E2	1.0E-03	8.7E-03	165	0.21	SMA
20	BA-M-F1_ATA	1.0E-03	7.8E-03	2	0.00	ATA

Tab. A4.6-7: Dosisdominierende Abfallsorten für den Rechenfall R4 für eine hydraulische Durchlässigkeit von 10^{-9} m/s und ausgewertet mit dem Geosphären-Sorptionsdatensatz "Tonstein".

Geosphäre: Homogen-poröses Wirtgestein mit zwei vertikalen Störungszonen mit Channeling.

Transmissivität der Störungszonen: 10^{-8} m^2/s.

Transmissivität der Channels: 10^{-7} m^2/s.

Hydraulischer Gradient: 0.1 m/m (vertikal).

Geosphären-Transportpfadlänge: 50 m.

#	**Abfallsorte**	**Dosisbeitrag** [mSv/a]	**Gesamtdosis** [mSv/a]	**V** [m^3]	**V** [%]	**Kategorie**
1	RA-G-E2	1.3E+00	2.6E+00	225	0.29	SMA
2	RA-B-E2	9.7E-01	1.3E+00	165	0.21	SMA
3	WA-F-4A	3.4E-01	3.8E-01	1008	1.30	ATA
4	SA-L-SM	4.2E-02	8.8E-02	1430	1.85	SMA
5	BA-P-MI1	1.8E-02	6.8E-02	751	0.97	SMA
6	SA-B-SM	1.3E-02	5.0E-02	1716	2.22	SMA
7	SA-Z-LU1	9.3E-03	4.1E-02	182	0.23	SMA
8	SA-G-SM	9.1E-03	3.3E-02	910	1.17	SMA
9	BA-P-HL4	8.2E-03	2.7E-02	36	0.05	ATA
10	SA-P-DI2	6.4E-03	2.6E-02	248	0.32	SMA
11	BA-P-MI2_ATA	4.7E-03	2.0E-02	4	0.00	ATA
12	SA-M-SM	2.8E-03	1.6E-02	494	0.64	SMA
13	BA-P-AO3_SMA	2.8E-03	1.4E-02	113	0.15	SMA
14	BA-P-AO3_ATA	2.7E-03	1.1E-02	5	0.01	ATA
15	WA-F-2	2.0E-03	8.5E-03	310	0.40	ATA
16	BA-M-F1_ATA	1.0E-03	7.7E-03	2	0.00	ATA
17	BA-B-H1	9.3E-04	6.7E-03	2740	3.54	SMA
18	RA-L-E2	8.8E-04	6.1E-03	260	0.34	SMA
19	SA-P-HL1	7.1E-04	5.6E-03	81	0.11	ATA
20	RA-L-E1	6.1E-04	5.6E-03	151	0.20	SMA

Tab. A4.6-8: Dosisdominierende Abfallsorten für den Rechenfall R4 für eine hydraulische Durchlässigkeit von 10^{-9} m/s und ausgewertet mit dem Geosphären-Sorptionsdatensatz "Calcit".

Geosphäre: Homogen-poröses Wirtgestein mit zwei vertikalen Störungszonen mit Channeling.

Transmissivität der Störungszonen: 10^{-8} m^2/s.

Transmissivität der Channels: 10^{-7} m^2/s.

Hydraulischer Gradient: 0.1 m/m (vertikal).

Geosphären-Transportpfadlänge: 50 m.

#	**Abfallsorte**	**Dosisbeitrag** [mSv/a]	**Gesamtdosis** [mSv/a]	**V** [m^3]	**V** [%]	**Kategorie**
1	RA-G-E2	1.3E+00	2.7E+00	225	0.29	SMA
2	RA-B-E2	9.7E-01	1.4E+00	165	0.21	SMA
3	WA-F-4A	4.4E-01	5.0E-01	1008	1.30	ATA
4	SA-L-SM	9.4E-02	1.6E-01	1430	1.85	SMA
5	BA-P-MI1	1.8E-02	8.1E-02	751	0.97	SMA
6	SA-B-SM	1.6E-02	6.3E-02	1716	2.22	SMA
7	BA-P-HL4	1.1E-02	5.1E-02	36	0.05	ATA
8	SA-G-SM	9.7E-03	5.1E-02	910	1.17	SMA
9	SA-Z-LU1	9.4E-03	4.4E-02	182	0.23	SMA
10	SA-P-DI2	6.4E-03	3.5E-02	248	0.32	SMA
11	BA-P-MI2_ATA	4.7E-03	2.9E-02	4	0.00	ATA
12	SA-M-SM	4.0E-03	2.5E-02	494	0.64	SMA
13	SA-P-W2	3.5E-03	2.2E-02	68	0.09	SMA
14	BA-P-AO3_SMA	2.9E-03	1.8E-02	113	0.15	SMA
15	BA-P-AO3_ATA	2.8E-03	1.5E-02	5	0.01	ATA
16	WA-F-2	2.3E-03	1.3E-02	310	0.40	ATA
17	SA-P-W20	1.9E-03	1.2E-02	48	0.06	SMA
18	RA-L-E2	1.7E-03	1.0E-02	260	0.34	SMA
19	BA-B-H1	1.1E-03	8.7E-03	2740	3.54	SMA
20	BA-M-F1_ATA	1.0E-03	8.2E-03	2	0.00	ATA

Tab. A4.6-9: Dosisdominierende Abfallsorten für den Rechenfall R1 für eine hydraulische Durchlässigkeit von 10^{-10} m/s und ausgewertet mit dem Geosphären-Sorptionsdatensatz "Tonstein".

Geosphäre: Homogen-poröses Wirtgestein ohne Störungszonen.

Hydraulischer Gradient: 0.1 m/m (vertikal).

Geosphären-Transportpfadlänge: 50 m.

#	**Abfallsorte**	**Dosisbeitrag** [mSv/a]	**Gesamtdosis** [mSv/a]	**V** [m^3]	**V** [%]	**Kategorie**
1	SA-L-SM	4.4E-03	8.5E-03	1430	1.85	SMA
2	SA-B-SM	1.1E-03	4.3E-03	1716	2.22	SMA
3	WA-F-4A	1.0E-03	3.3E-03	1008	1.30	ATA
4	SA-G-SM	8.3E-04	2.3E-03	910	1.17	SMA
5	BA-P-MI1	6.0E-04	1.7E-03	751	0.97	SMA
6	SA-M-SM	2.6E-04	1.1E-03	494	0.64	SMA
7	SA-P-DI2	2.1E-04	9.3E-04	248	0.32	SMA
8	BA-P-MI2_ATA	1.6E-04	7.5E-04	4	0.00	ATA
9	BA-P-AO3_SMA	8.9E-05	6.0E-04	113	0.15	SMA
10	BA-P-AO3_ATA	8.6E-05	5.2E-04	5	0.01	ATA
11	WA-F-2	8.2E-05	4.4E-04	310	0.40	ATA
12	RA-L-E2	7.5E-05	3.6E-04	260	0.34	SMA
13	RA-M-E2	4.7E-05	3.0E-04	165	0.21	SMA
14	BA-M-F1_ATA	3.4E-05	2.7E-04	2	0.00	ATA
15	RA-G-E2	2.8E-05	2.3E-04	225	0.29	SMA
16	RA-L-E1	2.2E-05	2.2E-04	151	0.20	SMA
17	RA-B-E2	2.1E-05	2.0E-04	165	0.21	SMA
18	BA-M-F1_SMA	1.6E-05	2.0E-04	8	0.01	SMA
19	BA-B-H1	1.5E-05	1.8E-04	2740	3.54	SMA
20	BA-M-NP1	1.5E-05	1.7E-04	353	0.46	SMA

Tab. A4.6-10: Dosisdominierende Abfallsorten für den Rechenfall R1 für eine hydraulische Durchlässigkeit von 10^{-10} m/s und ausgewertet mit dem Geosphären-Sorptionsdatensatz "Calcit".

Geosphäre: Homogen-poröses Wirtgestein ohne Störungszonen.

Hydraulischer Gradient: 0.1 m/m (vertikal).

Geosphären-Transportpfadlänge: 50 m.

#	**Abfallsorte**	**Dosisbeitrag** [mSv/a]	**Gesamtdosis** [mSv/a]	**V** [m^3]	**V** [%]	**Kategorie**
1	SA-L-SM	5.7E-03	9.5E-03	1430	1.85	SMA
2	SA-B-SM	1.1E-03	4.5E-03	1716	2.22	SMA
3	WA-F-4A	1.1E-03	3.5E-03	1008	1.30	ATA
4	SA-G-SM	8.4E-04	2.5E-03	910	1.17	SMA
5	BA-P-MI1	6.0E-04	1.9E-03	751	0.97	SMA
6	SA-M-SM	2.9E-04	1.3E-03	494	0.64	SMA
7	SA-P-DI2	2.1E-04	1.1E-03	248	0.32	SMA
8	BA-P-MI2_ATA	1.6E-04	9.0E-04	4	0.00	ATA
9	RA-L-E2	9.4E-05	7.5E-04	260	0.34	SMA
10	BA-P-AO3_SMA	8.9E-05	6.8E-04	113	0.15	SMA
11	BA-P-AO3_ATA	8.6E-05	5.9E-04	5	0.01	ATA
12	WA-F-2	8.2E-05	5.1E-04	310	0.40	ATA
13	SA-P-W2	8.1E-05	4.4E-04	68	0.09	SMA
14	RA-M-E2	5.9E-05	3.7E-04	165	0.21	SMA
15	SA-P-W20	4.3E-05	3.2E-04	48	0.06	SMA
16	BA-M-F1_ATA	3.4E-05	2.8E-04	2	0.00	ATA
17	RA-G-E2	2.8E-05	2.5E-04	225	0.29	SMA
18	RA-L-E1	2.5E-05	2.4E-04	151	0.20	SMA
19	RA-B-E2	2.1E-05	2.2E-04	165	0.21	SMA
20	BA-B-H1	1.7E-05	2.1E-04	2740	3.54	SMA

Tab. A4.6-11: Dosisdominierende Abfallsorten für den Rechenfall R2 für eine hydraulische Durchlässigkeit von 10^{-10} m/s und ausgewertet mit dem Geosphären-Sorptionsdatensatz "Tonstein".

Geosphäre: Geklüftetes Wirtgestein ohne Störungszonen.

Klufttransmissivität: 10^{-8} m^2/s.

Hydraulischer Gradient: 0.1 m/m (vertikal).

Geosphären-Transportpfadlänge: 50 m.

#	**Abfallsorte**	**Dosisbeitrag** [mSv/a]	**Gesamtdosis** [mSv/a]	**V** [m^3]	**V** [%]	**Kategorie**
1	RA-G-E2	1.3E+00	2.4E+00	225	0.29	SMA
2	RA-B-E2	9.9E-01	1.0E+00	165	0.21	SMA
3	SA-L-SM	1.7E-02	4.3E-02	1430	1.85	SMA
4	SA-Z-LU1	9.5E-03	3.7E-02	182	0.23	SMA
5	SA-B-SM	7.9E-03	2.7E-02	1716	2.22	SMA
6	BA-P-MI1	6.3E-03	2.2E-02	751	0.97	SMA
7	SA-G-SM	5.5E-03	1.6E-02	910	1.17	SMA
8	SA-P-DI2	2.8E-03	1.2E-02	248	0.32	SMA
9	WA-F-4A	2.4E-03	9.5E-03	1008	1.30	ATA
10	BA-P-MI2_ATA	1.6E-03	7.2E-03	4	0.00	ATA
11	SA-M-SM	1.1E-03	5.6E-03	494	0.64	SMA
12	BA-P-AO3_SMA	9.5E-04	4.9E-03	113	0.15	SMA
13	BA-P-AO3_ATA	9.2E-04	4.0E-03	5	0.01	ATA
14	BA-M-F1_ATA	3.6E-04	3.1E-03	2	0.00	ATA
15	RA-L-E2	3.5E-04	2.7E-03	260	0.34	SMA
16	BA-B-H1	2.6E-04	2.5E-03	2740	3.54	SMA
17	RA-M-E2	2.2E-04	2.2E-03	165	0.21	SMA
18	RA-L-E1	2.1E-04	2.1E-03	151	0.20	SMA
19	BA-M-F1_SMA	1.7E-04	1.9E-03	8	0.01	SMA
20	WA-F-2	1.7E-04	1.7E-03	310	0.40	ATA

Tab. A4.6-12: Dosisdominierende Abfallsorten für den Rechenfall R2 für eine hydraulische Durchlässigkeit von 10^{-10} m/s und ausgewertet mit dem Geosphären-Sorptionsdatensatz "Calcit".

Geosphäre: Geklüftetes Wirtgestein ohne Störungszonen.

Klufttransmissivität: 10^{-8} m^2/s.

Hydraulischer Gradient: 0.1 m/m (vertikal).

Geosphären-Transportpfadlänge: 50 m.

#	**Abfallsorte**	**Dosisbeitrag** [mSv/a]	**Gesamtdosis** [mSv/a]	**V** [m^3]	**V** [%]	**Kategorie**
1	RA-G-E2	1.3E+00	2.4E+00	225	0.29	SMA
2	RA-B-E2	9.9E-01	1.1E+00	165	0.21	SMA
3	SA-L-SM	3.8E-02	7.1E-02	1430	1.85	SMA
4	WA-F-4A	1.3E-02	4.4E-02	1008	1.30	ATA
5	SA-Z-LU1	9.5E-03	3.9E-02	182	0.23	SMA
6	SA-B-SM	9.2E-03	3.0E-02	1716	2.22	SMA
7	BA-P-MI1	6.3E-03	2.3E-02	751	0.97	SMA
8	SA-G-SM	5.7E-03	1.7E-02	910	1.17	SMA
9	SA-P-DI2	2.8E-03	1.3E-02	248	0.32	SMA
10	BA-P-MI2_ATA	1.6E-03	1.1E-02	4	0.00	ATA
11	SA-M-SM	1.6E-03	8.9E-03	494	0.64	SMA
12	SA-P-W2	1.3E-03	7.8E-03	68	0.09	SMA
13	BA-P-AO3_SMA	9.8E-04	6.5E-03	113	0.15	SMA
14	BA-P-AO3_ATA	9.5E-04	5.6E-03	5	0.01	ATA
15	SA-P-W20	6.8E-04	4.7E-03	48	0.06	SMA
16	RA-L-E2	6.7E-04	4.0E-03	260	0.34	SMA
17	RA-M-E2	4.2E-04	3.5E-03	165	0.21	SMA
18	BA-M-F1_ATA	3.6E-04	3.1E-03	2	0.00	ATA
19	BA-B-H1	3.4E-04	2.8E-03	2740	3.54	SMA
20	BA-P-HL4	3.1E-04	2.5E-03	36	0.05	ATA

Tab. A4.6-13: Dosisdominierende Abfallsorten für den Rechenfall R3 für eine hydraulische Durchlässigkeit von 10^{-10} m/s und ausgewertet mit dem Geosphären-Sorptions-datensatz "Tonstein".

Geosphäre: Homogen-poröses Wirtgestein mit zwei vertikalen Störungszonen ohne Channeling.

Transmissivität der Störungszonen: 10^{-8} m^2/s.

Hydraulischer Gradient: 0.1 m/m (vertikal).

Geosphären-Transportpfadlänge: 50 m.

#	**Abfallsorte**	**Dosisbeitrag** [mSv/a]	**Gesamtdosis** [mSv/a]	**V** [m^3]	**V** [%]	**Kategorie**
1	RA-G-E2	8.9E-01	1.6E+00	225	0.29	SMA
2	RA-B-E2	6.5E-01	7.0E-01	165	0.21	SMA
3	WA-F-4A	3.2E-02	5.5E-02	1008	1.30	ATA
4	SA-L-SM	1.6E-02	3.6E-02	1430	1.85	SMA
5	SA-Z-LU1	6.3E-03	2.4E-02	182	0.23	SMA
6	SA-B-SM	4.9E-03	1.8E-02	1716	2.22	SMA
7	BA-P-MI1	3.8E-03	1.4E-02	751	0.97	SMA
8	SA-G-SM	3.1E-03	1.0E-02	910	1.17	SMA
9	SA-P-DI2	1.8E-03	7.7E-03	248	0.32	SMA
10	BA-P-MI2_ATA	9.7E-04	5.9E-03	4	0.00	ATA
11	SA-M-SM	8.1E-04	5.0E-03	494	0.64	SMA
12	BA-P-HL4	8.1E-04	4.3E-03	36	0.05	ATA
13	BA-P-AO3_SMA	6.0E-04	4.2E-03	113	0.15	SMA
14	BA-P-AO3_ATA	5.8E-04	3.6E-03	5	0.01	ATA
15	SA-P-W2	4.8E-04	3.0E-03	68	0.09	SMA
16	RA-L-E2	3.2E-04	2.6E-03	260	0.34	SMA
17	SA-P-W20	2.6E-04	2.3E-03	48	0.06	SMA
18	WA-F-2	2.2E-04	2.0E-03	310	0.40	ATA
19	BA-M-F1_ATA	2.2E-04	1.9E-03	2	0.00	ATA
20	RA-M-E2	2.0E-04	1.7E-03	165	0.21	SMA

Tab. A4.6-14: Dosisdominierende Abfallsorten für den Rechenfall R3 für eine hydraulische Durchlässigkeit von 10^{-10} m/s und ausgewertet mit dem Geosphären-Sorptionsdatensatz "Calcit".

Geosphäre: Homogen-poröses Wirtgestein mit zwei vertikalen Störungszonen ohne Channeling.

Transmissivität der Störungszonen: 10^{-8} m^2/s.

Hydraulischer Gradient: 0.1 m/m (vertikal).

Geosphären-Transportpfadlänge: 50 m.

#	**Abfallsorte**	**Dosisbeitrag** [mSv/a]	**Gesamtdosis** [mSv/a]	**V** [m^3]	**V** [%]	**Kategorie**
1	RA-G-E2	8.9E-01	1.6E+00	225	0.29	SMA
2	RA-B-E2	6.5E-01	7.0E-01	165	0.21	SMA
3	WA-F-4A	3.5E-02	6.1E-02	1008	1.30	ATA
4	SA-L-SM	2.1E-02	4.2E-02	1430	1.85	SMA
5	SA-Z-LU1	6.3E-03	2.5E-02	182	0.23	SMA
6	SA-B-SM	5.2E-03	1.9E-02	1716	2.22	SMA
7	BA-P-MI1	3.8E-03	1.5E-02	751	0.97	SMA
8	SA-G-SM	3.1E-03	1.1E-02	910	1.17	SMA
9	SA-P-DI2	1.8E-03	8.4E-03	248	0.32	SMA
10	BA-P-MI2_ATA	9.7E-04	6.6E-03	4	0.00	ATA
11	SA-M-SM	9.1E-04	5.7E-03	494	0.64	SMA
12	BA-P-HL4	8.8E-04	5.0E-03	36	0.05	ATA
13	SA-P-W2	7.5E-04	4.8E-03	68	0.09	SMA
14	BA-P-AO3_SMA	6.0E-04	4.0E-03	113	0.15	SMA
15	BA-P-AO3_ATA	5.8E-04	3.5E-03	5	0.01	ATA
16	SA-P-W20	4.1E-04	2.9E-03	48	0.06	SMA
17	RA-L-E2	3.9E-04	2.5E-03	260	0.34	SMA
18	RA-M-E2	2.4E-04	2.2E-03	165	0.21	SMA
19	WA-F-2	2.3E-04	2.0E-03	310	0.40	ATA
20	BA-M-F1_ATA	2.2E-04	1.8E-03	2	0.00	ATA

Tab. A4.6-15: Dosisdominierende Abfallsorten für den Rechenfall R4 für eine hydraulische Durchlässigkeit von 10^{-10} m/s und ausgewertet mit dem Geosphären-Sorptionsdatensatz "Tonstein".

Geosphäre: Homogen-poröses Wirtgestein mit zwei vertikalen Störungszonen mit Channeling.

Transmissivität der Störungszonen: 10^{-8} m^2/s.

Transmissivität der Channels: 10^{-7} m^2/s.

Hydraulischer Gradient: 0.1 m/m (vertikal).

Geosphären-Transportpfadlänge: 50 m.

#	**Abfallsorte**	**Dosisbeitrag** [mSv/a]	**Gesamtdosis** [mSv/a]	**V** [m^3]	**V** [%]	**Kategorie**
1	RA-G-E2	1.3E+00	2.6E+00	225	0.29	SMA
2	RA-B-E2	9.7E-01	1.3E+00	165	0.21	SMA
3	WA-F-4A	3.8E-01	4.4E-01	1008	1.30	ATA
4	SA-L-SM	2.1E-02	6.0E-02	1430	1.85	SMA
5	SA-Z-LU1	9.3E-03	4.4E-02	182	0.23	SMA
6	BA-P-HL4	9.3E-03	3.5E-02	36	0.05	ATA
7	SA-B-SM	6.9E-03	2.7E-02	1716	2.22	SMA
8	BA-P-MI1	4.7E-03	2.1E-02	751	0.97	SMA
9	SA-G-SM	4.2E-03	1.7E-02	910	1.17	SMA
10	SA-P-DI2	2.5E-03	1.3E-02	248	0.32	SMA
11	WA-F-2	1.4E-03	1.1E-02	310	0.40	ATA
12	BA-P-MI2_ATA	1.2E-03	9.9E-03	4	0.00	ATA
13	SA-M-SM	1.1E-03	8.8E-03	494	0.64	SMA
14	SA-P-HL1	8.0E-04	8.0E-03	81	0.11	ATA
15	BA-B-H1	7.6E-04	7.2E-03	2740	3.54	SMA
16	BA-P-AO3_SMA	7.5E-04	6.5E-03	113	0.15	SMA
17	BA-P-AO3_ATA	7.3E-04	5.9E-03	5	0.01	ATA
18	SA-P-W2	6.6E-04	5.3E-03	68	0.09	SMA
19	BA-L-H1	5.9E-04	4.6E-03	7554	9.75	SMA
20	RA-L-E2	4.3E-04	4.1E-03	260	0.34	SMA

Tab. A4.6-16: Dosisdominierende Abfallsorten für den Rechenfall R4 für eine hydraulische Durchlässigkeit von 10^{-10} m/s und ausgewertet mit dem Geosphären-Sorptions-datensatz "Calcit".

Geosphäre: Homogen-poröses Wirtgestein mit zwei vertikalen Störungszonen mit Channeling.

Transmissivität der Störungszonen: 10^{-8} m^2/s.

Transmissivität der Channels: 10^{-7} m^2/s.

Hydraulischer Gradient: 0.1 m/m (vertikal).

Geosphären-Transportpfadlänge: 50 m.

#	**Abfallsorte**	**Dosisbeitrag** [mSv/a]	**Gesamtdosis** [mSv/a]	**V** [m^3]	**V** [%]	**Kategorie**
1	RA-G-E2	1.3E+00	2.7E+00	225	0.29	SMA
2	RA-B-E2	9.7E-01	1.4E+00	165	0.21	SMA
3	WA-F-4A	4.1E-01	4.7E-01	1008	1.30	ATA
4	SA-L-SM	2.6E-02	6.6E-02	1430	1.85	SMA
5	BA-P-HL4	1.0E-02	4.6E-02	36	0.05	ATA
6	SA-Z-LU1	9.3E-03	3.8E-02	182	0.23	SMA
7	SA-B-SM	7.2E-03	2.8E-02	1716	2.22	SMA
8	BA-P-MI1	4.7E-03	2.2E-02	751	0.97	SMA
9	SA-G-SM	4.3E-03	1.8E-02	910	1.17	SMA
10	SA-P-DI2	2.5E-03	1.4E-02	248	0.32	SMA
11	WA-F-2	1.5E-03	1.2E-02	310	0.40	ATA
12	BA-P-MI2_ATA	1.2E-03	1.1E-02	4	0.00	ATA
13	SA-M-SM	1.2E-03	9.7E-03	494	0.64	SMA
14	SA-P-W2	9.4E-04	8.8E-03	68	0.09	SMA
15	SA-P-HL1	8.7E-04	7.9E-03	81	0.11	ATA
16	BA-B-H1	8.4E-04	7.1E-03	2740	3.54	SMA
17	BA-P-AO3_SMA	7.6E-04	6.3E-03	113	0.15	SMA
18	BA-P-AO3_ATA	7.3E-04	5.7E-03	5	0.01	ATA
19	BA-L-H1	6.3E-04	5.1E-03	7554	9.75	SMA
20	SA-P-W20	5.1E-04	4.5E-03	48	0.06	SMA

Tab. A4.6-17: Dosisdominierende Abfallsorten für den Rechenfall R5.
Geosphäre: Erosive Freilegung des Lagers nach langen Zeiten (Modell 1).
Einschlusszeit: 10^5 Jahre.

#	**Abfallsorte**	**Dosisbeitrag** [mSv/a]	**Gesamtdosis** [mSv/a]	**V** [m^3]	**V** [%]	**Kategorie**
1	BA-P-HL9	1.93E-01	7.11E-01	310	0.40	ATA
2	BA-P-HL1	1.35E-01	5.18E-01	263	0.34	ATA
3	WA-F-4A	1.20E-01	3.83E-01	1008	1.30	ATA
4	BA-P-O4_SMA	6.69E-02	2.63E-01	41	0.05	SMA
5	BA-P-HL4	5.29E-02	1.96E-01	36	0.05	ATA
6	BA-P-O4_ATA	3.94E-02	1.43E-01	4	0.01	ATA
7	WA-F-2	1.65E-02	1.03E-01	310	0.40	ATA
8	SA-L-SM	1.15E-02	8.69E-02	1430	1.85	SMA
9	BA-G-F1	1.04E-02	7.54E-02	35	0.04	ATA
10	BA-P-HL5_SMA	9.60E-03	6.50E-02	1423	1.84	SMA
11	SA-B-SM	7.28E-03	5.54E-02	1716	2.22	SMA
12	BA-P-AM1	7.17E-03	4.81E-02	40	0.05	ATA
13	SA-Z-LU1	4.85E-03	4.09E-02	182	0.23	SMA
14	BA-P-HL5_ATA	4.84E-03	3.61E-02	94	0.12	ATA
15	SA-G-SM	4.75E-03	3.12E-02	910	1.17	SMA
16	SA-Z-LU2	4.53E-03	2.65E-02	86	0.11	SMA
17	SA-P-HL1	3.83E-03	2.19E-02	81	0.11	ATA
18	BA-G-NP1	2.48E-03	1.81E-02	238	0.31	SMA
19	SA-M-SM	2.12E-03	1.56E-02	494	0.64	SMA
20	BA-P-HL2	1.41E-03	1.35E-02	30	0.04	ATA

Tab. A4.6-18: Zusammenfassung der Resultate der Bewertung der dosisdominierenden Abfallsorten.

Rote Markierung: Abfallsorten, die entfernt werden müssen, so dass die Gesamtdosis den Wert von 0.05 mSv/a (R1-R4) bzw. 0.1 mSv/a (R5) nicht überschreitet. Grüne Markierung: Alle anderen Abfallsorten.

Konzept	R1	R1	R2	R2	R3	R3	R4	R4	R5
	HPM	HPM	Kluft	Kluft	HPM, 2 St. Z.	HPM, 2 St. Z.	HPM, 2 St. Z.	HPM, 2 St. Z.	Erosion (Mod.1)
K (m/s)	1E-9	1E-9	1E-9	1E-9	1E-9	1E-9	1E-9	1E-9	-
T (m^2/s)	-	-	1E-8	1E-8	1E-8	1E-8	1E-8	1E-8	-
T_ch (m^2/s)	-	-	-	-	-	-	1E-7	1E-7	-
Kd	Tonstein	Calcit	Tonstein	Calcit	Tonstein	Calcit	Tonstein	Calcit	-
1	RA-G-E2*	RA-G-E2*	RA-G-E2*	RA-G-E2*	RA-G-E2*	RA-G-E2*	RA-G-E2*	RA-G-E2*	BA-P-HL9*
2	RA-B-E2*	RA-B-E2*	RA-B-E2*	RA-B-E2*	RA-B-E2*	RA-B-E2*	RA-B-E2*	RA-B-E2*	BA-P-HL1*
3	SA-L-SM*	SA-L-SM*	SA-Z-LU1*	WA-F-4A*	SA-L-SM*	SA-L-SM*	WA-F-4A*	WA-F-4A*	WA-F-4A*
4	BA-P-MI1*	BA-P-MI1*	SA-L-SM*	SA-L-SM*	WA-F-4A*	WA-F-4A*	SA-L-SM*	SA-L-SM*	BA-P-O4_SMA*
5	WA-F-4A*	SA-B-SM*	SA-B-SM*	SA-Z-LU1*	BA-P-MI1*	BA-P-MI1*	BA-P-MI1*	BA-P-MI1*	BA-P-HL4*
6	SA-B-SM*	WA-F-4A*	BA-P-MI1*	SA-B-SM*	SA-B-SM*	SA-B-SM*	SA-B-SM*	SA-B-SM*	BA-P-O4_ATA*
7	SA-Z-LU1*	SA-G-SM*	SA-G-SM*	BA-P-MI1*	SA-Z-LU1*	SA-G-SM*	SA-Z-LU1*	BA-P-HL4*	WA-F-2*
8	SA-G-SM*	SA-Z-LU1*	SA-P-DI2*	SA-G-SM*	SA-G-SM*	SA-Z-LU1*	SA-G-SM*	SA-G-SM*	SA-L-SM*
9	SA-P-DI2*	SA-P-DI2*	WA-F-4A*	SA-P-DI2*	SA-P-DI2*	SA-P-DI2*	BA-P-HL4*	SA-Z-LU1*	BA-G-F1*
10	BA-P-MI2_ATA*	BA-P-MI2_ATA*	BA-P-MI2_ATA*	BA-P-MI2_ATA*	BA-P-MI2_ATA*	BA-P-MI2_ATA*	SA-P-DI2*	SA-P-DI2*	BA-P-HL5_SMA
11	BA-P-AO3_SMA	SA-M-SM*	BA-P-AO3_SMA	SA-M-SM*	BA-P-AO3_SMA	SA-M-SM*	BA-P-MI2_ATA*	BA-P-MI2_ATA*	SA-B-SM*
12	BA-P-AO3_ATA*	SA-P-W2*	SA-M-SM*	SA-P-W2*	SA-M-SM*	SA-P-W2*	SA-M-SM*	SA-M-SM*	BA-P-AM1*
13	SA-M-SM*	BA-P-AO3_SMA	BA-P-AO3_ATA*	BA-P-HL4*	BA-P-AO3_ATA*	BA-P-AO3_SMA	BA-P-AO3_SMA	SA-P-W2*	SA-Z-LU1*
14	BA-M-F1_ATA*	BA-P-AO3_ATA*	BA-M-F1_ATA*	BA-P-AO3_SMA	BA-M-F1_ATA*	BA-P-AO3_ATA*	BA-P-AO3_ATA*	BA-P-AO3_SMA	BA-P-HL5_ATA*
15	WA-F-2*	SA-P-W20	RA-L-E2	BA-P-AO3_ATA*	WA-F-2*	SA-P-W20	WA-F-2*	BA-P-AO3_ATA*	SA-G-SM*
16	RA-L-E2	RA-L-E2	BA-B-H1	SA-P-W20	RA-L-E2	RA-L-E2	BA-M-F1_ATA*	WA-F-2*	SA-Z-LU2
17	RA-L-E1	BA-M-F1_ATA*	RA-L-E1	RA-L-E2	BA-P-HL4*	BA-P-HL4*	BA-B-H1	SA-P-W20	SA-P-HL1*
18	BA-B-H1	RA-M-E2	WA-F-2*	RA-M-E2	RA-L-E1	WA-F-2*	RA-L-E2	RA-L-E2	BA-G-NP1
19	BA-M-F1_SMA	WA-F-2*	RA-M-E2	BA-M-F1_ATA*	BA-B-H1	RA-M-E2	SA-P-HL1*	BA-B-H1	SA-M-SM*
20	RA-M-E2	RA-L-E1	BA-M-F1_SMA	WA-F-2*	RA-M-E2	BA-M-F1_ATA*	RA-L-E1	BA-M-F1_ATA*	BA-P-HL2*

Tab. A4.6-18: (Fortsetzung)

Konzept	R1 HPM	R1 HPM	R2 Kluft	R2 Kluft	R3 HPM, 2 St. Z.	R3 HPM, 2 St. Z.	R4 HPM, 2 St. Z.	R4 HPM, 2 St. Z.	R5 Erosion (Mod.1)
K (m/s)	1E-10	1E-10	1E-10	1E-10	1E-10	1E-10	1E-10	1E-10	-
T (m^2/s)	-	-	1E-8	1E-8	1E-8	1E-8	1E-8	1E-8	-
T_ch (m^2/s)	-	-	-	-	-	-	1E-7	1E-7	-
Kd	Tonstein	Calcit	Tonstein	Calcit	Tonstein	Calcit	Tonstein	Calcit	-
1	SA-L-SM	SA-L-SM	RA-G-E2*	RA-G-E2*	RA-G-E2*	RA-G-E2*	RA-G-E2*	RA-G-E2*	BA-P-HL9*
2	SA-B-SM	SA-B-SM	RA-B-E2*	RA-B-E2*	RA-B-E2*	RA-B-E2*	RA-B-E2*	RA-B-E2*	BA-P-HL1*
3	WA-F-4A*	WA-F-4A*	SA-L-SM	SA-L-SM	WA-F-4A*	WA-F-4A*	WA-F-4A*	WA-F-4A*	WA-F-4A*
4	SA-G-SM	SA-G-SM	SA-Z-LU1	WA-F-4A*	SA-L-SM	SA-L-SM	SA-L-SM	SA-L-SM	BA-P-O4_SMA*
5	BA-P-MI1	BA-P-MI1	SA-B-SM	SA-Z-LU1	SA-Z-LU1	SA-Z-LU1	SA-Z-LU1	BA-P-HL4*	BA-P-HL4*
6	SA-M-SM	SA-M-SM	BA-P-MI1	SA-B-SM	SA-B-SM	SA-B-SM	BA-P-HL4*	SA-Z-LU1	BA-P-O4_ATA*
7	SA-P-DI2	SA-P-DI2	SA-G-SM	BA-P-MI1	BA-P-MI1	BA-P-MI1	SA-B-SM	SA-B-SM	WA-F-2*
8	BA-P-MI2_ATA*	BA-P-MI2_ATA*	SA-P-DI2	SA-G-SM	SA-G-SM	SA-G-SM	BA-P-MI1	BA-P-MI1	SA-L-SM
9	BA-P-AO3_SMA	RA-L-E2	WA-F-4A*	SA-P-DI2	SA-P-DI2	SA-P-DI2	SA-G-SM	SA-G-SM	BA-G-F1*
10	BA-P-AO3_ATA*	BA-P-AO3_SMA	BA-P-MI2_ATA*	BA-P-MI2_ATA*	BA-P-MI2_ATA*	BA-P-MI2_ATA*	SA-P-DI2	SA-P-DI2	BA-P-HL5_SMA
11	WA-F-2*	BA-P-AO3_ATA*	SA-M-SM	SA-M-SM	SA-M-SM	SA-M-SM	WA-F-2*	WA-F-2*	SA-B-SM
12	RA-L-E2	WA-F-2*	BA-P-AO3_SMA	SA-P-W2	BA-P-HL4*	BA-P-HL4*	BA-P-MI2_ATA*	BA-P-MI2_ATA*	BA-P-AM1*
13	RA-M-E2	SA-P-W2	BA-P-AO3_ATA*	BA-P-AO3_SMA	BA-P-AO3_SMA	SA-P-W2	SA-M-SM	SA-M-SM	SA-Z-LU1
14	BA-M-F1_ATA*	RA-M-E2	BA-M-F1_ATA*	BA-P-AO3_ATA*	BA-P-AO3_ATA*	BA-P-AO3_SMA	SA-P-HL1*	SA-P-W2	BA-P-HL5_ATA*
15	RA-G-E2*	SA-P-W20	RA-L-E2	SA-P-W20	SA-P-W2	BA-P-AO3_ATA*	BA-B-H1	SA-P-HL1*	SA-G-SM
16	RA-L-E1	BA-M-F1_ATA*	BA-B-H1	RA-L-E2	RA-L-E2	SA-P-W20	BA-P-AO3_SMA	BA-B-H1	SA-Z-LU2
17	RA-B-E2*	RA-G-E2*	RA-M-E2	RA-M-E2	SA-P-W20	RA-L-E2	BA-P-AO3_ATA*	BA-P-AO3_SMA	SA-P-HL1*
18	BA-M-F1_SMA	RA-L-E1	RA-L-E1	BA-M-F1_ATA*	WA-F-2*	RA-M-E2	SA-P-W2	BA-P-AO3_ATA*	BA-G-NP1
19	BA-B-H1	RA-B-E2*	BA-M-F1_SMA	BA-B-H1	BA-M-F1_ATA*	WA-F-2*	BA-L-H1	BA-L-H1	SA-M-SM
20	BA-M-NP1	BA-B-H1	WA-F-2*	BA-P-HL4*	RA-M-E2	BA-M-F1_ATA*	RA-L-E2	SA-P-W20	BA-P-HL2*

* Abfallsorten, die dem HAA-Lager (LMA-Teil) zugeteilt werden. Der Satz der umgeteilten Abfallsorten ist unterschiedlich für die Rechenfälle mit $K=10^{-10}$ m/s (Referenzzuteilung) und $K=10^{-9}$ m/s (alternative Zuteilung). Bei der Referenzzuteilung wird die Sorte SA-L-SM aufgrund des ungünstigen Dosisbeitrag-zu-Volumen-verhältnisses dem SMA-Lager zugeteilt, obwohl sie gemäss den Resultaten der Rechenfälle dem HAA-Lager (LMA-Teil) zugeteilt werden müsste (s. Kap. 3.3.2).

Anhang 5 Orientierende Sicherheitsbetrachtungen zur Illustration von ausgewählten Eigenschaften der Geologie

A5.1 Einleitung

Im vorliegenden Anhang wird der Einfluss ausgewählter Eigenschaften der Geosphäre auf die Radionuklid-Rückhaltung im Hinblick auf die Ableitung von Anforderungen für die entsprechenden Indikatoren mit orientierenden Sicherheitsbetrachtungen illustriert. Dabei handelt es sich um die folgenden Anforderungen: (i) Hydraulische Durchlässigkeit des Wirtgesteins und Transmissivität präferenzieller Freisetzungspfade (A5.2), (ii) Länge der Freisetzungspfade (A5.3), (iii) zu betrachtender Zeitraum[131] (A5.4). Im Anhang A5.5 werden ergänzende vereinfachte Sensitivitätsbetrachtungen zum Einfluss der hydraulischen Durchlässigkeit des Wirtgesteins, der Klufttransmissivität (im Falle von geklüfteten Wirtgesteinen), der Länge der Freisetzungspfade, der Radionuklid-Sorption im Wirtgestein sowie zur Art der Transportpfade und Ausbildung des Porenraums präsentiert. Dabei wird auf die Formulierung der Barriereneffizienz abgestützt, wie sie im Projekt Entsorgungsnachweis verwendet wurde (Kap. 9 in Nagra 2002d).

Mit dem Ziel, das Systemverhalten für ein breites Spektrum generischer geologischer Situationen zu illustrieren, werden in den orientierenden Sicherheitsbetrachtungen Parameterbereiche untersucht, die teilweise weit über die in möglichen Standortgebieten erwarteten Bereiche hinausgehen. Dies betrifft insbesondere die gewählten Parameterbereiche für die hydraulische Durchlässigkeit (10^{-13} bis 10^{-7} m/s) sowie die Transmissivität (10^{-10} bis 10^{-7} m^2/s), die Länge (1 bis 100 m bzw. fallweise bis 1000 m) und die Anzahl präferenzieller Freisetzungspfade (bis zu 4 Störungszonen senkrecht zur Achse einer SMA/LMA-Lagerkammer mit typischen Längen von 100 – 200 m). Das für die orientierenden Sicherheitsbetrachtungen verwendete Inventar entspricht dem MIRAM-Referenzszenario „50 Jahre KKW-Betrieb“ (Nagra 2007). Die Abfälle von allfälligen zukünftigen KKW (Leichtwasser-Reaktoren) sind denjenigen der bestehenden KKW sehr ähnlich bzgl. ihres Nuklid- und Materialinventars. Deshalb sind die Resultate der orientierenden Sicherheitsbetrachtungen auch für das umhüllende Abfallinventar repräsentativ.

A5.2 Hydraulische Durchlässigkeit des Wirtgesteins und Transmissivität präferenzieller Freisetzungspfade

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über die Resultate der orientierenden Sicherheitsbetrachtungen zur hydraulischen Durchlässigkeit des Wirtgesteins und zur Transmissivität präferenzieller Freisetzungspfade. Fig. A5.2-1 zeigt die Resultate für ein homogen-poröses Wirtgestein für das SMA- bzw. HAA-Lager und für die beiden betrachteten Abfallzuteilungsvarianten. Die Resultate basieren auf einer Transportpfadlänge im Wirtgestein von einigen Dekametern (in der Regel 40 m); wie in Kap. A5.3 gezeigt wird, hat die Transportpfadlänge in diesem Wertebereich nur einen untergeordneten Einfluss auf die berechneten Dosen.

Für das SMA-Lager und für den LMA-Teil des HAA-Lagers wurde der Einfluss des Wasserflusses durch das Endlager auf die Zementdegradation berücksichtigt (s. Kap. 2.5.3.1). Für die BE und HAA wurde im Referenzfall unterstellt, dass die Bentonitverfüllung auch bei den höheren hydraulischen Durchlässigkeiten resp. Klufttransmissivitäten intakt bleibt. Um den Effekt einer allfälligen Bentonitdegradation durch erhöhte Wasserflüsse abzuschätzen, wurden für ein homogen-poröses Wirtgestein mit hydraulischen Durchlässigkeiten von 10^{-9} m/s, 10^{-8} m/s und 10^{-7} m/s für die BE und HAA ergänzende Rechenfälle definiert, in denen eine degradierte Ben-

[131] Davon abgeleitet: Mindestanforderungen bzgl. Erosionsraten und Überdeckung des geologischen Tiefenlagers zum Zeitpunkt der Einlagerung der Abfälle.

tonit-Barriere (keine Sorption, keine Löslichkeitslimiten, Diffusionskoeffizient von Wasser) und erhöhte Auflöseraten für die Abfallmatrix unterstellt wurden. Die entsprechenden Resultate sind in Fig. A5.2-2 dargestellt.

Fig. A5.2-3 zeigt den Einfluss einer postulierten Störungszone[132], welche senkrecht zur Achse der BE-Lagerstollen steht, auf die berechneten Dosen. Die Fig. A5.2-4 bis A5.2-6 illustrieren den Einfluss der Anzahl und der Transmissivität von Störungszonen auf die berechneten Dosen für SMA und LMA für die verschiedenen Abfallzuteilungsvarianten (Referenzzuteilung, alternative Zuteilung).

Die Hauptergebnisse dieser orientierenden Sicherheitsbetrachtungen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die maximalen Summendosen nehmen mit abnehmender hydraulischer Durchlässigkeit erwartungsgemäss ab. In einem äquivalent-porösen Wirtgestein mit einer hydraulischen Durchlässigkeit von 10^{-10} m/s liegen alle berechneten Dosismaxima für SMA (Referenzzuteilung) und HAA um ca. eine bis mehrere Grössenordnungen unter dem Schutzziel von 0.1 mSv/a (vgl. Fig. A5.2-1). Für SMA mit der alternativen Zuteilung bietet auch eine hydraulische Durchlässigkeit von 10^{-9} m/s eine genügende Sicherheit. Für eine hydraulische Durchlässigkeit von 10^{-11} m/s oder geringer wird für SMA und HAA ein grosser Beitrag der geologischen Barriere zur Barrierenwirkung des Gesamtsystems erzielt.
- Erwartungsgemäss nehmen die maximalen Summendosen auch mit abnehmender Transmissivität von Störungszonen ab. Das Schutzziel wird bei einer Transmissivität von 10^{-8} m^2/s (SMA-Referenzzuteilung, vgl. Fig. A5.2-4 mit 2 Störungszonen senkrecht zur Achse der Lagerkavernen) bzw. 10^{-9} m^2/s (HAA inkl. LMA, vgl. Fig. A5.2-3 und A5.2-6; bei BE mit einer Störungszone, bei LMA mit 2 Störungszonen senkrecht zur Achse der Lagerkammern) mit einer gewissen Reserve eingehalten. Für SMA mit einer alternativen Zuteilung wird das Schutzziel auch bei einer Transmissivität von 10^{-7} m^2/s knapp eingehalten (Fig. A5.2-5 mit 2 Störungszonen senkrecht zur Achse der Lagerkavernen). Für Transmissivitäten von 10^{-9} m^2/s oder geringer (SMA Referenzzuteilung, vgl. Fig. A5.2-4) bzw. 10^{-10} m^2/s oder geringer (HAA inkl. LMA, vgl. Fig. A5.2-3 und A5.2-6) wird ein deutlicher Beitrag der geologischen Barriere zur Barrierenwirkung des Gesamtsystems erzielt.
- Fig. A5.2-2 zeigt, dass eine allfällige Bentonitdegradation durch erhöhte Wasserflüsse im HAA-Lager zu signifikant höheren Dosen führt. Diese Resultate werden bei der Festlegung der Anforderungen und Bewertungsskalen für die Indikatoren 'Hydraulische Durchlässigkeit' und 'Transmissivität präferenzieller Freisetzungspfade' in Anhang 1 mitberücksichtigt.

[132] Eine Störungszone stellt einen präferenziellen Freisetzungspfad dar.

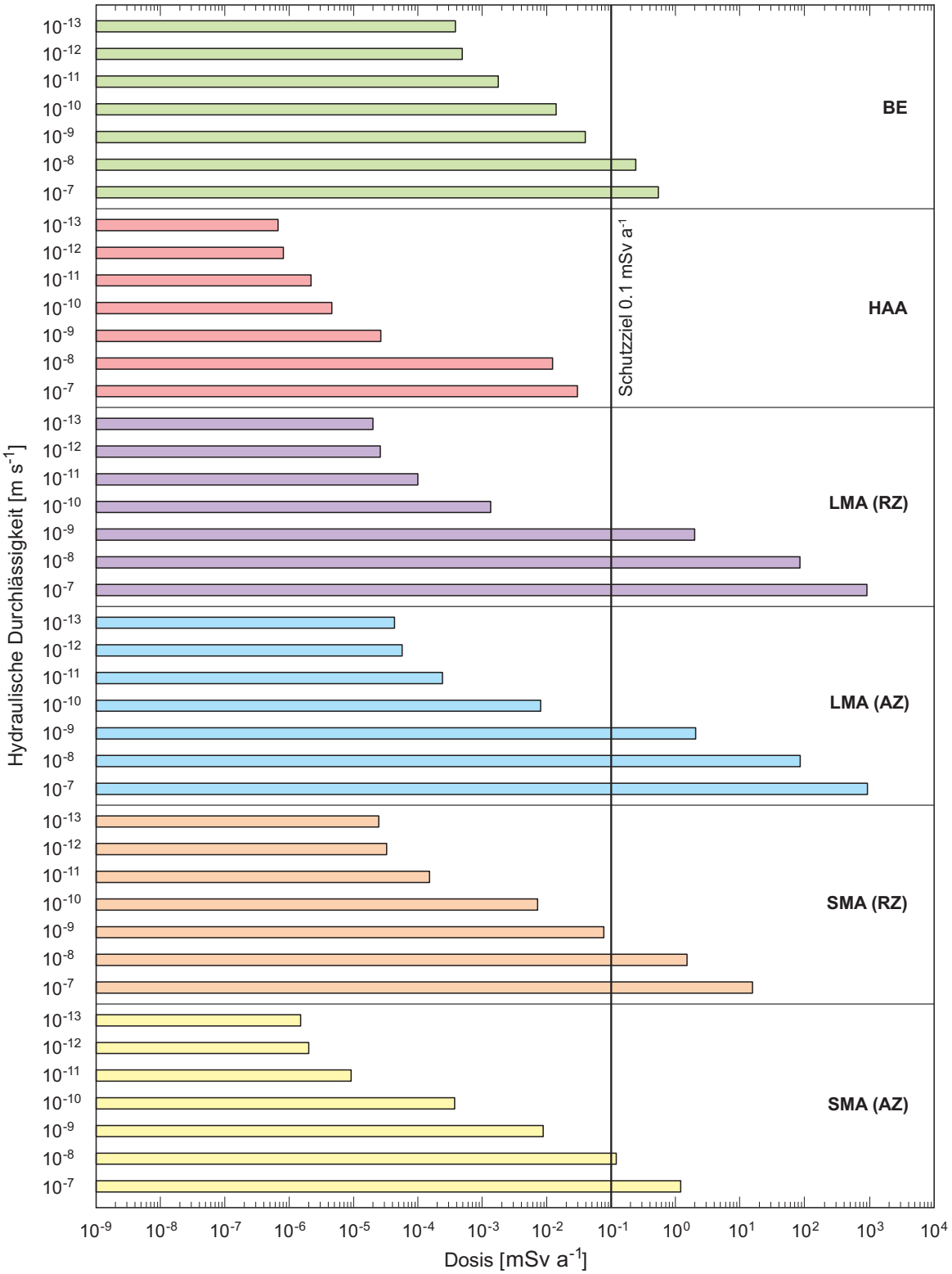


Fig. A5.2-1: Einfluss der hydraulischen Durchlässigkeit eines homogen-porösen Wirtgesteins auf die berechneten Dosismaxima.

i = 0.1 m/m, L = 40 m (BE/HAA) bzw. 50 m (LMA/SMA).

Einschlusszeit: BE/HAA: 10'000 Jahre, LMA: 100 Jahre, SMA: 0 Jahre.

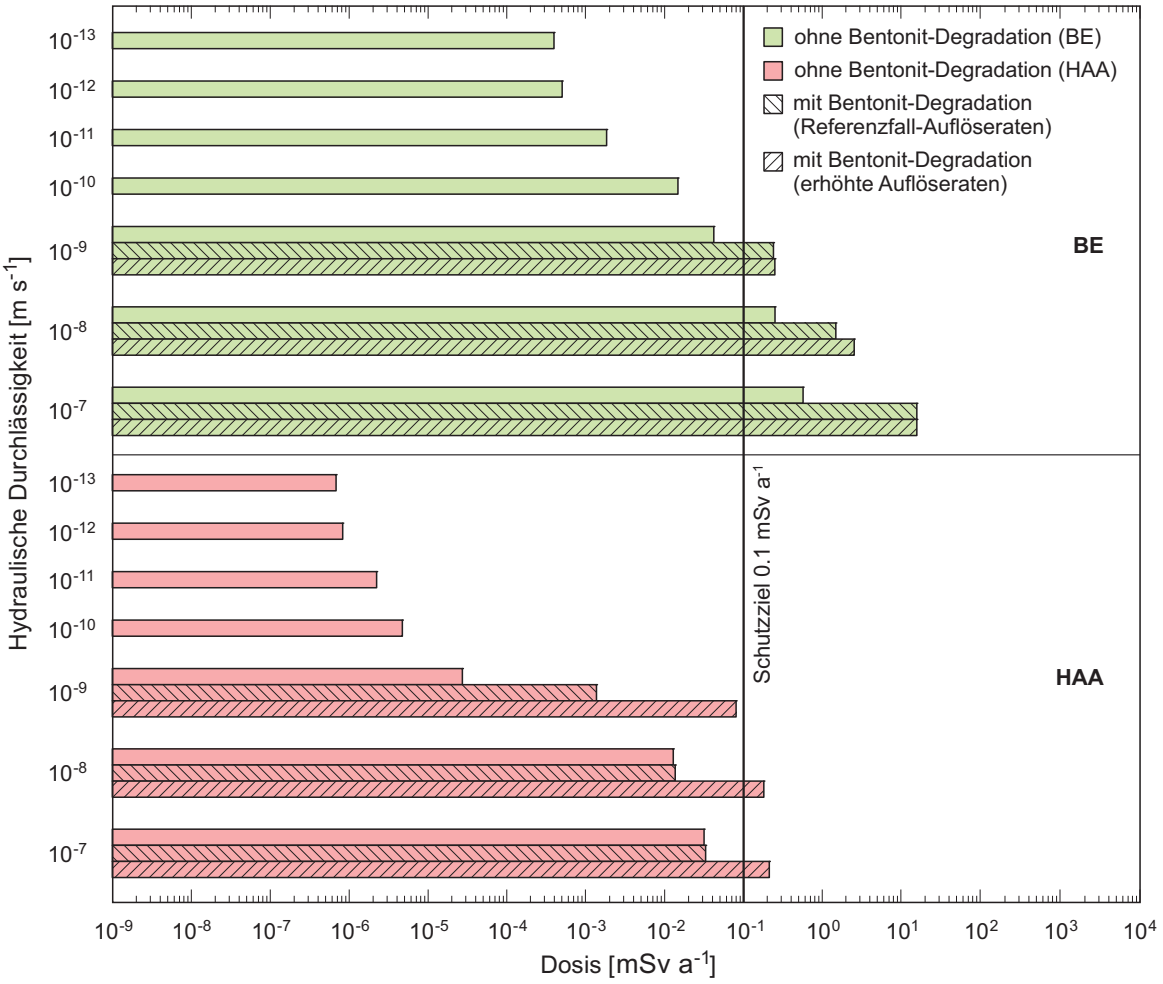


Fig. A5.2-2: Einfluss der hydraulischen Durchlässigkeit eines homogen-porösen Wirtgesteins auf die berechneten Dosismaxima für BE und HAA mit und ohne Bentonit-Degradation.

i = 0.1 m/m, L = 40 m.

Die berechneten Dosismaxima für den Fall ohne Bentonit-Degradation entsprechen den Resultaten für BE und HAA aus Fig. A5.2-1.

Die degradierte Bentonit-Barriere wurde wie folgt konzeptualisiert (nur für hydraulische Durchlässigkeiten von 10^{-9} m/s und höher; für tiefere Werte ist keine Bentonit-Degradation zu erwarten): Keine Sorption, keine Löslichkeitslimiten, Diffusionskoeffizient von Wasser (2×10^{-9} m^2/s).

Auflöseraten BE und HAA: (i) Referenzfall-Auflöseraten (s. Nagra 2002c, Tab. A2.2.2, Tab. A2.3); (ii) erhöhte Auflöseraten: BE: 10 × Referenzfall-Auflöseraten (zeitabhängig); HAA: erhöhte Glasauflöseraten, die den im Labor gemessenen, anfänglichen Glasauflöseraten entsprechen (4.0×10^{-2} kg/(m^2a), s. Nagra 2002c, Tab. A2.3).

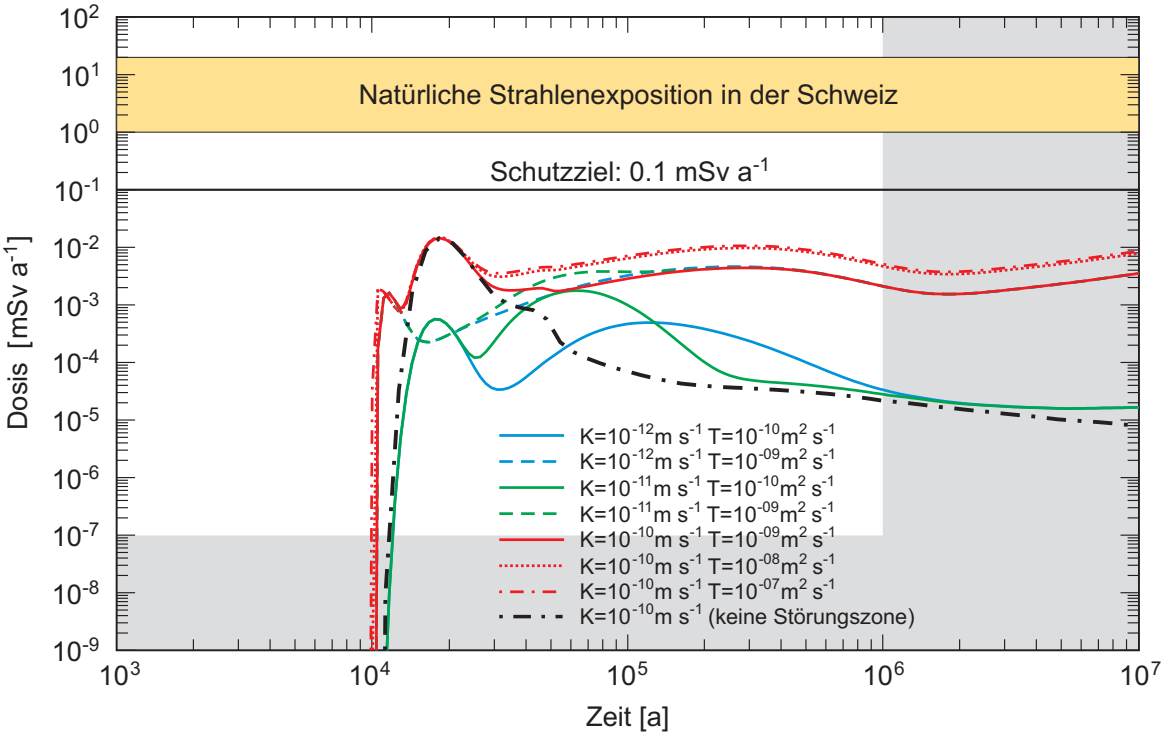


Fig. A5.2-3: Einfluss der Transmissivität einer Störungszone senkrecht zur Achse der Lagerstollen auf die berechnete Dosis für das HAA-Lager.

Inventar: BE, i = 0.1 m/m, L = 40 m.

Eine Störungszone schneidet die Lagerstollen senkrecht (analog Rechenfall 4.2 in Nagra 2002c); nur 1 BE-Behälter pro Lagerstollen ist von der Störungszone betroffen; die Freisetzung aus allen anderen BE-Behältern erfolgt über das intakte Wirtgestein.

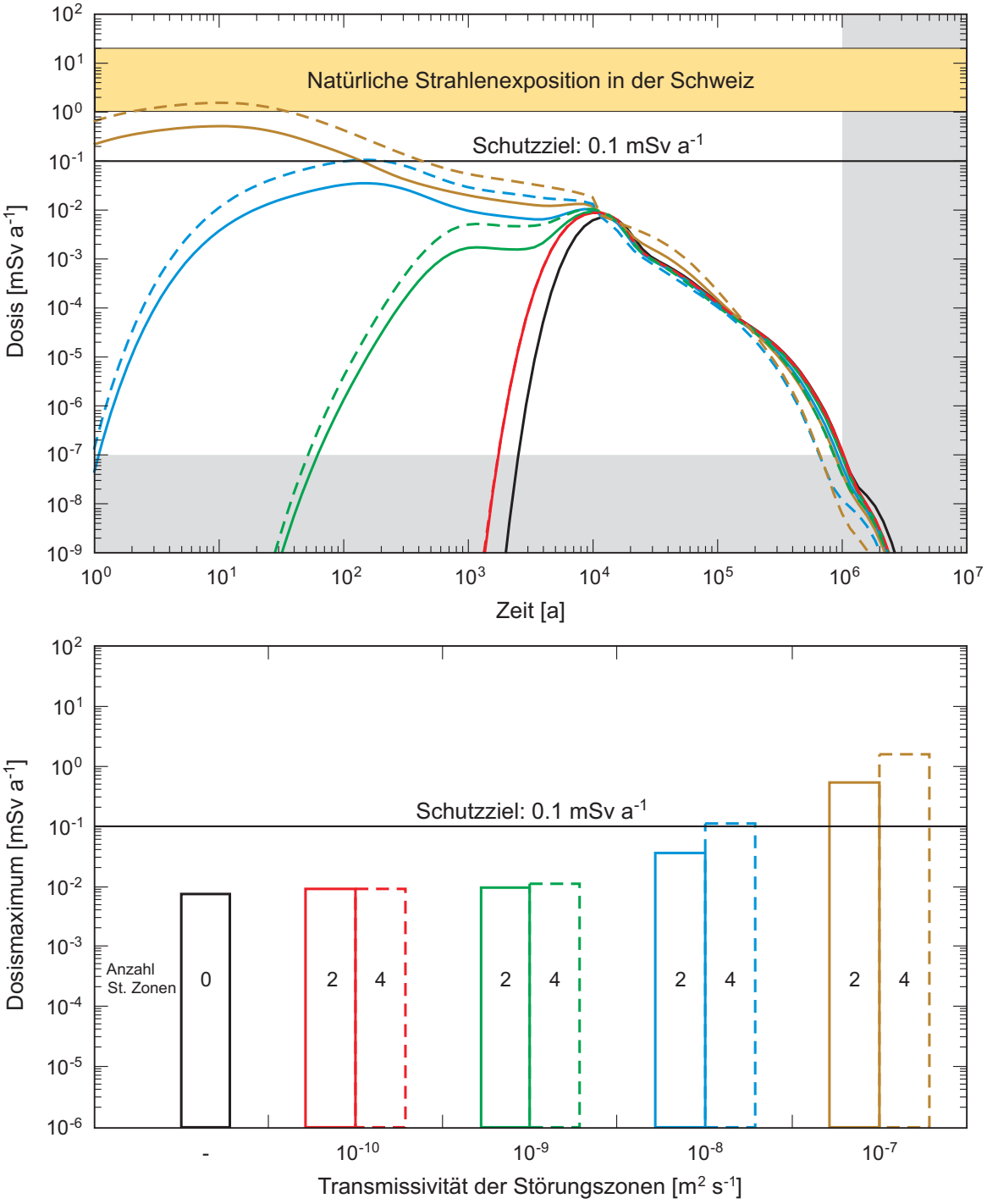


Fig. A5.2-4: Einfluss der Anzahl und Transmissivität von Strörungszonen senkrecht zur Achse der Lagerkavernen auf die berechneten Dosismaxima für das SMA-Lager in einem homogen-porösen Wirtgestein.

Inventar: SMA (Referenzzuteilung), i = 0.1 m/m, K = 10^{-10} m/s.

Die Annahme von vier Störungszonen senkrecht zur Tunnelachse mit typischen Abständen im 100 m Bereich (vgl. Kap. 2.5.4.2) ist bei typischen SMA-Kavernenlängen von 200 m als sehr pessimistisch bzw. hypothetisch einzustufen.

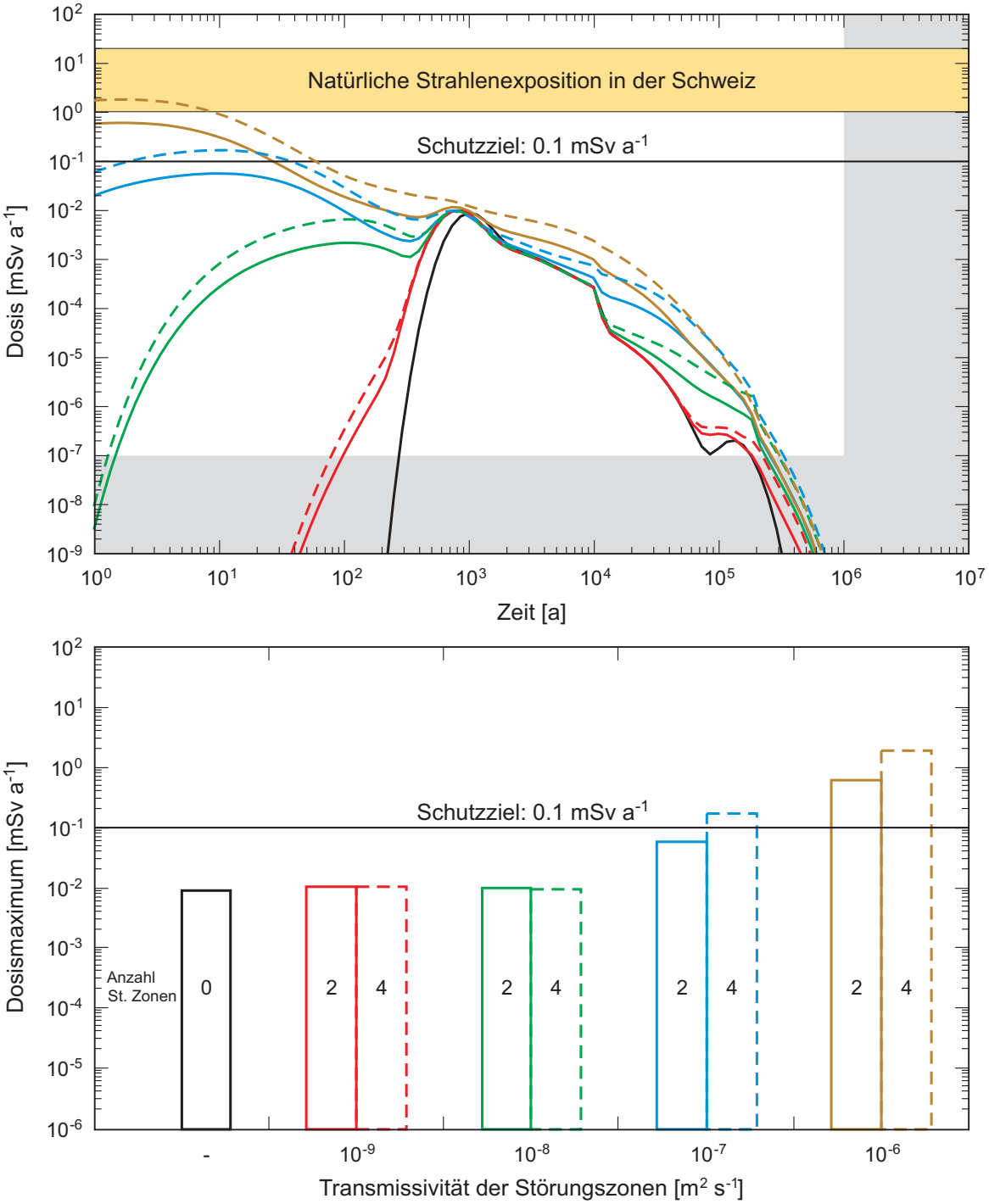


Fig. A5.2-5: Einfluss der Anzahl und Transmissivität von Strörungszonen senkrecht zur Achse der Lagerkavernen auf die berechneten Dosismaxima für das SMA-Lager in einem homogen-porösen Wirtgestein.

Inventar: SMA (alternative Zuteilung), i = 0.1 m/m, K =10^{-9} m/s.

Die Annahme von vier Störungszonen senkrecht zur Tunnelachse mit typischen Abständen im 100 m Bereich (vgl. Kap. 2.5.4.2) ist bei typischen SMA-Kavernenlängen von 200 m als sehr pessimistisch bzw. hypothetisch einzustufen.

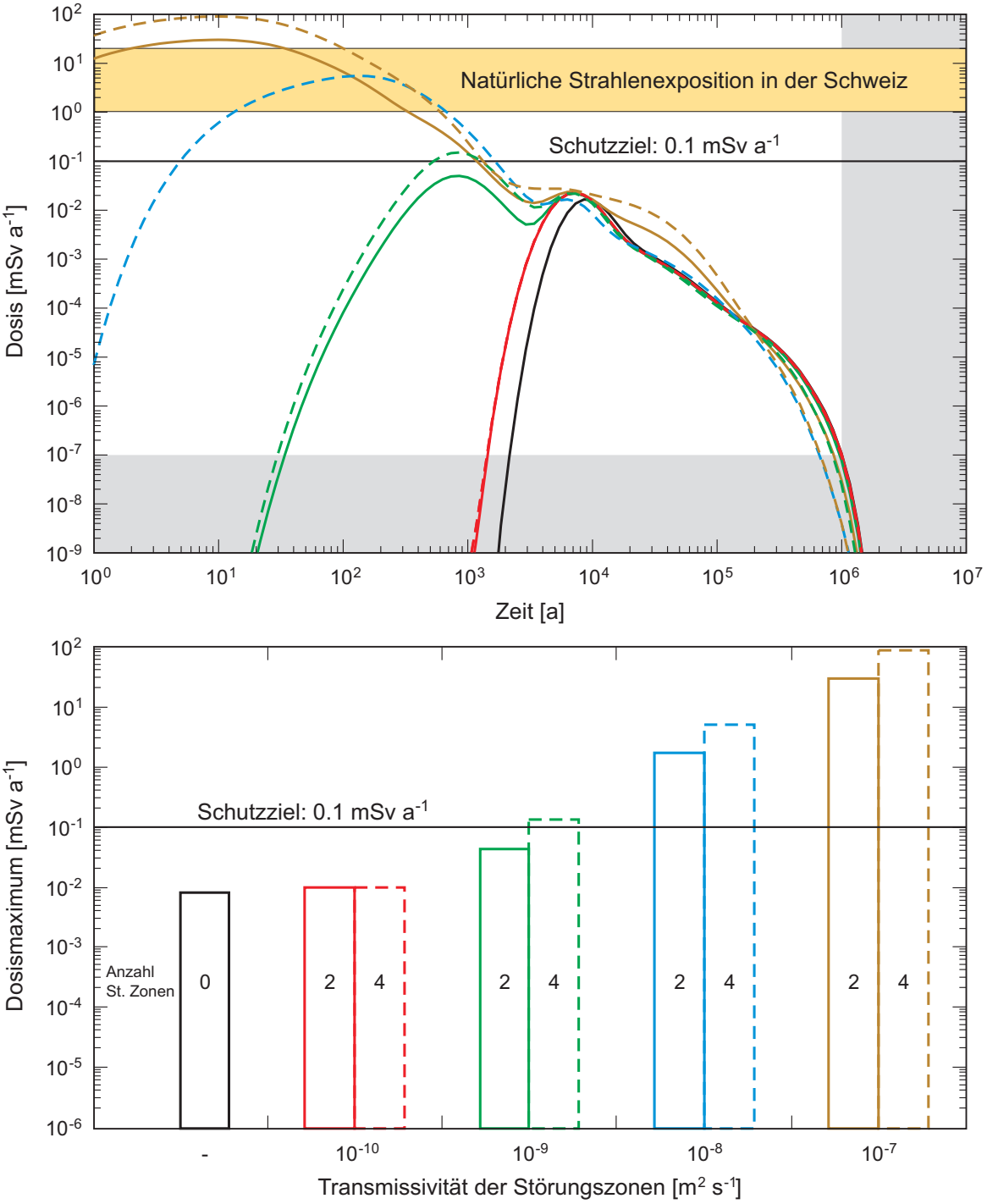


Fig. A5.2-6: Einfluss der Anzahl und Transmissivität von Strörungszonen senkrecht zur Tunnelachse auf die berechneten Dosismaxima für das LMA-Lager in einem homogen-porösen Wirtgestein.

Inventar: LMA (alternative Zuteilung), i = 0.1 m/m, K = 10^{-10} m/s.

Die Annahme von zwei und insbesondere vier Störungszonen senkrecht zur Tunnelachse mit typischen Abständen im 100 m Bereich (vgl. Kap. 2.5.4.2) ist bei typischen LMA-Tunnellängen von 100 m als sehr pessimistisch bzw. hypothetisch einzustufen.

A5.3 Länge der Freisetzungspfade

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über die Resultate der orientierenden Sicherheitsbetrachtungen zur Länge der Freisetzungspfade für verschiedene generische Wirtgesteinstypen und -situationen. Fig. A5.3-1 bis A5.3-6 zeigen die Resultate für das SMA- bzw. HAA-Lager für ein homogen-poröses Wirtgestein mit hydraulischen Durchlässigkeiten von 10^{-13} m/s und 10^{-10} m/s. Ein Wert von 10^{-13} m/s entspricht einem sehr gering durchlässigen Wirtgestein (vergleichbar dem Opalinuston); in solchen Wirtgesteinen werden vergleichsweise hohe hydraulische Gradienten erwartet (Annahme: 1 m/m). Ein Wert von 10^{-10} m/s entspricht der Mindestanforderung an die hydraulische Durchlässigkeit für SMA (Referenzzuteilung) und HAA; in solchen Wirtgesteinen werden kleinere hydraulische Gradienten erwartet (Annahme: 0.1 m/m).

Fig. A5.3-7/A5.3-8 zeigen Resultate für das SMA-Lager für ein kleinräumig geklüftetes Wirtgestein und Fig. A5.3-9/A5.3-10 zeigen entsprechende Resultate für ein homogen-poröses Wirtgestein mit zwei Störungszonen senkrecht zur Achse der Lagerkavernen.

Die Hauptergebnisse dieser orientierenden Sicherheitsbetrachtungen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Mit einer Transportpfadlänge von ca. 40 m wird in einem äquivalent-porösen Wirtgestein mit sehr geringer Durchlässigkeit (vergleichbar dem Opalinuston) für SMA und HAA ein grosser Beitrag der geologischen Barriere zur Barrierenwirkung des Gesamtsystems erzielt (vgl. die Dosisunterschiede in Fig. A5.3-1, A5.3-3 und A5.3-5 für Transportpfadlängen von 1 m und 40 m).
- Die maximalen Summendosen nehmen mit zunehmender Transportpfadlänge erwartungsgemäss ab. Die erzielbaren Dosisreduktionen im relevanten Wertebereich der Transportpfadlänge (Dekameterbereich) sind allerdings vergleichsweise gering: In homogen-porösen Wirtgesteinen mit sehr niedriger Durchlässigkeit (diffusionsdominierte Freisetzung) reduziert sich die maximale Dosis beispielsweise um bis zu ca. eine halbe Grössenordnung, wenn die Transportpfadlänge von 20 m auf 40 m erhöht wird (Fig. A5.3-1, A5.3-3 und A5.3-5), während die erzielbaren Dosisreduktionen für höher durchlässige (homogen-poröse, kleinräumig geklüftete oder Störungszonen enthaltende) Wirtgesteine relativ klein ausfallen (Fig. A5.3-2, A5.3-4 und A5.3-6 bis A5.3-10).

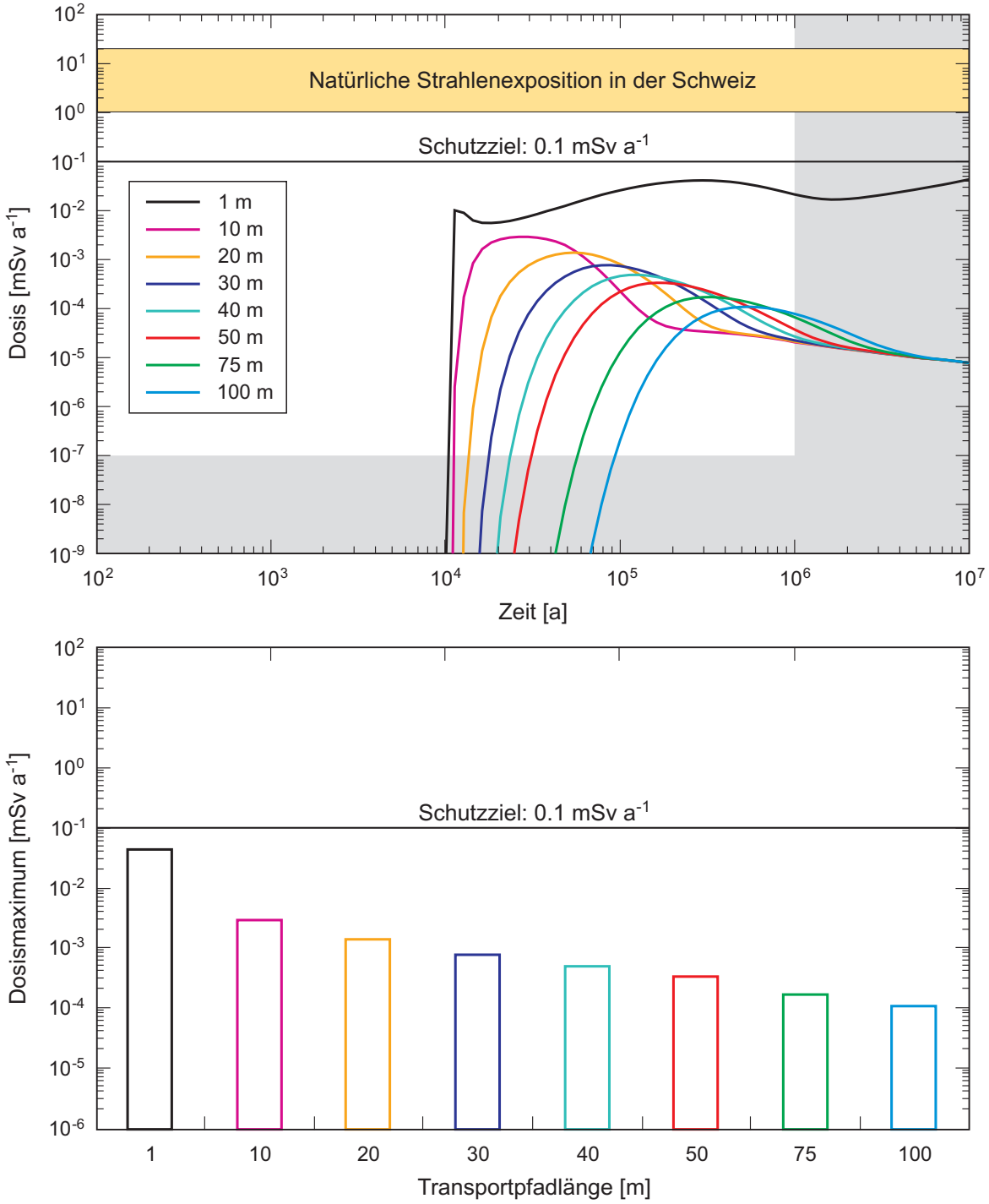


Fig. A5.3-1: Einfluss der Transportpfadlänge auf die berechneten Dosismaxima für ein HAA-Lager (BE) in einem homogen-porösen Wirtgestein für K = 10^{-13} m/s.

Inventar: BE, i = 1 m/m, K = 10^{-13} m/s.

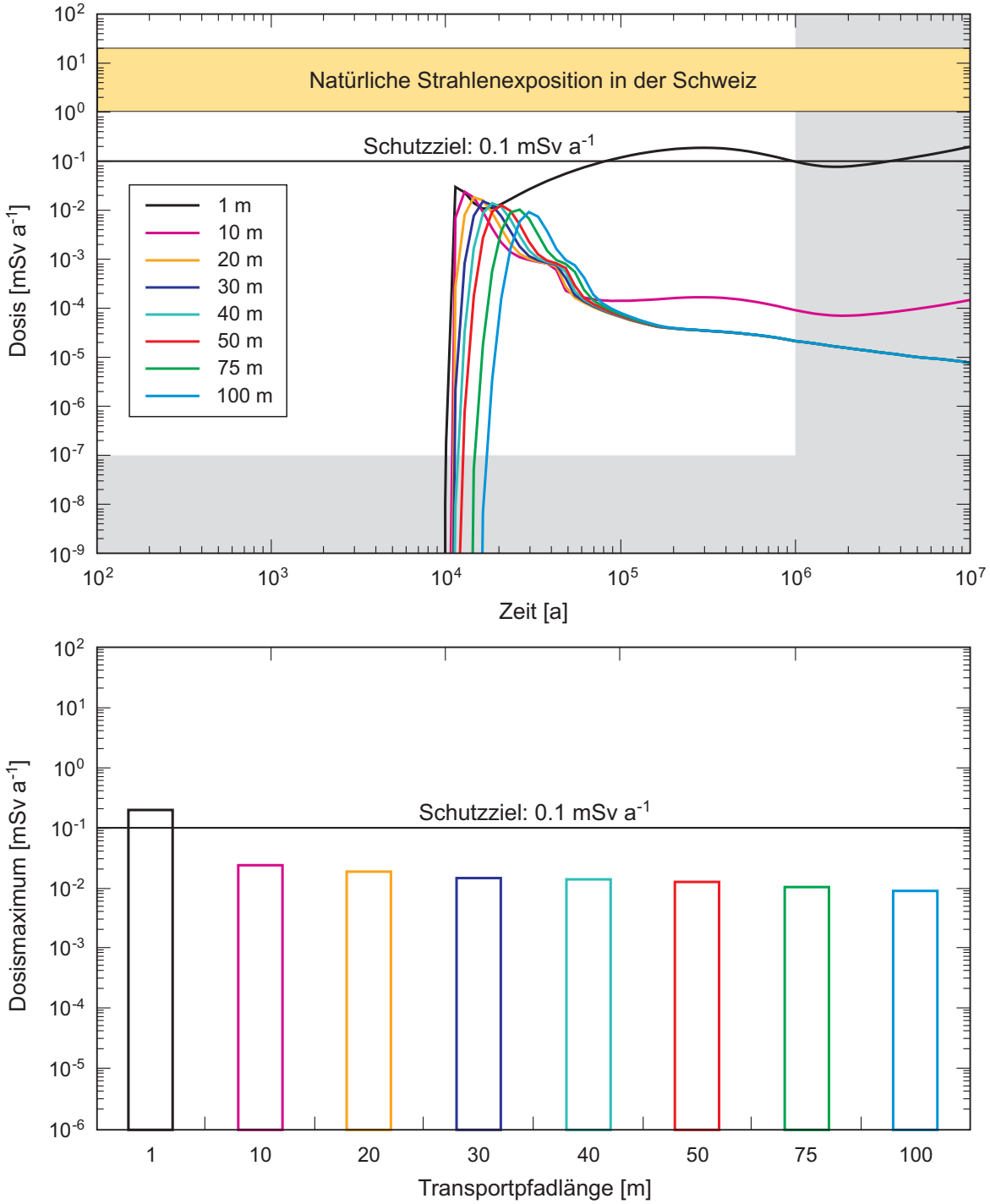


Fig. A5.3-2: Einfluss der Transportpfadlänge auf die berechneten Dosismaxima für ein HAA-Lager (BE) in einem homogen-porösen Wirtgestein für $K = 10^{-10}$ m/s.

Inventar: BE, i = 0.1 m/m, $K = 10^{-10}$ m/s.

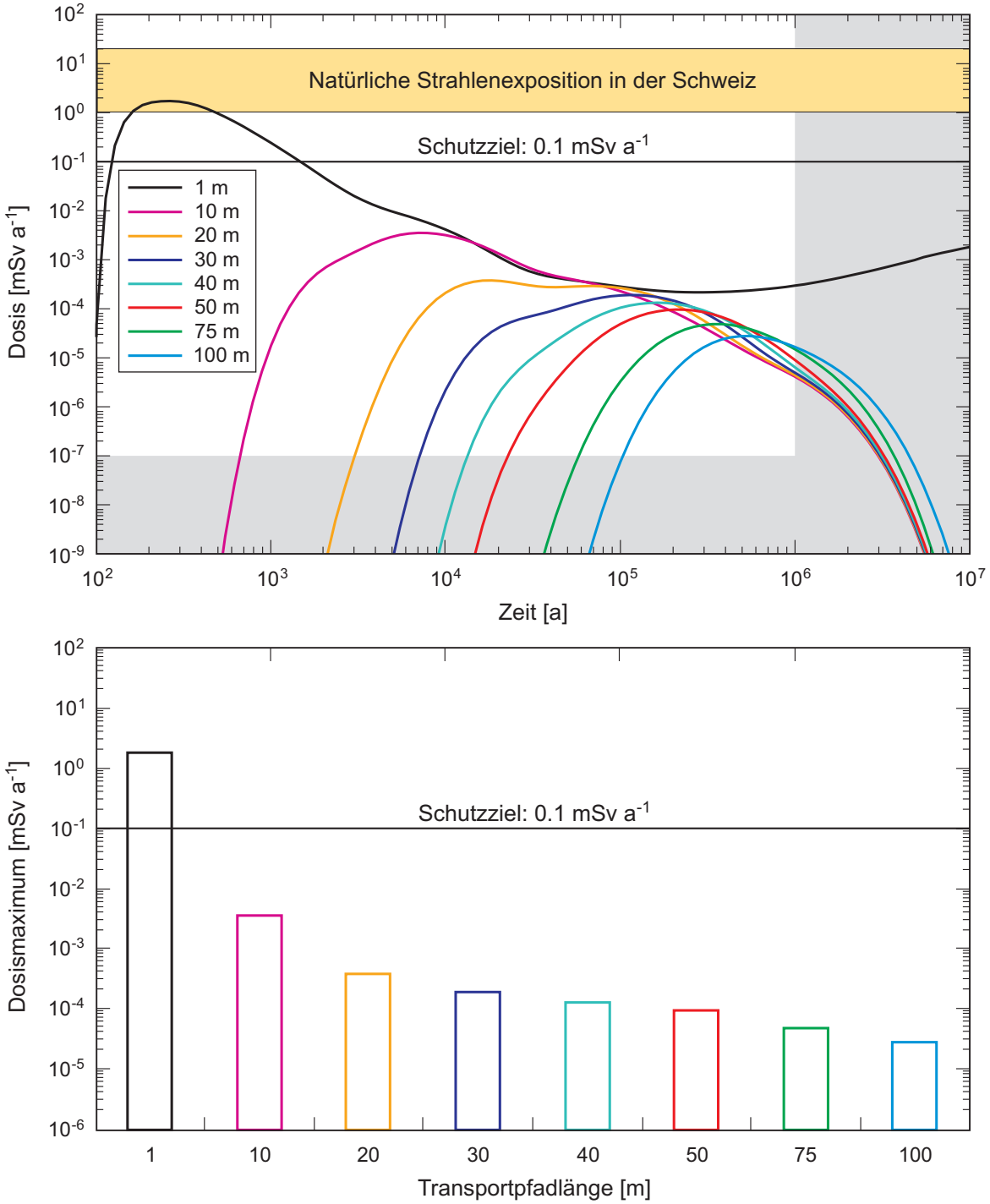


Fig. A5.3-3: Einfluss der Transportpfadlänge auf die berechneten Dosismaxima für ein HAA-Lager (LMA) in einem homogen-porösen Wirtgestein für $K = 10^{-13}$ m/s.

Inventar: LMA (alternative Zuteilung), i = 1 m/m, $K = 10^{-13}$ m/s.

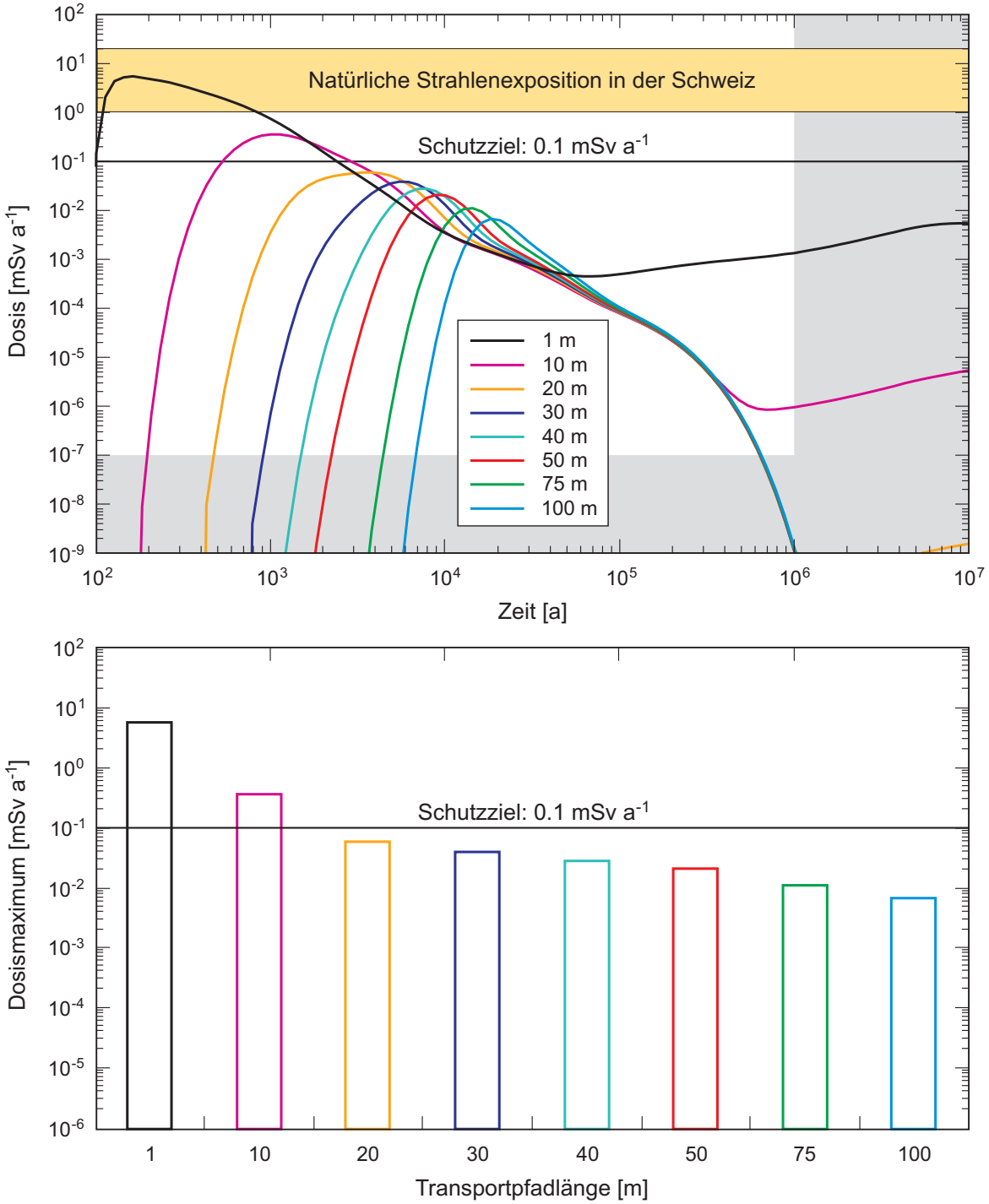


Fig. A5.3-4: Einfluss der Transportpfadlänge auf die berechneten Dosismaxima für ein HAA-Lager (LMA) in einem homogen-porösen Wirtgestein für $K = 10^{-10}$ m/s.

Inventar: LMA (alternative Zuteilung), i = 0.1 m/m, $K = 10^{-10}$ m/s.

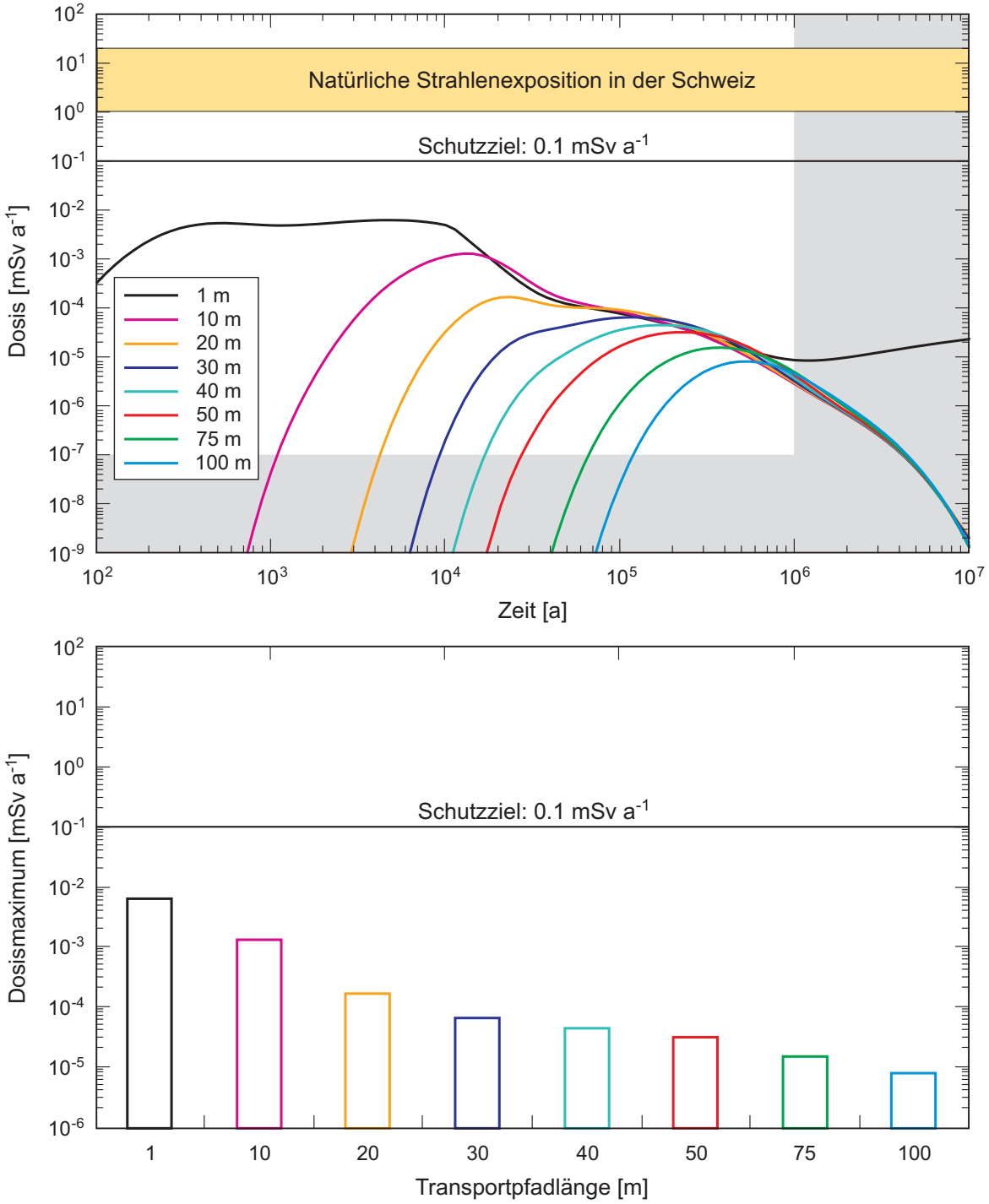


Fig. A5.3-5: Einfluss der Transportpfadlänge auf die berechneten Dosismaxima für ein SMA-Lager in einem homogen-porösen Wirtgestein für $K = 10^{-13}$ m/s.

Inventar: SMA (Referenzzuteilung), i = 1 m/m, $K = 10^{-13}$ m/s.

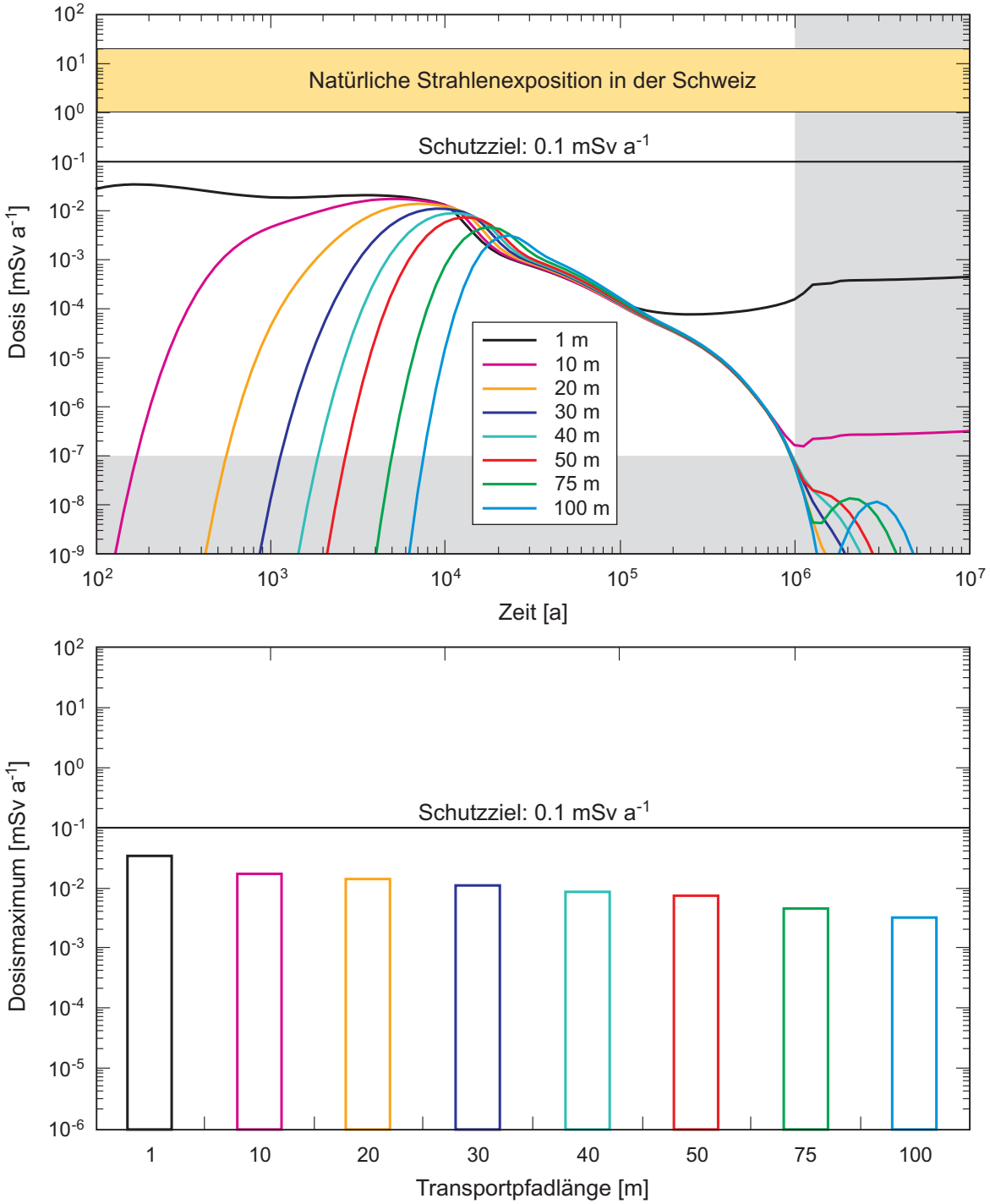


Fig. A5.3-6: Einfluss der Transportpfadlänge auf die berechneten Dosismaxima für ein SMA-Lager in einem homogen-porösen Wirtgestein für $K = 10^{-10}$ m/s.

Inventar: SMA (Referenzzuteilung), i = 0.1 m/m, $K = 10^{-10}$ m/s.

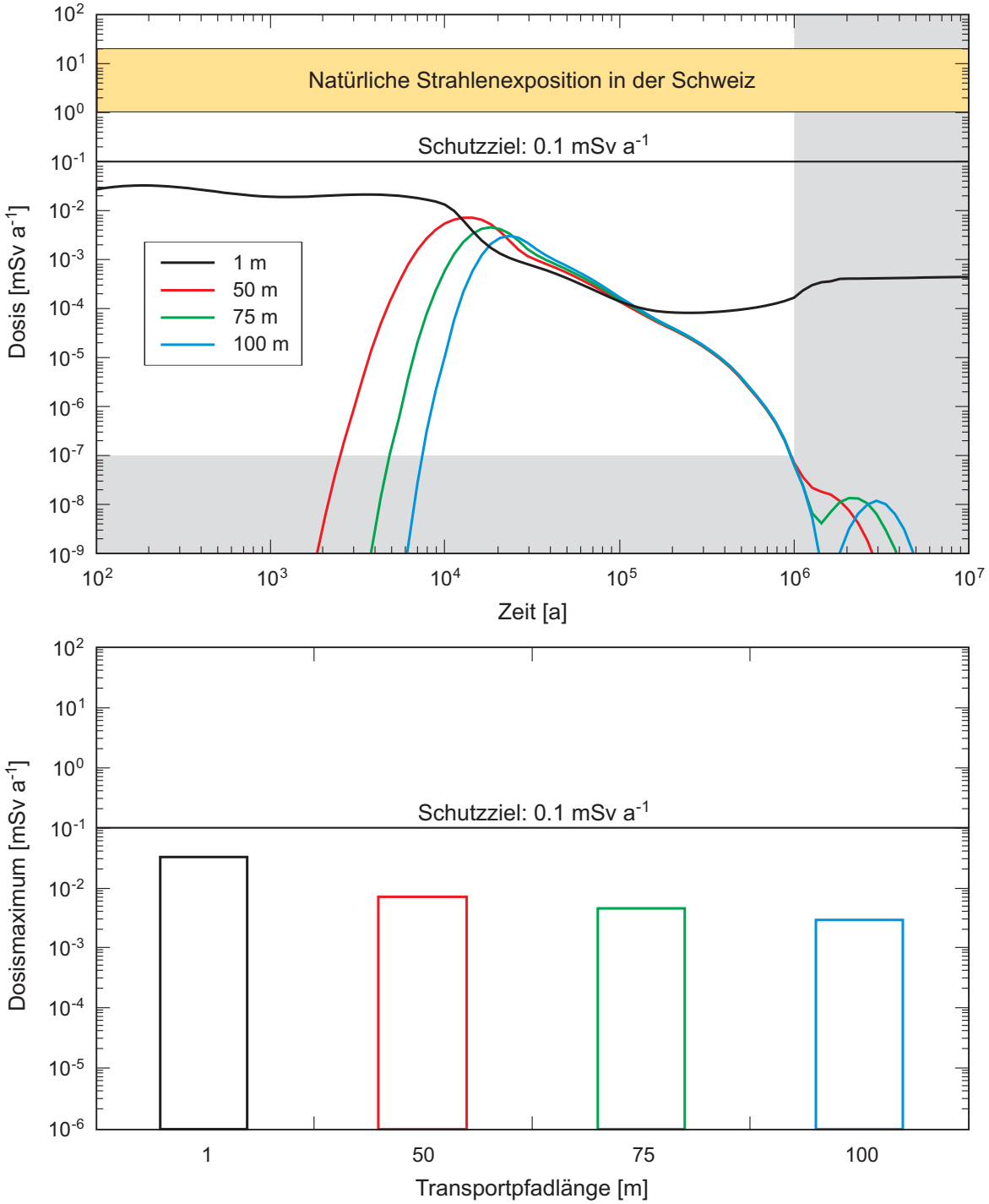


Fig. A5.3-7: Einfluss der Transportpfadlänge auf die berechneten Dosismaxima für ein SMA-Lager in einem kleinräumig geklüfteten Wirtgestein für $K = 10^{-10}$ m/s.

Inventar: SMA (Referenzzuteilung), i = 0.1 m/m, $K = 10^{-10}$ m/s, T (Kluft) = 10^{-10} m^2/s, Kluftabstand = 1 m.

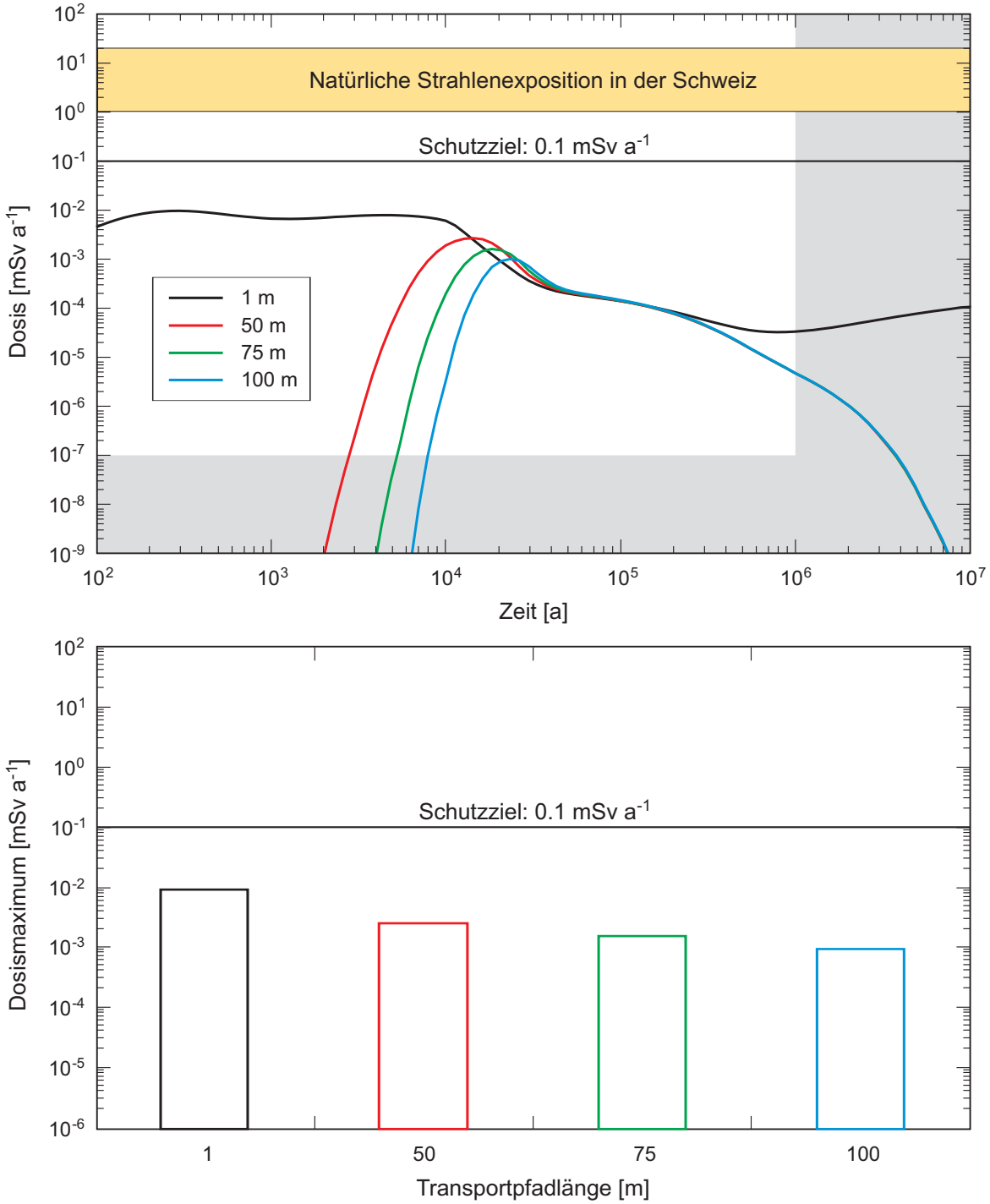


Fig. A5.3-8: Einfluss der Transportpfadlänge auf die berechneten Dosismaxima für ein SMA-Lager in einem kleinräumig geklüfteten Wirtgestein für $K = 10^{-11}$ m/s.

Inventar: SMA (Referenzzuteilung), i = 0.1 m/m, $K = 10^{-11}$ m/s, T (Kluft) = 10^{-10} m^2/s, Kluftabstand = 10 m.

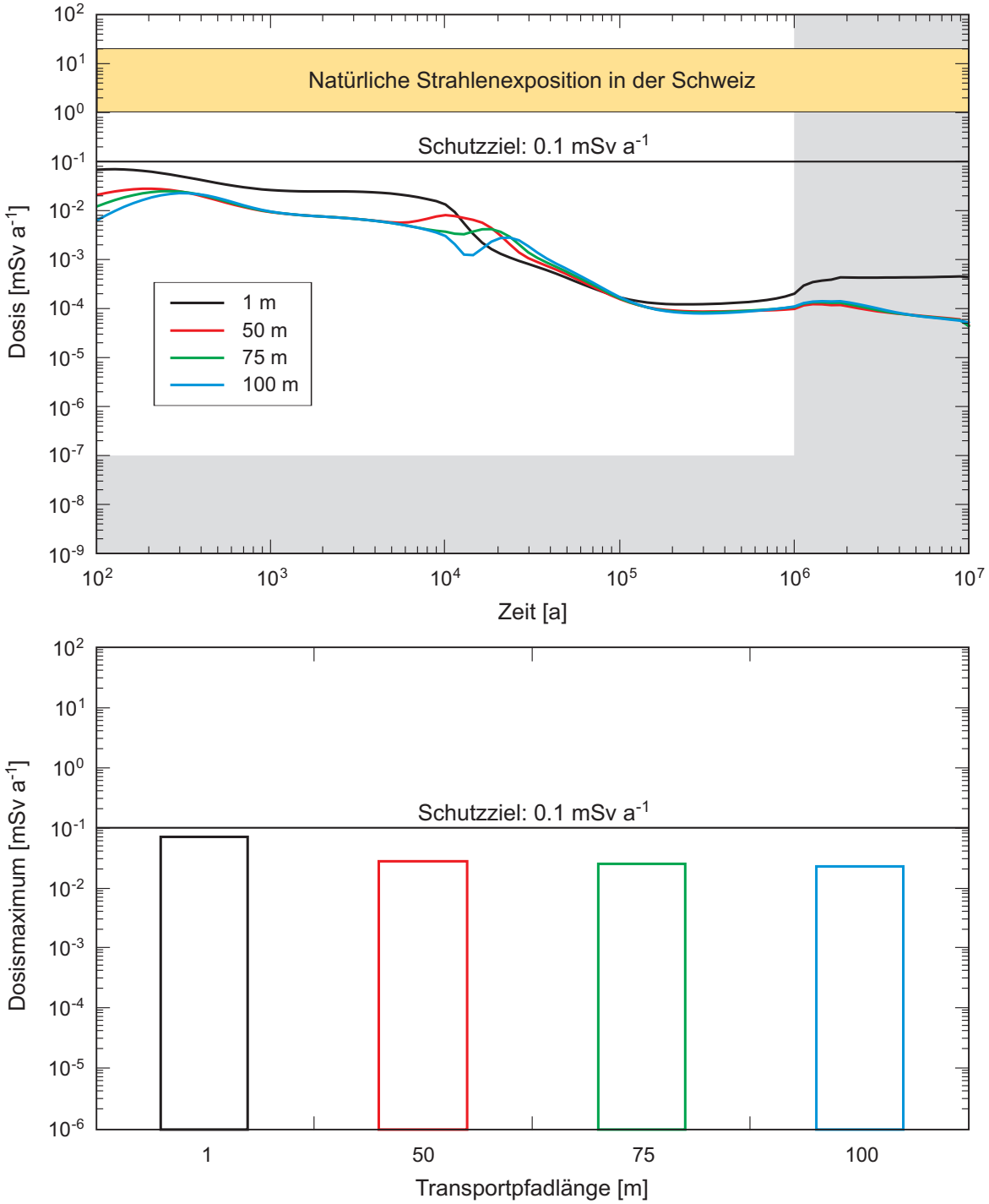


Fig. A5.3-9: Einfluss der Transportpfadlänge auf die berechneten Dosismaxima für ein SMA-Lager in einem homogen-porösen Wirtgestein mit zwei Störungszonen senkrecht zur Kavernenachse für $K = 10^{-10}$ m/s.

Inventar: SMA (Referenzzuteilung), i = 0.1 m/m, $K = 10^{-10}$ m/s,
T (Störungszone) = 10^{8} m^2/s, Abstand der Störungszonen: 100 m.

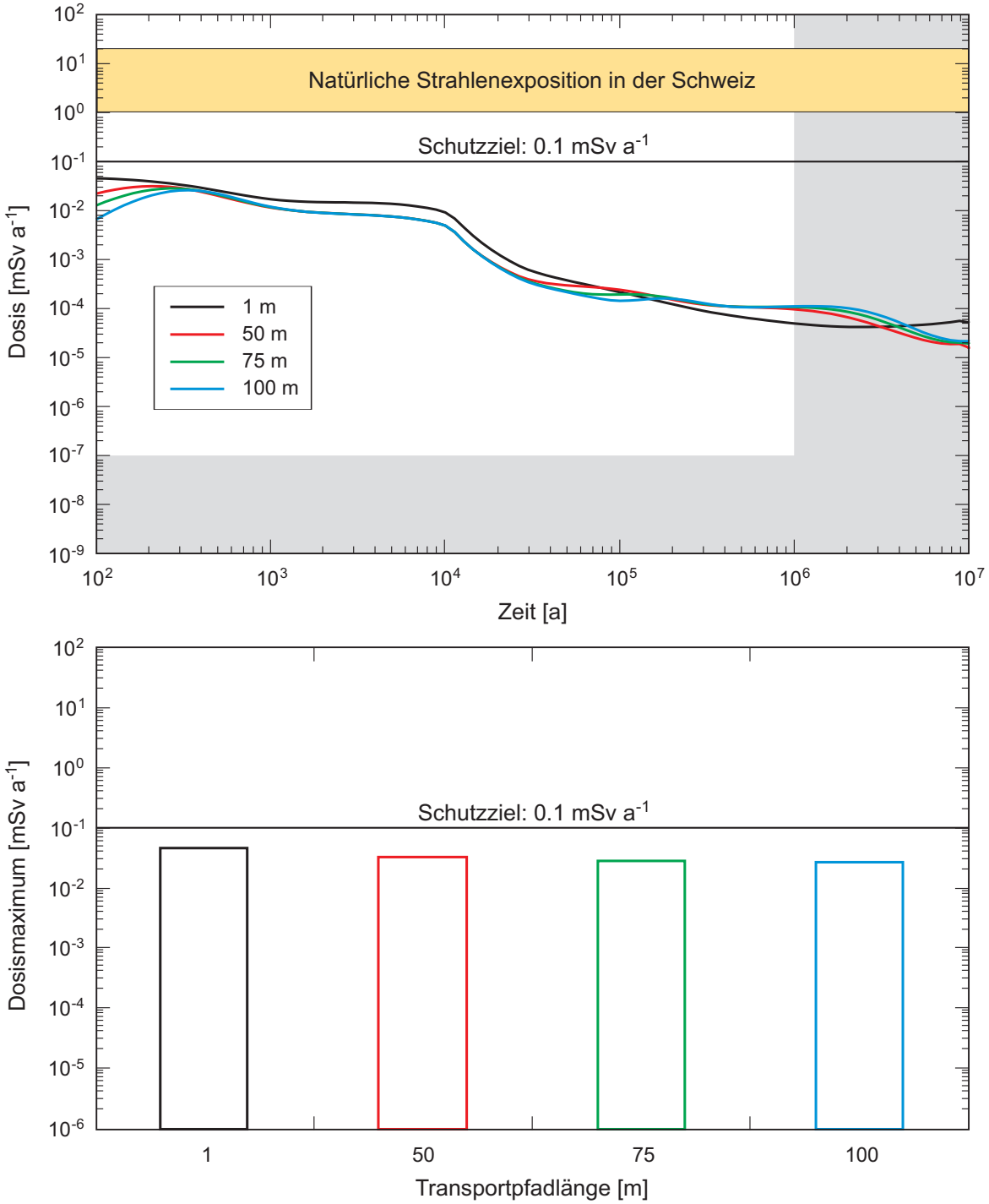


Fig. A5.3-10: Einfluss der Transportpfadlänge auf die berechneten Dosismaxima für ein SMA-Lager in einem homogen-porösen Wirtgestein mit zwei Störungszonen senkrecht zur Kavernenachse für $K = 10^{-11}$ m/s.

Inventar: SMA (Referenzzuteilung), i = 0.1 m/m, $K = 10^{-11}$ m/s,
T (Störungszone) = 10^{8} m^2/s, Abstand der Störungszonen: 100 m.

A5.4 Betrachtungszeitraum

Die Modelle und Inputdaten zu den hier präsentierten Resultaten sind in Kap. 2.5.6 beschrieben.

A5.4.1 Modell 1: Ergebnisse

Modell 1 wird einerseits im Verfahren zur Abfallzuteilung SMA/LMA verwendet (Kapitel 3.3, Rechenfall R5, Fig. 3.3-3, 3.3-4); andererseits zur Illustration des Einflusses des Zeitpunkts, nach welchem das SMA- bzw. HAA-Lager in den Einflussbereich der Erdoberfläche gelangt (Fig. A5.4-1). Fig. A5.4-1 zeigt, dass auch für diese vereinfachten, z.T. konservativen Annahmen der Zeitraum, während dessen die Geosphäre Schutz vor einer erosiven Beeinträchtigung des Barrierensystems bieten muss, für SMA-Lager im Bereich von 10^5 Jahren und für HAA-Lager im Bereich von 10^6 Jahren liegt (berechnete Dosen liegen für den Basisfall im Bereich des Schutzziels). Dies ist auch in Übereinstimmung mit Erfahrungen aus früheren Sicherheitsanalysen (s. Kap. 2.4.3).

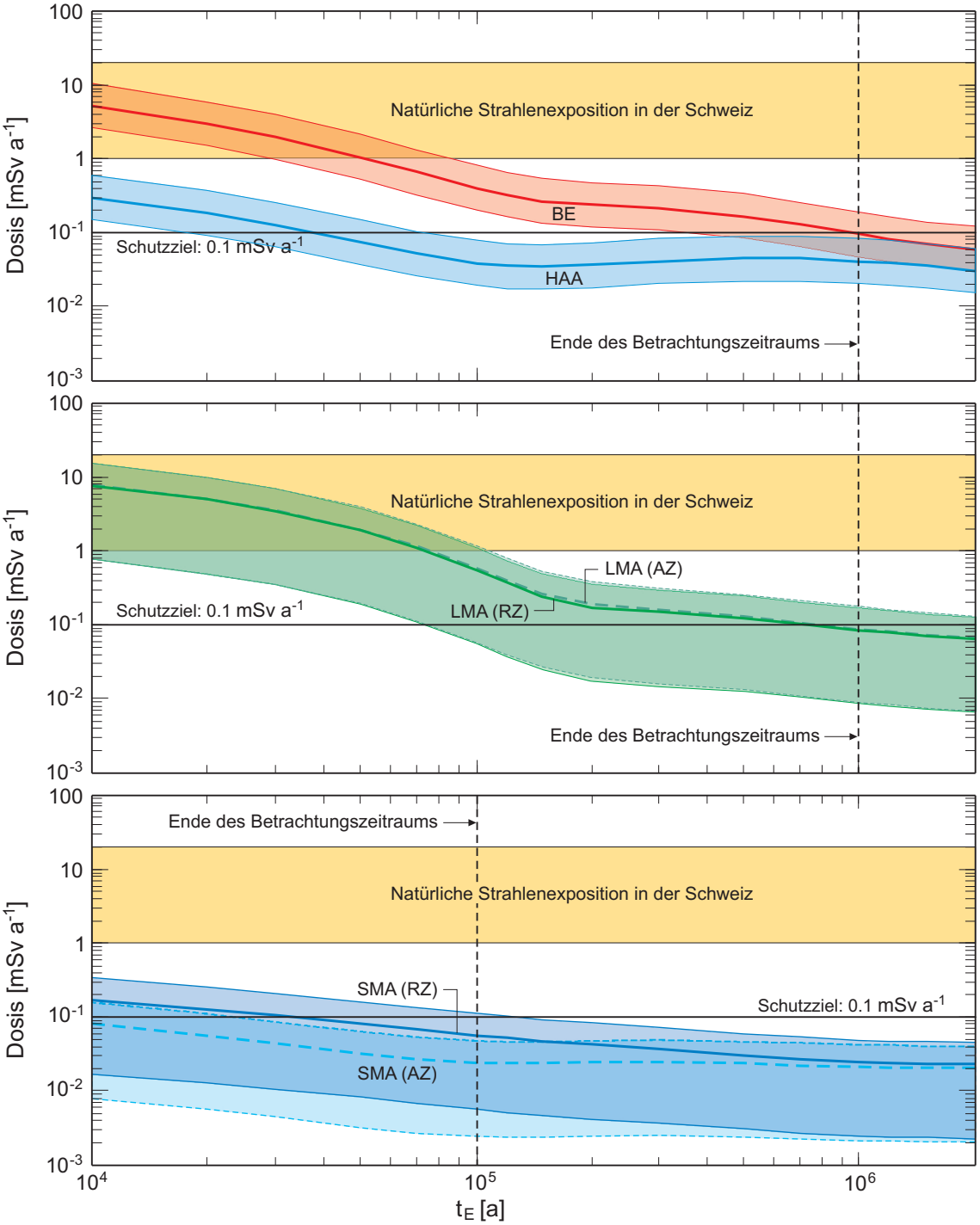


Fig. A5.4-1: Jährliche Strahlendosis gemäss Modell 1 als Funktion des Zeitpunkts t_E, nach welchem das Lager in den Einflussbereich der Erdoberfläche gelangt.

Der markierte Bereich entspricht der Bandbreite der berechneten Dosen aufgrund der Bandbreite der angenommenen Werte für den Wasserfluss im Grundwasserträger und der fraktionalen Freisetzungsrate aus dem LMA/SMA-Nahfeld. Bei dieser Berechnung wurde für die Abfallsorte BA-P-O4 (Uran-Erz und uranhaltige metallische Bruchstücke im LMA-Lager) angenommen, dass das Uran noch vor der Freilegung unter anaeroben Bedingungen zu Uranoxid umgewandelt wird und deshalb dieselbe Auflöserate wie die Brennelemente im HAA-Inventar aufweist ($k = 10^{-5}$ 1/a). RZ: Referenz-Abfallzuteilung; AZ: Alternative Abfallzuteilung (s. Kap. 3.3).

A5.4.2 Modell 2: Ergebnisse

Die mit Modell 2 berechneten jährlichen Strahlendosen durch Direktstrahlung und Trinkwasserkonsum der Bevölkerung im Akkumulationsgebiet sind in den Fig. A5.4-2 bis A5.4-4 dargestellt.

Im Fall des HAA-Lagers (BE- und HAA-Teil) liegen die berechneten Jahresdosen im gesamten betrachteten Zeitraum deutlich unterhalb der typischen Strahlenbelastung aufgrund der natürlichen Radioaktivität in der Schweiz[133], selbst für die ungünstigsten Parameterkombinationen (Fig. A5.4-2). Nach einer Einschlusszeit von ungefähr 10^6 Jahren unterschreitet die berechnete Jahresdosis durch Direktstrahlung für die ungünstigste Parameterkombination das Schutzziel, während die entsprechende Jahresdosis durch Trinkwasserkonsum schon ab ungefähr 30'000 Jahren unter dem Schutzziel liegt.

Im Fall des LMA-Teils des HAA-Lagers (Fig. A5.4-3) sowie des SMA-Lagers (Fig. A5.4-4) unterschreitet die berechnete Jahresdosis im gesamten betrachteten Zeitraum und für alle betrachteten Parametervariationen das Schutzziel deutlich und liegt somit auch weit unterhalb der typischen Strahlenbelastung aufgrund der natürlichen Radioaktivität in der Schweiz.

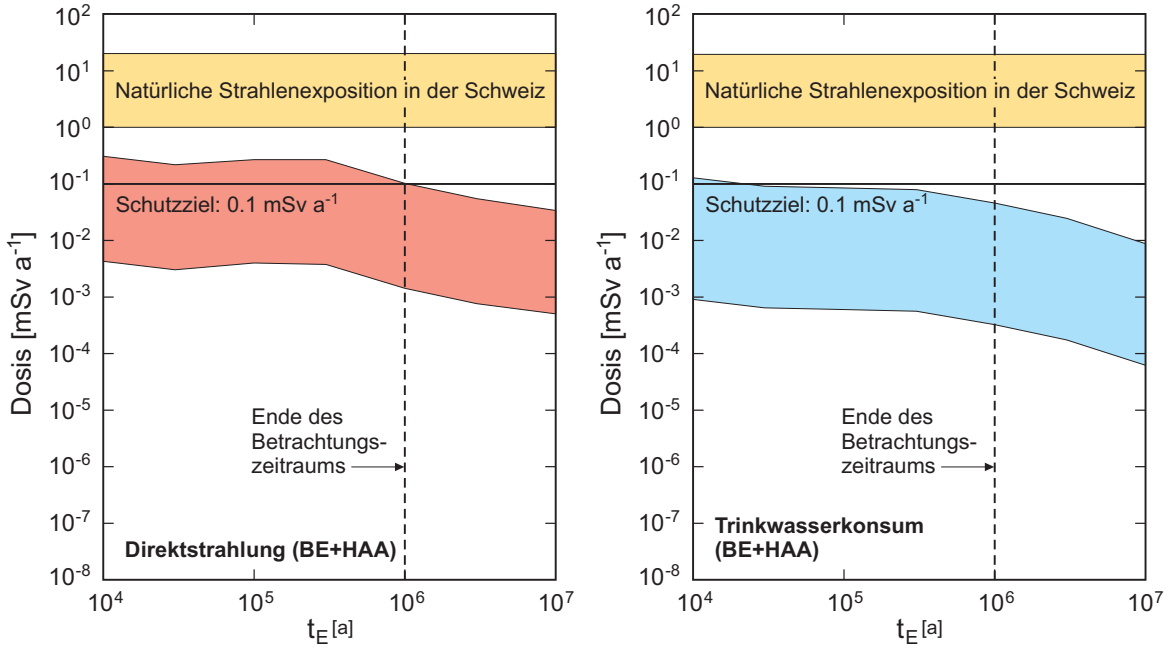


Fig. A5.4-2: Jährliche Strahlendosis gemäss Modell 2 als Funktion des Zeitpunkts der erosiven Freilegung (t_E) für das HAA-Lager (BE + HAA).

Der markierte Bereich entspricht der Bandbreite der berechneten Dosen aufgrund verschiedener Parameterwerte (Erosionsrate, Hangneigungswinkel, Stofffracht im Vorfluter, Verdünnungsfaktor).

[133] In der Schweiz liegen die Dosen infolge der natürlichen Radioaktivität im Bereich von 1 bis 20 mSv/a (BAG 2001).

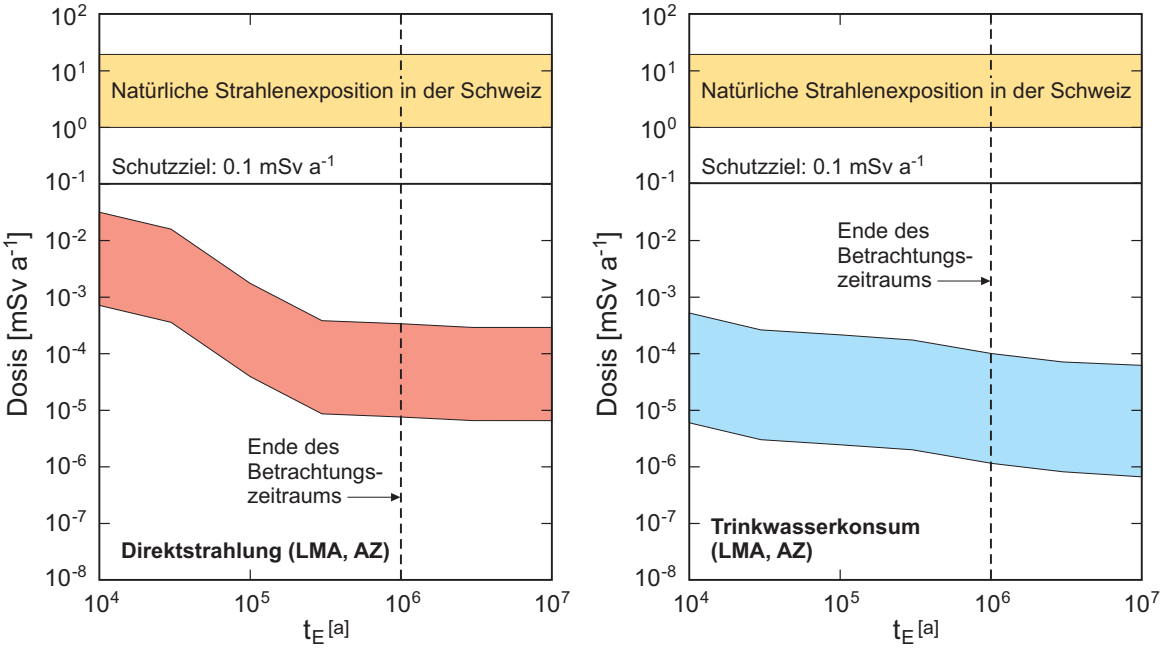


Fig. A5.4-3: Jährliche Strahlendosis gemäss Modell 2 als Funktion des Zeitpunkts der erosiven Freilegung (t_E) für das HAA-Lager (LMA-Teil).

Der markierte Bereich entspricht der Bandbreite der berechneten Dosen aufgrund verschiedener Parameterwerte (Erosionsrate, Hangneigungswinkel, Stofffracht im Vorfluter, Verdünnungsfaktor). Inventar: LMA (alternative Zuteilung).

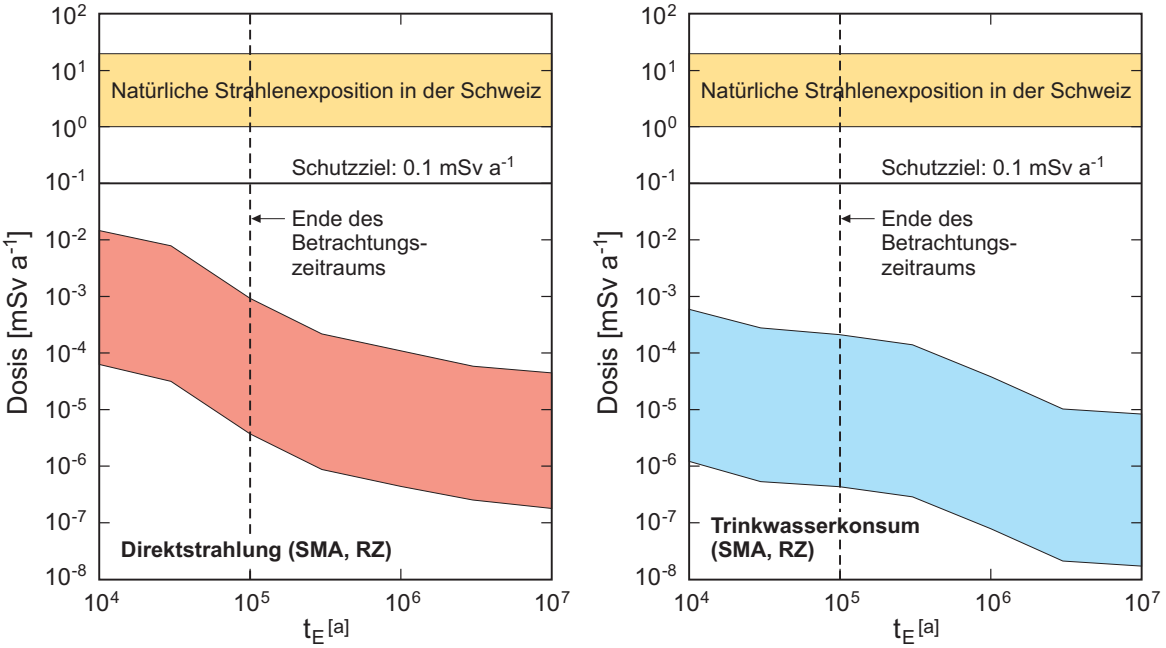


Fig. A5.4-4: Jährliche Strahlendosis gemäss Modell 2 als Funktion des Zeitpunkts der erosiven Freilegung (t_E) für das SMA-Lager.

Der markierte Bereich entspricht der Bandbreite der berechneten Dosen aufgrund verschiedener Parameterwerte (Erosionsrate, Hangneigungswinkel, Stofffracht im Vorfluter, Verdünnungsfaktor). Inventar: SMA (Referenzzuteilung).

A5.4.3 Modell 3: Ergebnisse

Die Resultate sind für das HAA-Lager in Fig. A5.4-5 und für das SMA-Lager in Fig. A5.4-6 dargestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass für die getroffenen Annahmen (insbesondere die Kombination Betrachtungszeitraum, Tiefenlage zum Zeitpunkt der Einlagerung der Abfälle, Erosions- resp. Hebungsraten) die berechneten Dosen sowohl für das HAA-Lager als auch für das SMA-Lager unterhalb des Schutzziels liegen.

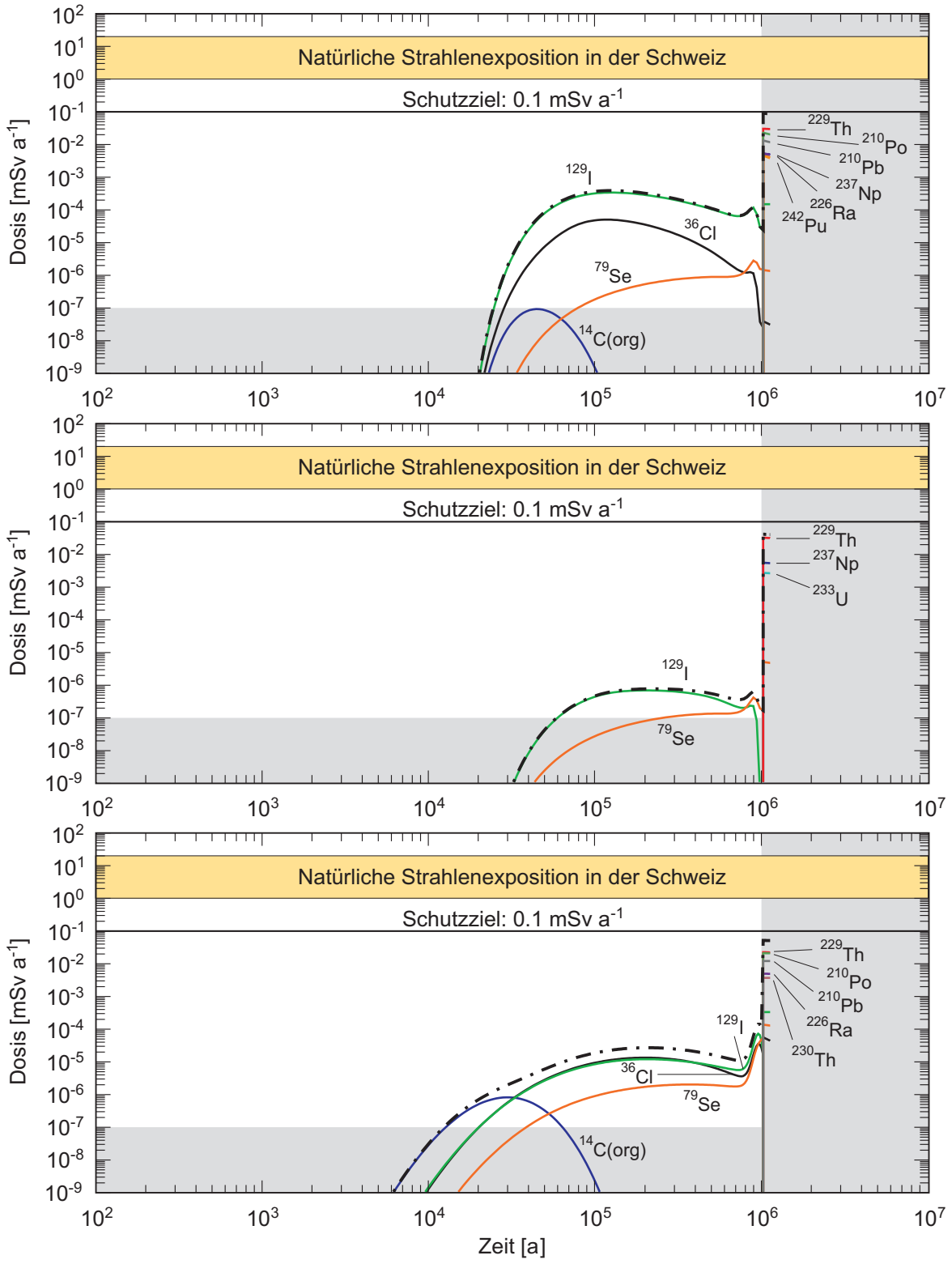


Fig. A5.4-5: Einfluss einer zeitabhängigen Dekompaktion auf ein HAA-Lager am Beispiel des Wirtgesteins Opalinuston gemäss Modell 3.

Oberste Figur: BE; mittlere Figur: HAA; unterste Figur: LMA (alternative Zuteilung). Zeitliche Entwicklung der hydraulischen Durchlässigkeit in Phase I (bis 1 Million Jahre) gemäss Fig. 2.5-9; Phase II gemäss Modell 1 (s. auch Fig. A5.4-1).

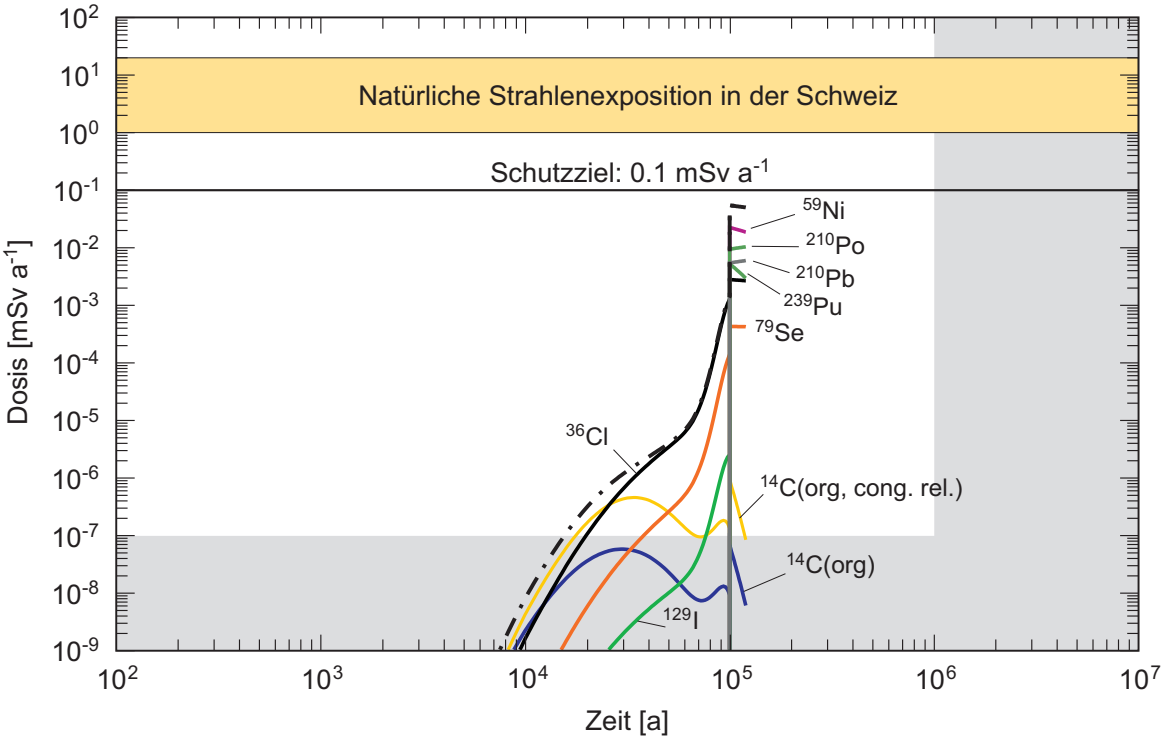


Fig. A5.4-6: Einfluss einer zeitabhängigen Dekompaktion auf ein SMA-Lager am Beispiel des Wirtgesteins Opalinuston gemäss Modell 3.

Inventar: SMA (Referenzzuteilung); zeitliche Entwicklung der hydraulischen Durchlässigkeit in Phase I (bis 10^5 Jahre) gemäss Fig. 2.5-10; Phase II gemäss Modell 1 (s. auch Fig. A5.4-1).

A5.4.4 Zusammenfassung: Betrachtungszeitraum

Als Betrachtungszeitraum wird zunächst aufgrund bisheriger Erfahrungen (Kap. 2.4) 10^5 Jahre (SMA-Lager) bzw. 10^6 Jahre (HAA-Lager) veranschlagt. Die Resultate der Modelle 1 und 2 illustrieren, dass diese Werte vernünftig sind und dass weder durch den Konsum von Trinkwasser noch durch die Direktstrahlung aus dem Boden eine übermässige Strahlenbelastung zu erwarten ist, auch wenn das SMA- bzw. HAA-Lager nach dem entsprechenden Zeitraum durch Hebung und Erosion freigelegt würde. Die Resultate von Modell 3 zeigen beispielhaft, dass für die gewählten Werte für die Betrachtungszeiträume, die Mindestüberdeckungen zum Zeitpunkt der Einlagerung der Abfälle und die maximal zulässigen Erosionsraten unter expliziter Berücksichtigung der Zeitabhängigkeit der hydraulischen Durchlässigkeit aufgrund von Dekompaktion mit anschliessender Freisetzung des Rest-Inventars in einen Grundwasserträger ebenfalls keine übermässige Strahlenbelastung zu erwarten ist.

A5.5 Ergänzende vereinfachte Sensitivitätsbetrachtungen zu ausgewählten Geosphäreneigenschaften

A5.5.1 Einleitung

In Anhang A5.5.1 werden ergänzende vereinfachte Sensitivitätsbetrachtungen zum Einfluss der hydraulischen Durchlässigkeit des Wirtgesteins, der Klufttransmissivität (im Falle von geklüfteten Wirtgesteinen), der Transportpfadlänge, der Radionuklid-Sorption im Wirtgestein sowie der Art der Transportpfade und Ausbildung des Porenraums präsentiert. Dabei wird auf die Formulierung der Barriereneffizienz abgestützt, wie sie im Projekt Entsorgungsnachweis verwendet wurde (Kap. 9 in Nagra 2002d).

Um eine für diesen Zweck geeignete Auswahl der betrachteten Nuklide treffen zu können, wird in den Fig. A5.5-1 bis A5.5-4 die zeitliche Entwicklung der Radiotoxizität für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive Abfälle, LMA und SMA (Referenzzuteilung gemäss Kap. 3.3) dargestellt, inkl. der wichtigsten, zur Gesamttoxizität beitragenden Nuklide. Jedes der gezeigten Nuklide erfüllt das Kriterium, dass es zu irgendeinem Zeitpunkt mehr als 1 % zur Gesamttoxizität beiträgt.

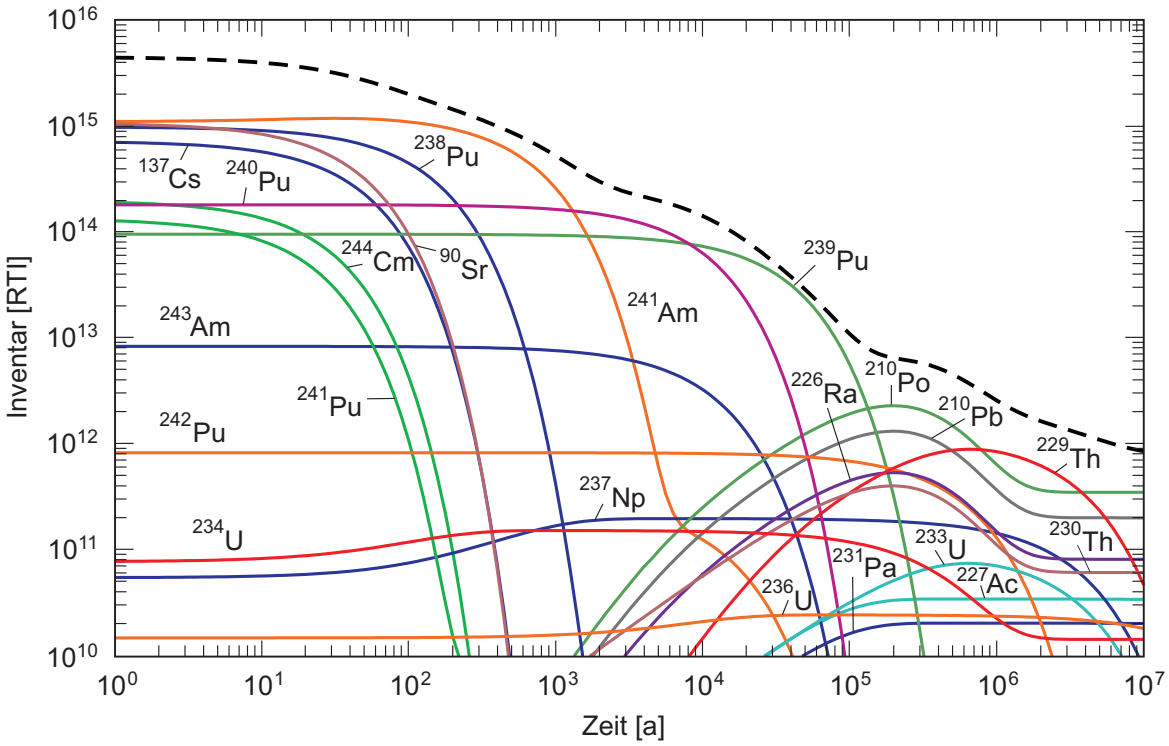


Fig. A5.5-1: Radiotoxizität als Funktion der Zeit für abgebrannte Brennelemente.

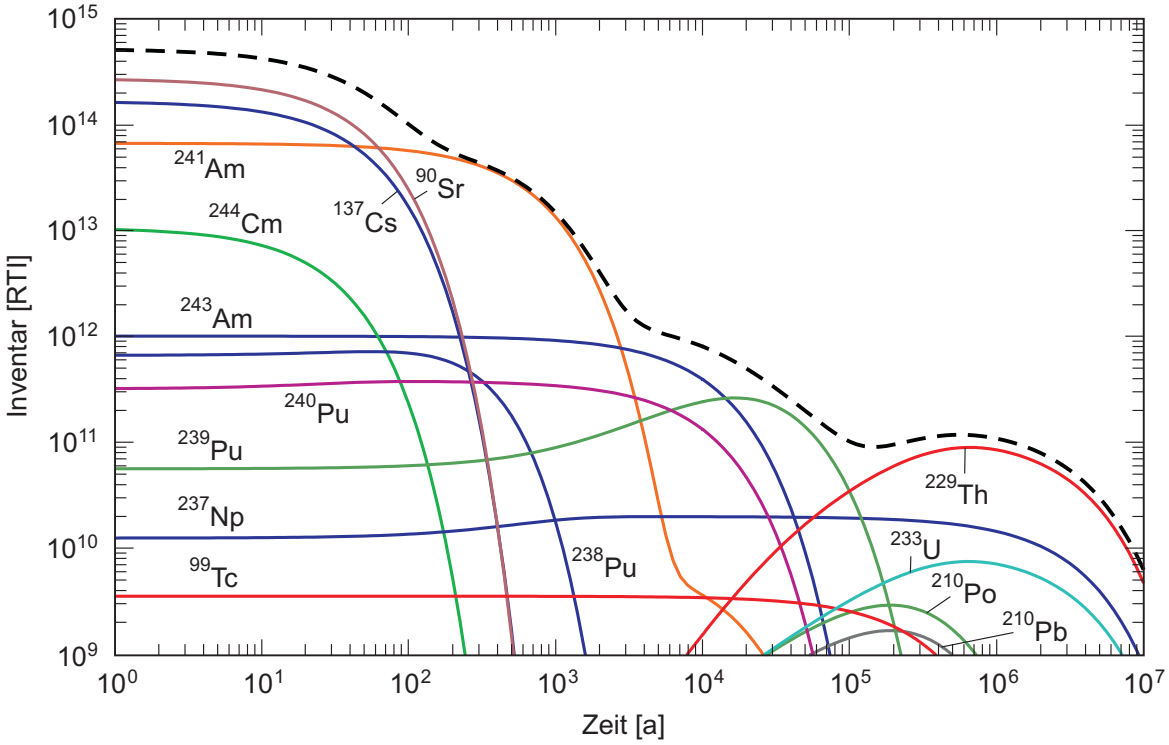


Fig. A5.5-2: Radiotoxizität als Funktion der Zeit für verglaste hochaktive Abfälle.

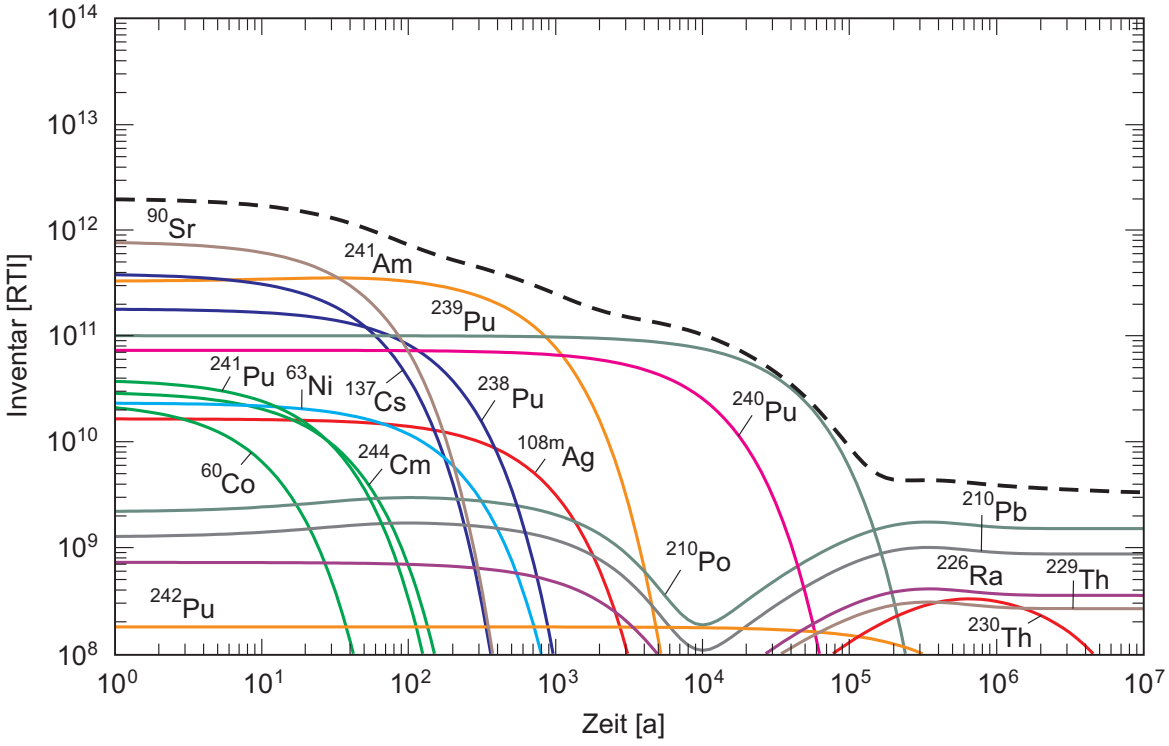


Fig. A5.5-3: Radiotoxizität als Funktion der Zeit für LMA (Referenzzuteilung).

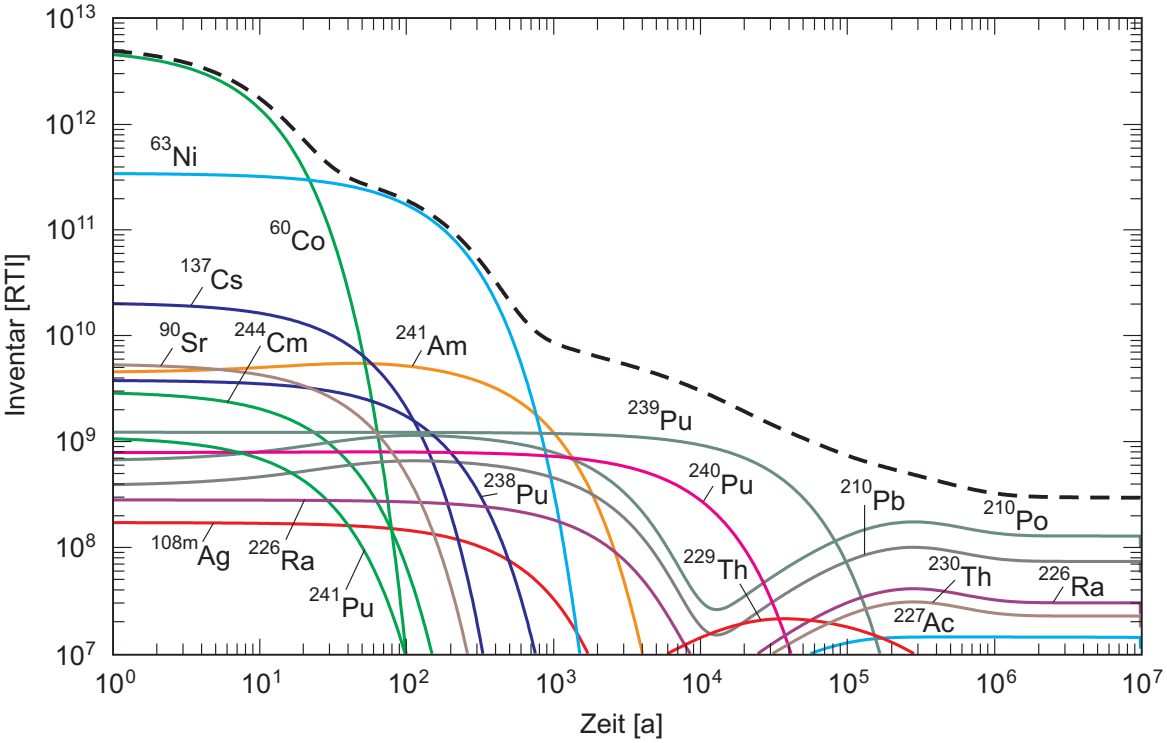


Fig. A5.5-4: Radiotoxizität als Funktion der Zeit für SMA (Referenzzuteilung).

Bei der Auswahl der Nuklide für die Sensitivitätsanalyse werden die früheren Zeiten in den Radiotoxizitätskurven stärker gewichtet. Dies aufgrund der Überlegung, dass im Falle eines ungünstigen Verhaltens der technischen Barrieren die Fragestellung interessiert, inwiefern die Geosphäre zur Reduktion der Freisetzung dieser Nuklide beiträgt. Dies führt zur folgenden Liste von Radionukliden: Co-60, Ni-63, Sr-90, Cs-137, Pu-239, Am-241.

Aufgrund der bisherigen Erfahrungen in den Projekten SMA/Wellenberg, Kristallin-I und Entsorgungsnachweis (vgl. Kap. 2.4) werden zusätzlich die Radionuklide C-14 (org), C-14 (anorg), Cl-36, Se-79, Ag-108m und I-129 berücksichtigt. Diese Radionuklide sind zwar bzgl. ihrer Radiotoxizität von untergeordneter Bedeutung, aber aufgrund ihrer hohen Mobilität und ihren mittleren bis langen Halbwertszeiten in der Regel dosisdominierend.

Diese Überlegungen führen zur folgenden Nuklidauswahl für die Sensitivitätsbetrachtungen:

C-14 (org), C-14 (anorg), Cl-36, Co-60, Ni-63, Se-79, Sr-90, Ag-108m, I-129, Cs-137, Pu-239, Am-241.

A5.5.2 Einfluss der hydraulischen Eigenschaften des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs für SMA und HAA

In diesem Kapitel werden Resultate zum Einfluss der hydraulischen Eigenschaften (hydraulische Durchlässigkeit für homogen-poröses Wirtgestein bzw. Klufttransmissivität für geklüftetes Wirtgestein) auf die Barriereneffizienz[134] für die ausgewählten Nuklide jeweils für zwei verschiedene Sorptionsdatensätze vorgestellt (Fig. A5.5-5 bis A5.5-8).

Die Hauptergebnisse dieser vereinfachten Sensitivitätsbetrachtungen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die Barrierenwirkung der Geosphäre nimmt generell mit zunehmender Durchlässigkeit (im Falle des homogen-porösen Wirtgesteins) bzw. mit zunehmender Transmissivität (im Falle des geklüfteten Wirtgesteins) ab. Dies lässt sich mit der im Gleichschritt zunehmenden Advektionsgeschwindigkeit erklären, wodurch geringere Transportzeiten und damit eine geringere Wirksamkeit des radioaktiven Zerfalls innerhalb der Geosphäre resultieren.
- Neben den hydraulischen Eigenschaften der Geosphäre spielen auch die Sorptionseigenschaften und die Halbwertszeit der betrachteten Radionuklide eine wichtige Rolle. Gut sorbierende Radionuklide mit kurzen bis mittleren Halbwertszeiten werden in der Geosphäre sehr effizient zurückgehalten (typische Beispiele sind Am-241, Cs-137, Sr-90, Ni-63 und Co-60), während schwach und nicht-sorbierende Radionuklide mit langen Halbwertszeiten nur eine geringe Rückhaltung erfahren (I-129, Se-79, Cl-36). Zwischen diesen Extremen ist die Barrierenwirkung sehr sensitiv auf die hydraulischen und Sorptionseigenschaften sowie auf die Halbwertszeit der Radionuklide.

[134] Die Barriereneffizienz ist ein Mass für die Radionuklidrückhaltung in der Geosphäre durch radioaktiven Zerfall; ihr Wertebereich liegt zwischen 1 (vollständige Rückhaltung) und 0 (keine Rückhaltung). Die Barriereneffizienz ist direkt proportional zum Verhältnis der Radionuklidfreisetzungsraten am Ende und am Anfang des Transportpfads im stationären Gleichgewicht (für eine detaillierte Beschreibung des Konzepts s. Nagra 2002d).

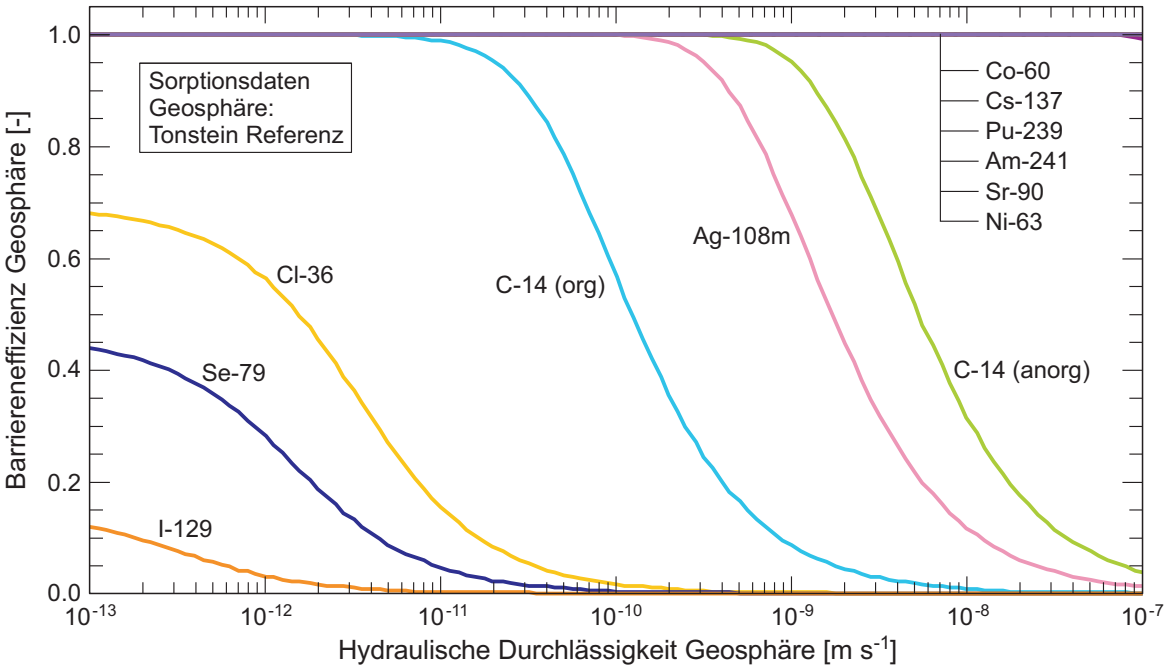


Fig. A5.5-5: Barriereneffizienz als Funktion der hydraulischen Durchlässigkeit (homogen-poröses WG, i = 0.1 m/m, L = 40 m, Sorption: Tonstein).

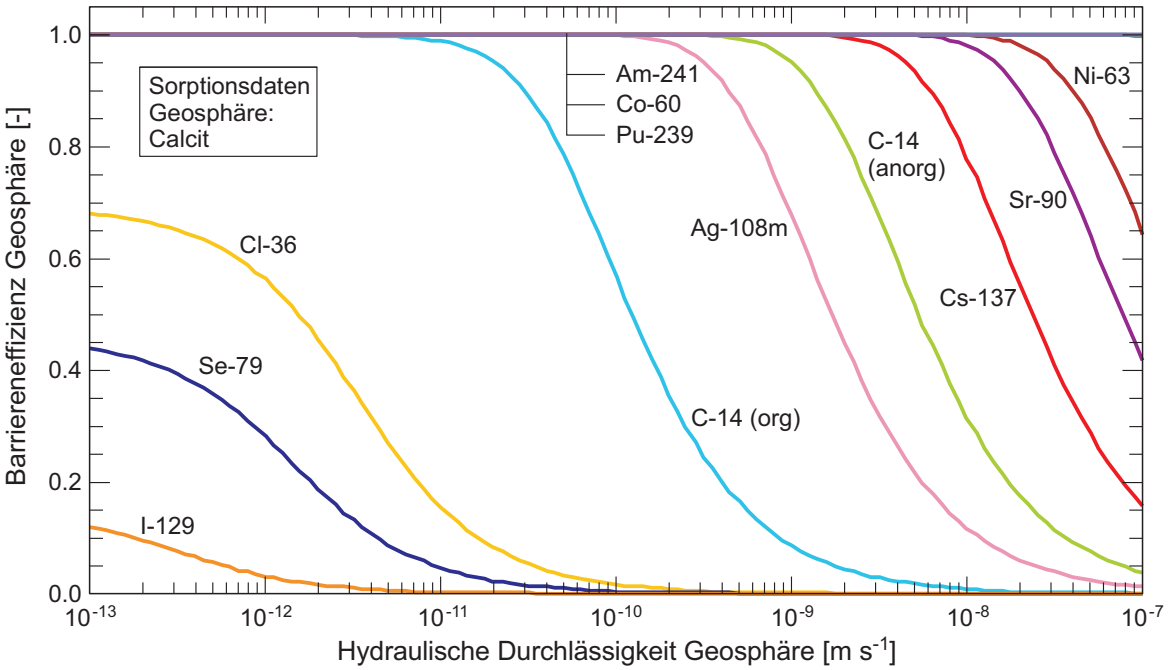


Fig. A5.5-6: Barriereneffizienz als Funktion der hydraulischen Durchlässigkeit (homogen-poröses WG, i = 0.1 m/m, L = 40 m, Sorption: Calcit).

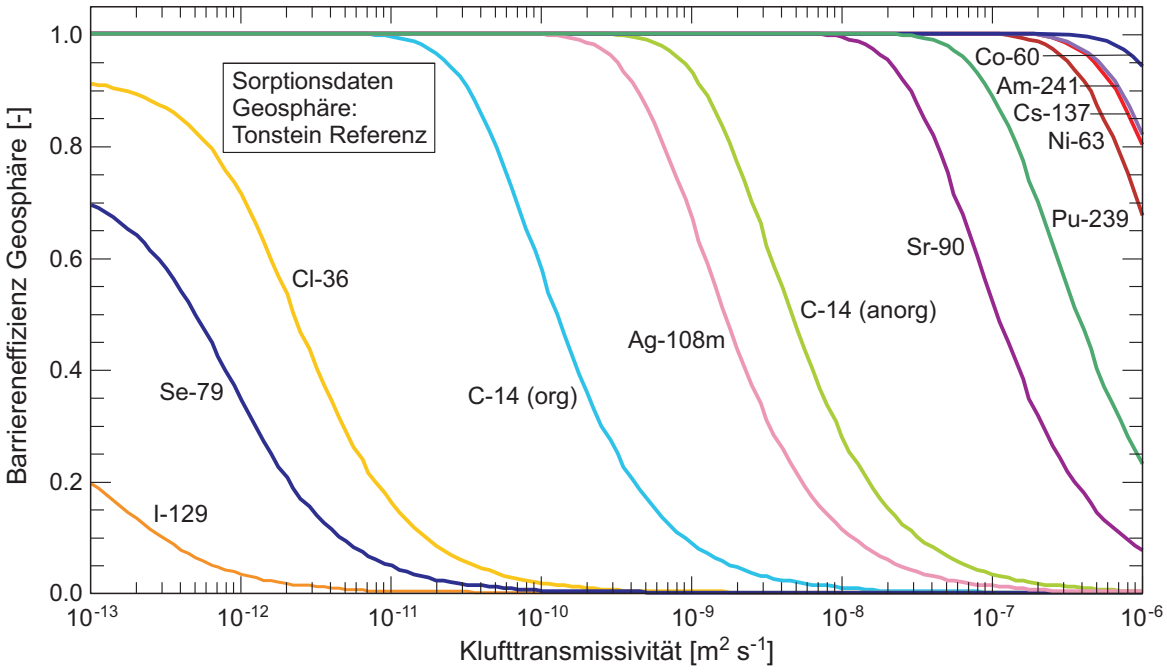


Fig. A5.5-7: Barriereneffizienz als Funktion der Transmissivität (geklüftetes WG, i = 0.1 m/m, L = 40 m, Sorption: Tonstein).

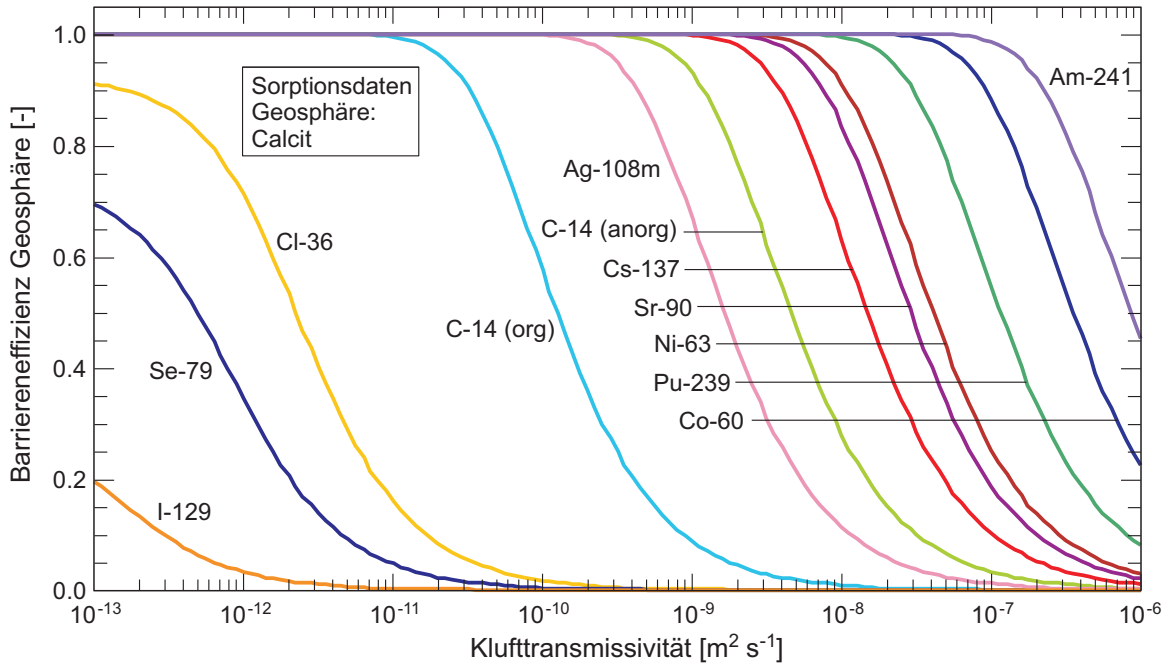


Fig. A5.5-8: Barriereneffizienz als Funktion der Transmissivität (geklüftetes WG, i = 0.1 m/m, L = 40 m, Sorption: Calcit).

A5.5.3 Einfluss der Transportpfadlänge

In diesem Kapitel werden Resultate zum Einfluss der Transportpfadlänge auf die Barriereneffizienz für die ausgewählten Nuklide und für verschiedene hydraulische Durchlässigkeiten (im Falle homogen-poröser Wirtgesteine) resp. Transmissivitäten (im Falle von geklüfteten Wirtgesteinen) jeweils für zwei verschiedene Sorptionsdatensätze vorgestellt (Fig. A5.5-9 bis A5.5-20).

Die Hauptergebnisse dieser vereinfachten Sensitivitätsbetrachtungen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die Barrierenwirkung der Geosphäre nimmt generell mit zunehmender Transportpfadlänge zu, da dies mit längeren Transportzeiten und damit einer höheren Wirksamkeit des radioaktiven Zerfalls innerhalb der Geosphäre einhergeht.
- Neben der Transportpfadlänge spielen auch die hydraulischen Eigenschaften der Geosphäre, die Sorptionseigenschaften und die Halbwertszeit der betrachteten Radionuklide eine wichtige Rolle (vgl. Diskussion in Anhang A5.5.2).
- Die nuklidspezifische Reichweite (99 % Zerfall) in homogen-porösen Wirtgesteinen (vgl. Fig. A5.5-17 und A5.5-18 mit hydraulischen Durchlässigkeiten von 10^{-11} und 10^{-9} m/s und zwei verschiedenen Sorptionsdatensätzen) zeigen, dass Radionuklide mit günstigen Sorptionseigenschaften innerhalb weniger Dekameter praktisch vollständig zerfallen, während gering und nicht-sorbierende Radionuklide mit mittlerer bzw. hoher Halbwertszeit (z.B. I-129, Se-79, Cl-36, C-14(org)) eine grosse Reichweite aufweisen. Im Falle eines kleinräumig geklüfteten Wirtgesteins (vgl. Fig. A5.5-19 und A5.5-20 mit Transmissivitäten von 10^{-10} und 10^{-8} m^2/s und zwei verschiedenen Sorptionsdatensätzen) ergeben sich ähnliche Aussagen wie im Falle eines homogen-porösen Wirtgesteins, wobei die Reichweiten der sorbierenden Radionuklide hier eine grössere Sensitivität auf die Sorptionseigenschaften des Wirtgesteins (Sorptionsdatensätze für Tonstein und Calcit) aufweisen.
- Es zeigt sich, dass die in Anhang A5.5.1 identifizierten Radionuklide mit hoher Radiotoxizität generell gut sorbieren und deshalb innerhalb weniger Dekameter mit wenigen Ausnahmen praktisch vollständig zerfallen (Co-60, Ni-63, Sr-90, Cs-137, Pu-239, Am-241). Deshalb tragen diese Radionuklide in Dosisrechnungen kaum oder nur in untergeordnetem Masse zur Gesamtdosis bei. Die schlecht sorbierenden Radionuklide mit mittlerer bzw. hoher Halbwertszeit (z.B. I-129, Se-79, Cl-36, C-14(org)) hingegen zerfallen erwartungsgemäss kaum

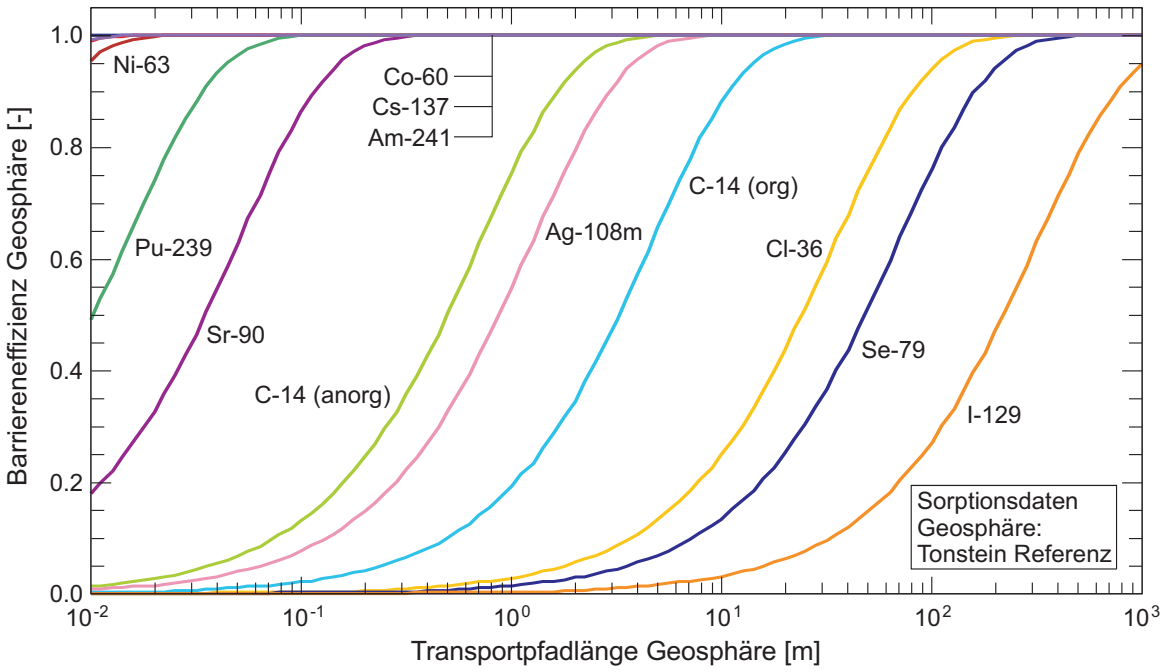


Fig. A5.5-9: Barriereneffizienz als Funktion der Transportpfadlänge (homogen-poröses Wirtgestein, i = 0.1 m/m, K = 10^{-13} m/s, Sorption: Tonstein).

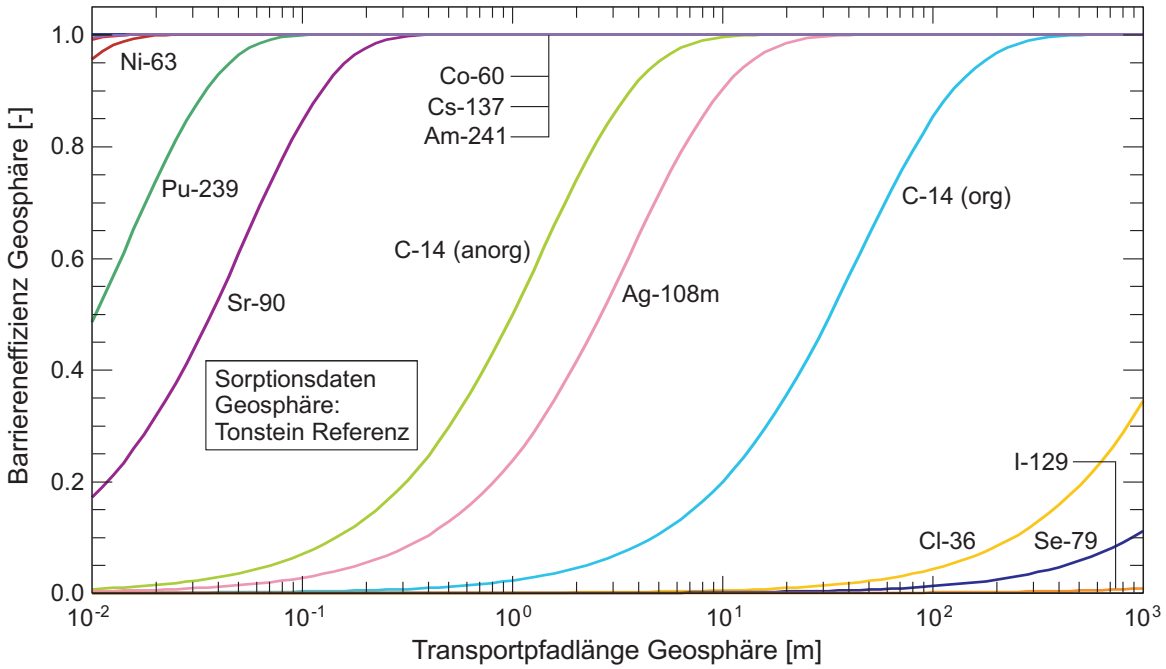


Fig. A5.5-10: Barriereneffizienz als Funktion der Transportpfadlänge (homogen-poröses Wirtgestein, i = 0.1 m/m, K = 10^{-10} m/s, Sorption: Tonstein).

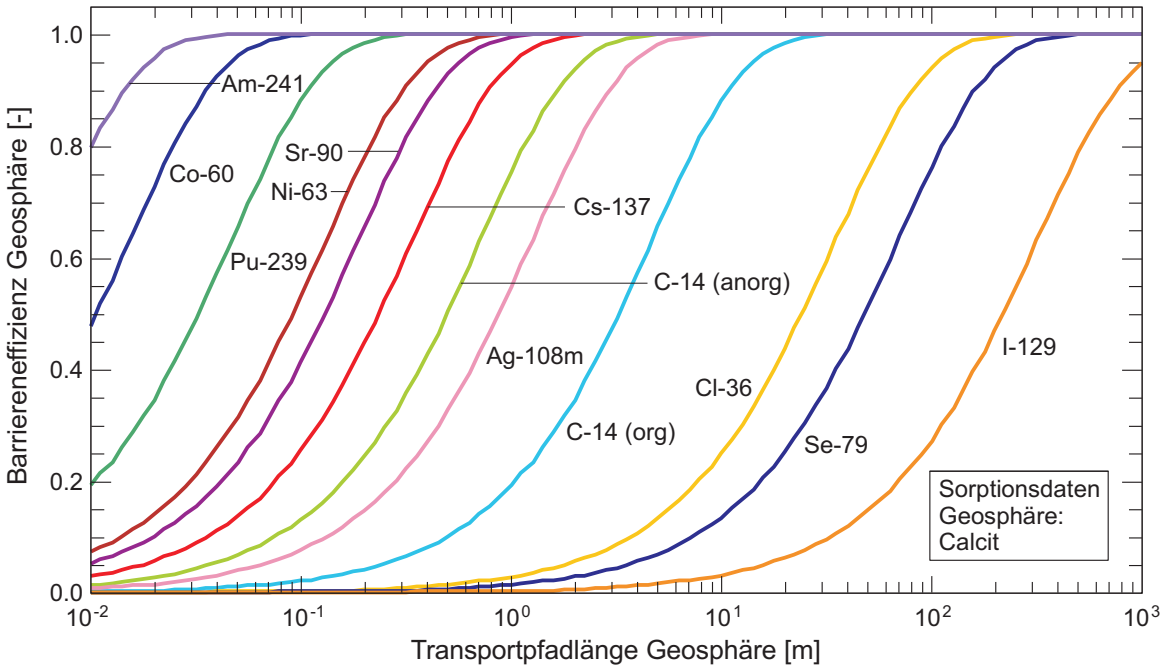


Fig. A5.5-11: Barriereneffizienz als Funktion der Transportpfadlänge (homogen-poröses Wirtgestein, i = 0.1 m/m, K = 10^{-13} m/s, Sorption: Calcit).

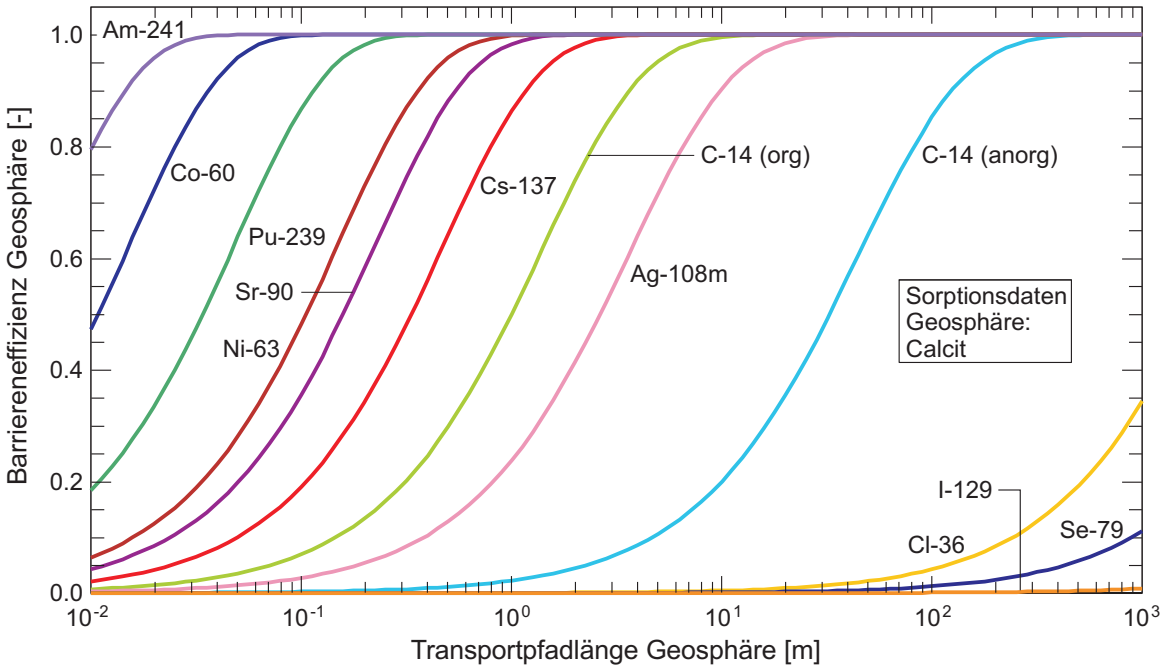


Fig. A5.5-12: Barriereneffizienz als Funktion der Transportpfadlänge (homogen-poröses Wirtgestein, i = 0.1 m/m, K = 10^{-10} m/s, Sorption: Calcit).

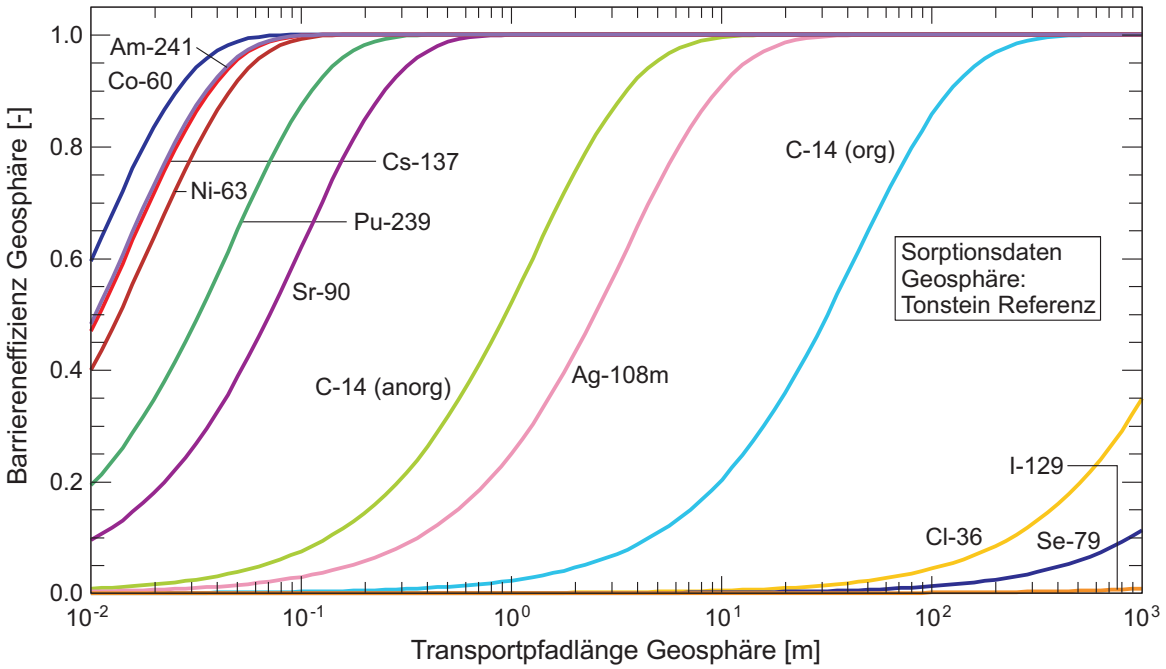


Fig. A5.5-13: Barriereneffizienz als Funktion der Transportpfadlänge (geklüftetes Wirtgestein, i = 0.1 m/m, T = 10^{-10} m^2/s, Sorption: Tonstein).

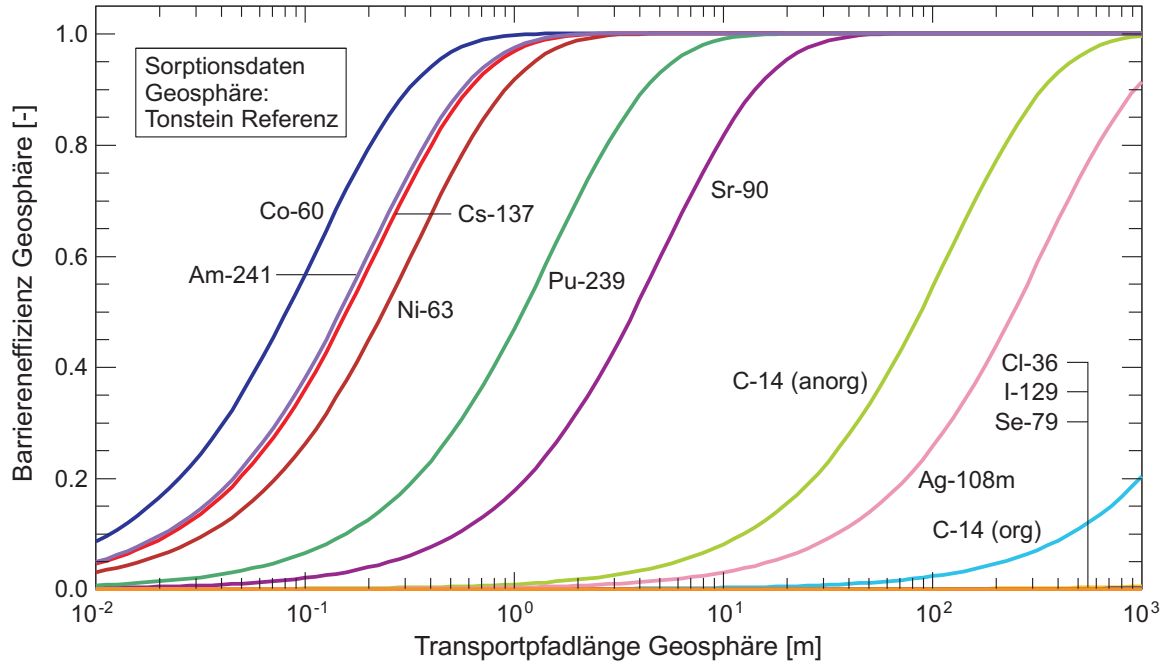


Fig. A5.5-14: Barriereneffizienz als Funktion der Transportpfadlänge (geklüftetes Wirtgestein, i = 0.1 m/m, T = 10^{-8} m^2/s, Sorption: Tonstein).

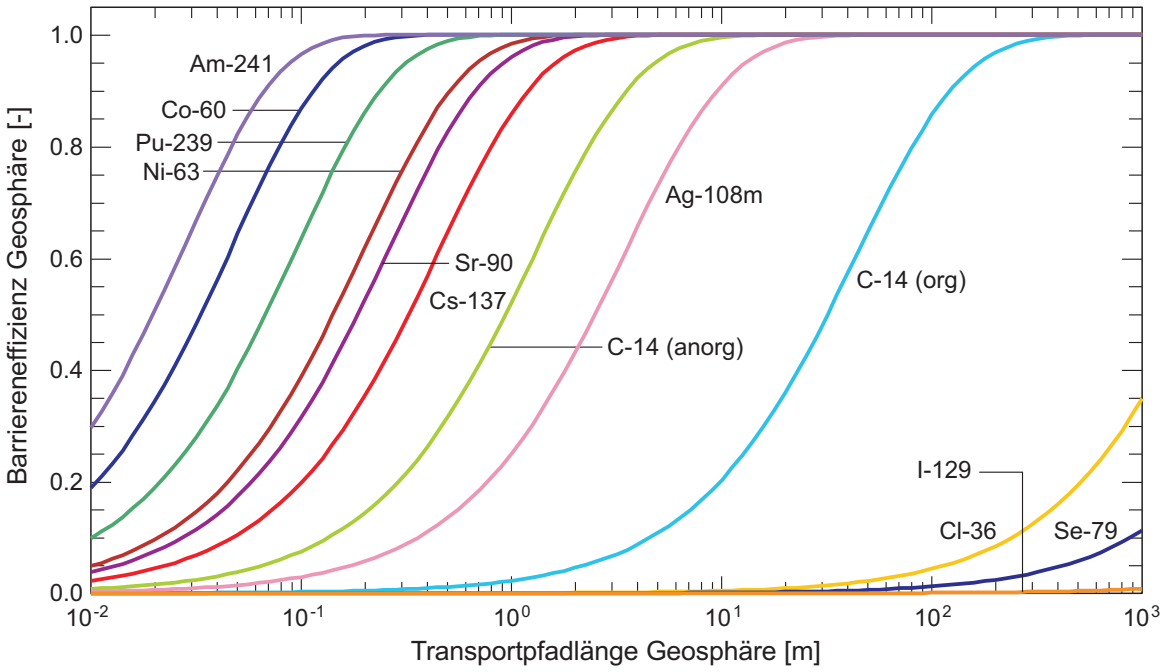


Fig. A5.5-15: Barriereneffizienz als Funktion der Transportpfadlänge (geklüftetes Wirtgestein, i = 0.1 m/m, T = 10^{-10} m^2/s, Sorption: Calcit).

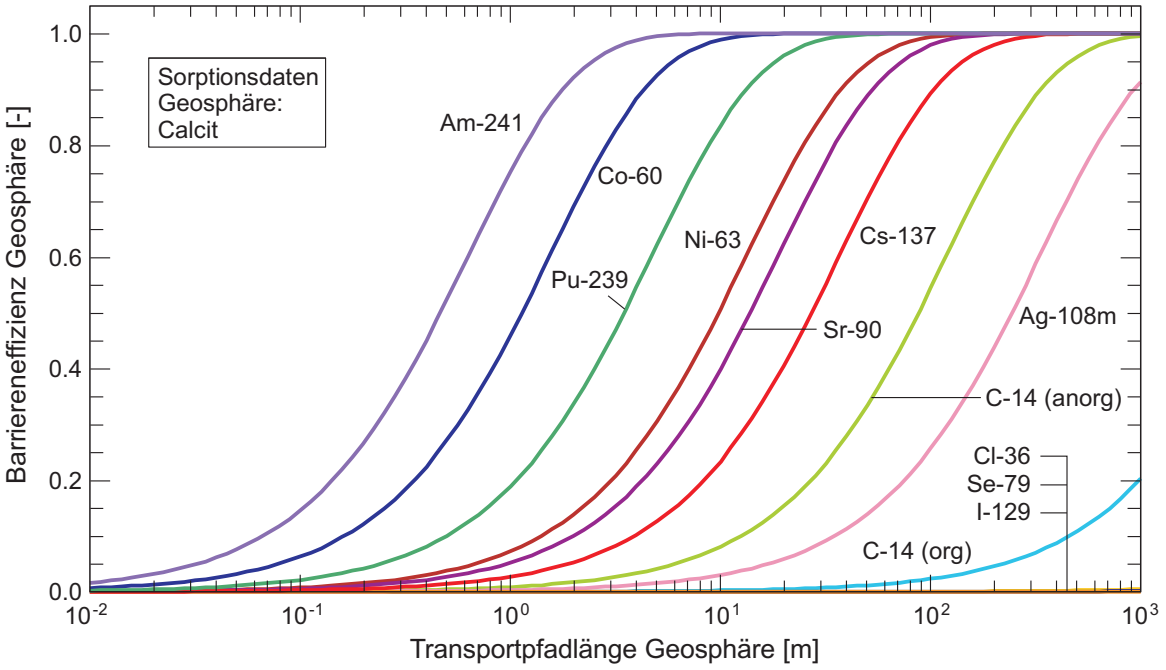


Fig. A5.5-16: Barriereneffizienz als Funktion der Transportpfadlänge (geklüftetes Wirtgestein, i = 0.1 m/m, T = 10^{-8} m^2/s, Sorption: Calcit).

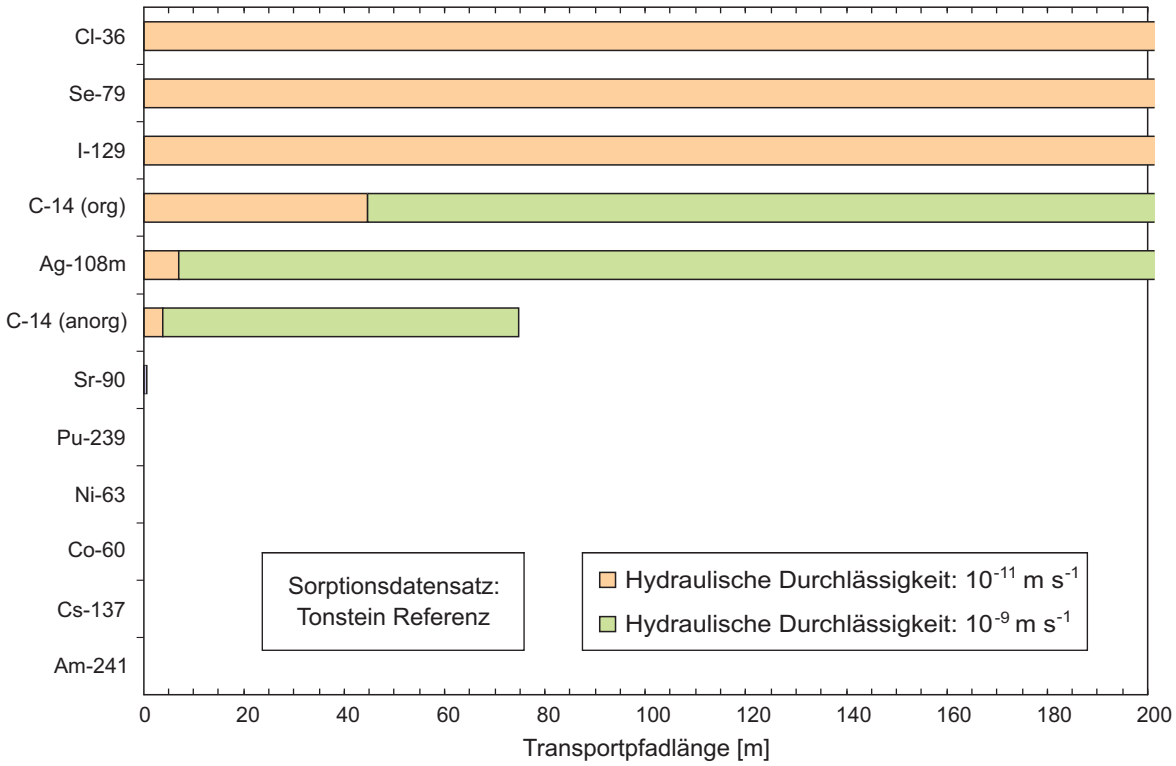


Fig. A5.5-17: Nuklidspezifische Reichweite (99 % Zerfall) im homogen-porösen Wirtgestein (Sorption: Tonstein).

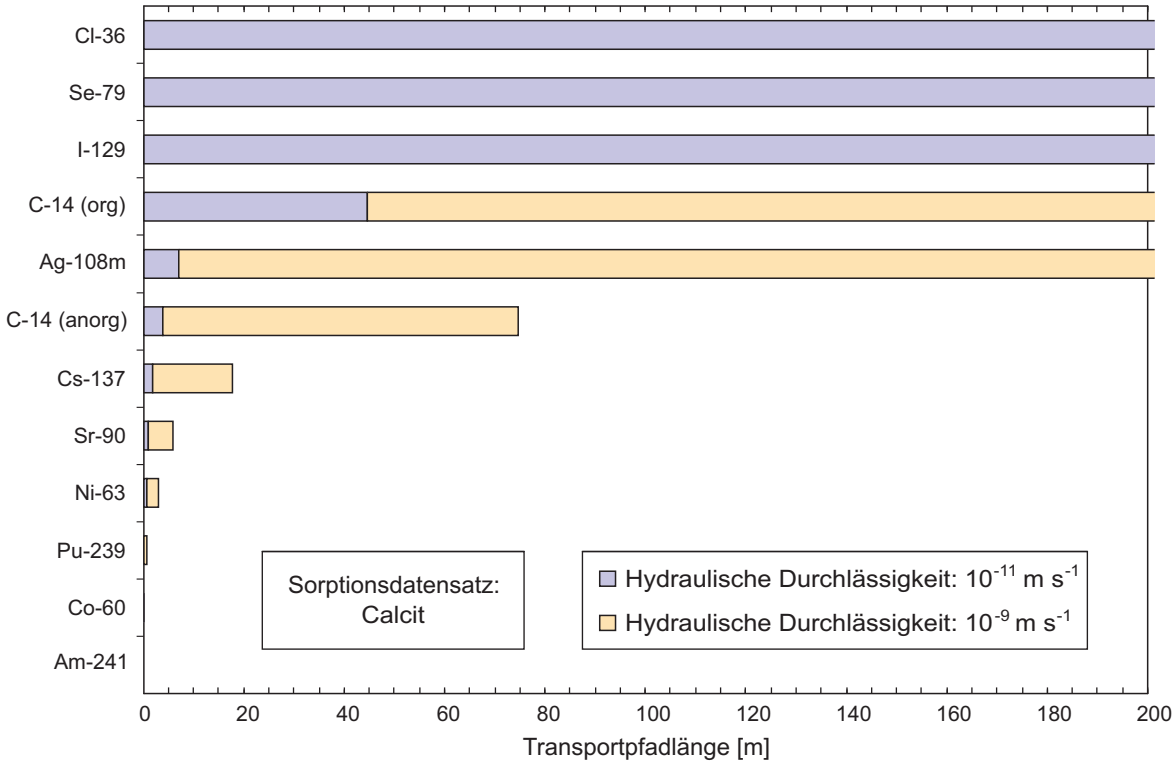


Fig. A5.5-18: Nuklidspezifische Reichweite (99 % Zerfall) im homogen-porösen Wirtgestein (Sorption: Calcit).

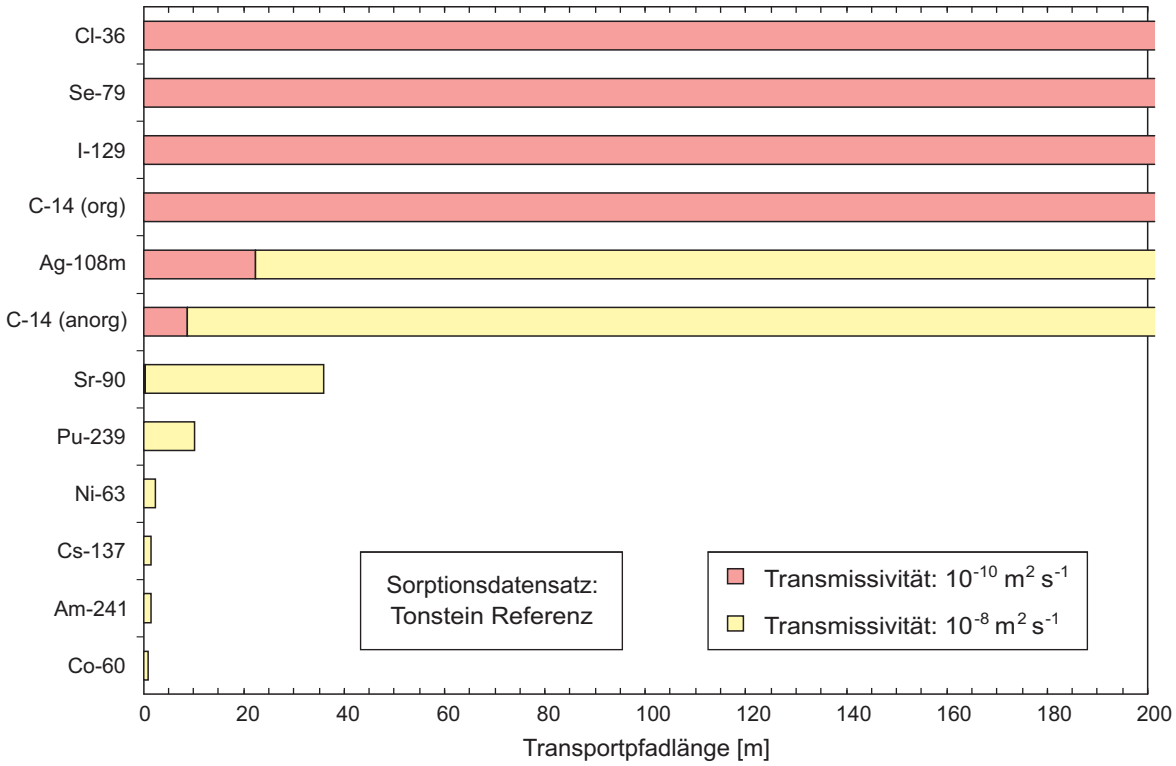


Fig. A5.5-19: Nuklidspezifische Reichweite (99 % Zerfall) in einer Kluft (Sorption: Tonstein).

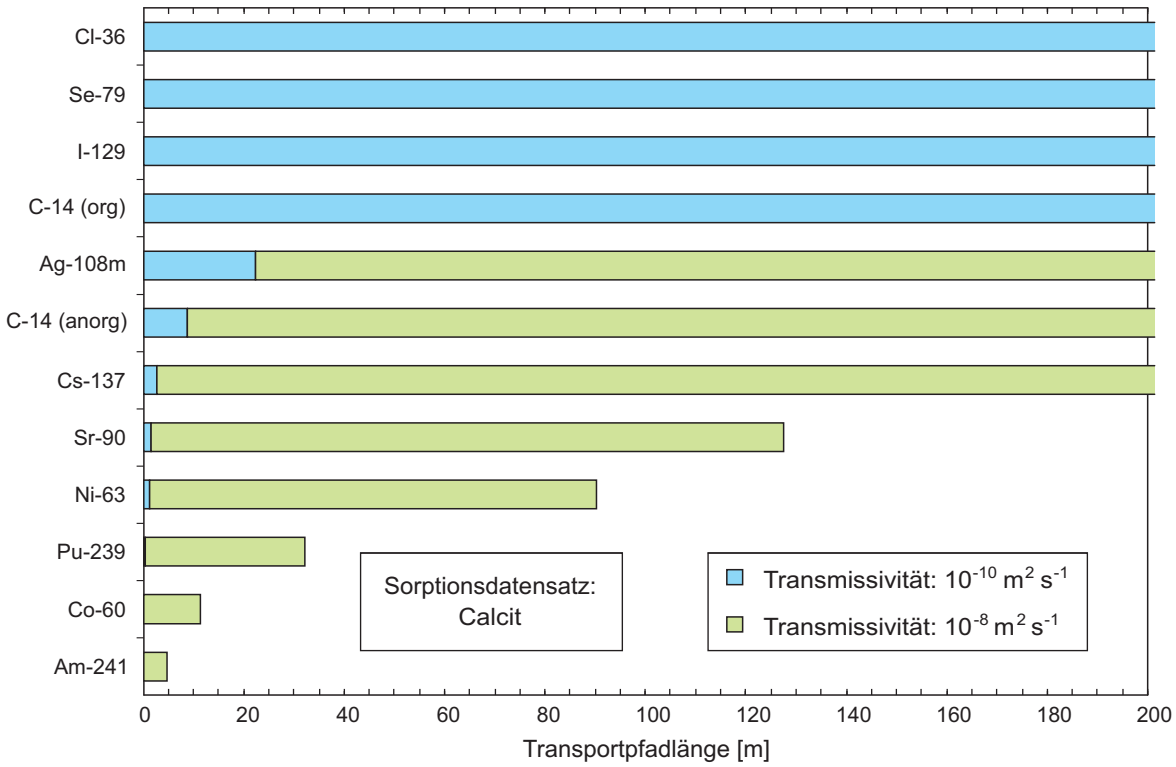


Fig. A5.5-20: Nuklidspezifische Reichweite (99 % Zerfall) in einer Kluft (Sorption: Calcit).

A5.5.4 Art der Transportpfade und Ausbildung des Porenraums

In diesem Kapitel werden Resultate zum Einfluss der Art der Transportpfade und Ausbildung des Porenraums auf die Radionuklidrückhaltung in der Geosphäre vorgestellt. Dabei wurden die folgenden Rechenfälle betrachtet:

- Basisfall[135]: Advektiver Transport in Kluft mit Öffnungsweite 1 mm, Kluftabstand 1 m, Klufttransmissivität 10^{-9} m^2/s, hydraulischer Gradient 0.1 m/m; dies ergibt einen spezifischen Wasserfluss von 3.2×10^{-3} m/a.
- Rechenfall mit advektivem Transport in Röhren[135]:
  - 1 Röhre pro m^2
  - Durchmesser der Röhren (7.6 mm) so gewählt, dass beim gleichen hydraulischen Gradienten wie im Basisfall (0.1 m/m) der gleiche spezifische Wasserfluss resultiert.
- Fall mit diffusivem Transport im homogen-porösen Medium: Nur Diffusion (keine Advektion), um einen Vergleich mit den Fällen "Kluft" und "Röhren" zu ermöglichen, in denen ebenfalls keine Advektion in der Matrix angenommen wurde.

Tab. A5.5-1: Inputparameter für die Sensitivitätsbetrachtungen bzgl. der Art der Transportpfade und der Ausbildung des Porenraums.

Rechenfall	**Eindringtiefe für Matrixdiffusion** [m]	**Radius** [m]	**Kluft-öffnungsweite** [m]	**Spezifische Oberfläche** [m^2/m^3]	**Advektions-geschwindigkeit** [m/a]
Kluft (Basisfall)	0.5	–	1.00E-03	2000	3.16
	0	–	1.00E-03	2000	3.16
Röhre 7.6 mm	0.5	3.82E-03	–	524	68.9
	0	3.82E-03	–	524	68.9

Die Resultate sind in Fig. A5.5-21 für drei ausgewählte Radionuklide dargestellt und lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die Barrierenwirkung fällt für das homogen-poröse Medium am günstigsten aus, gefolgt von der Kluft und der Röhre; dies lässt sich durch die in dieser Reihenfolge zunehmende Advektionsgeschwindigkeit erklären.
- Die Matrixdiffusion trägt in beiden Rechenfällen und für alle betrachteten Radionuklide massgeblich zur Barrierenwirkung bei. Findet keine Matrixdiffusion statt, so wird insbesondere bei den Radionukliden mit mittlerer (C-14) bis längerer (Pu-239) Halbwertszeit auch bei grossen Transportpfadlängen nur eine geringe bzw. gar keine Barrierenwirkung erzielt.

[135] Diese Rechenfälle werden jeweils mit und ohne Matrixdiffusion gerechnet.

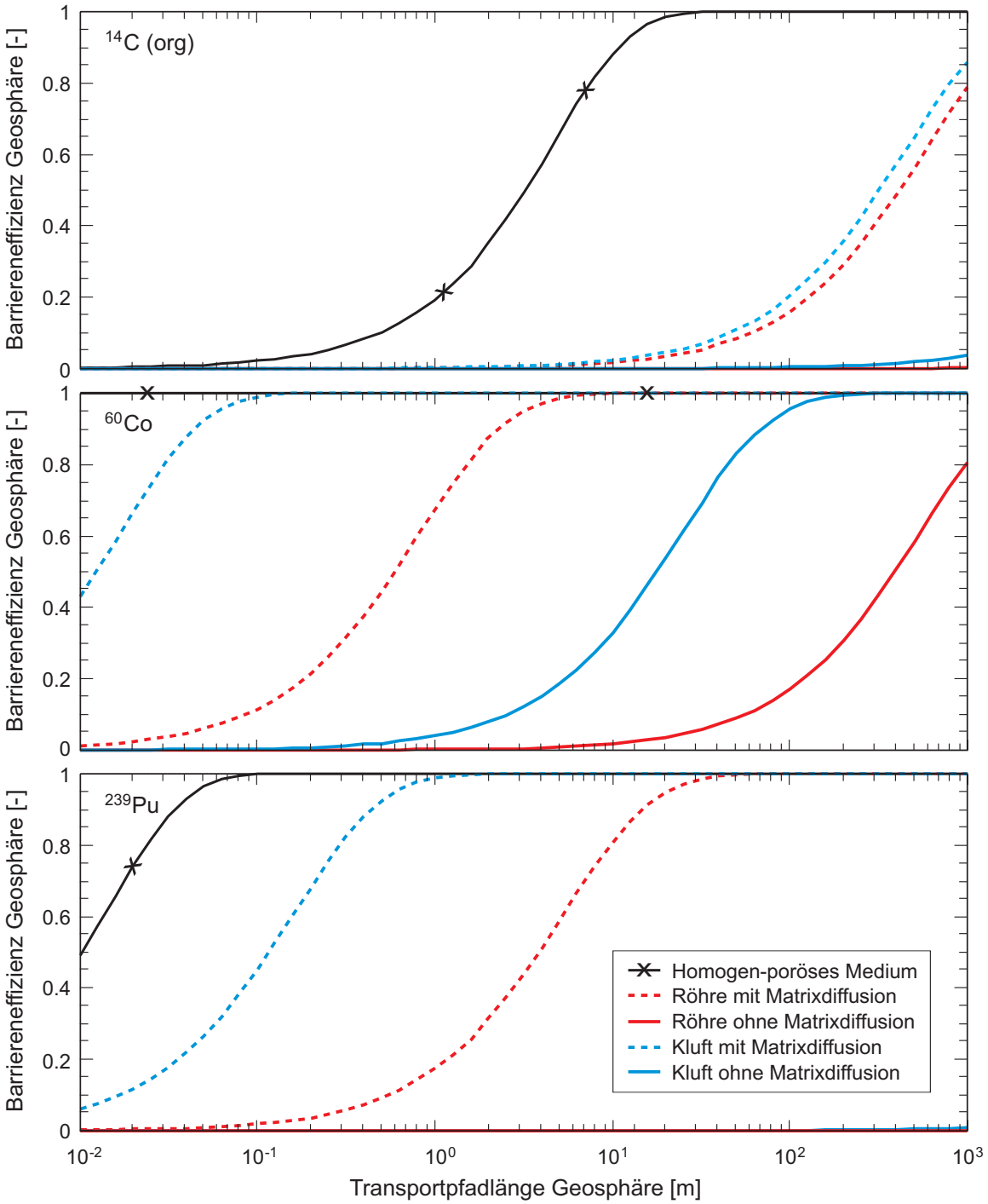


Fig. A5.5-21: Einfluss der Art der Transportpfade (homogen-poröses Medium, Kluft, Röhre bzw. Channel) und der Ausbildung des Porenraums (mit/ohne diffusionszugänglicher Matrix) auf die Barriereneffizienz für drei ausgewählte Beispielnuklide.

Oberste Figur: C-14(org); mittlere Figur: Co-60; unterste Figur: Pu-239.