

Technischer Bericht 14-01

SGT Etappe 2: Vorschlag weiter zu untersuchender
geologischer Standortgebiete mit zugehörigen
Standortarealen für die Oberflächenanlage

Sicherheitstechnischer Bericht zu SGT Etappe 2

**Sicherheitstechnischer Vergleich
und Vorschlag der in Etappe 3
weiter zu untersuchenden
geologischen Standortgebiete**

Textband

Dezember 2014

Nationale Genossenschaft
für die Lagerung
radioaktiver Abfälle

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

www.nagra.ch

Technischer Bericht 14-01

SGT Etappe 2: Vorschlag weiter zu untersuchender
geologischer Standortgebiete mit zugehörigen
Standortarealen für die Oberflächenanlage

Sicherheitstechnischer Bericht zu SGT Etappe 2

**Sicherheitstechnischer Vergleich
und Vorschlag der in Etappe 3
weiter zu untersuchenden
geologischen Standortgebiete**

Textband

Dezember 2014

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 W. Albert, G. Deplazes, A. Gautschi, P. Gribi, M. Hertrich, H. Madritsch, H. Müller, M. Ruff, J. Schneider, M. Schnellmann und P. Zuidema mit Beiträgen von zahlreichen weiteren Personen (insbesondere P. Blaser, T. Fries, S. Giger, B. Kunz, P. Marschall, H.R. Müller, D. Traber und T. Vietor). Die Projektleitung für diesen Bericht und für das Gesamtprojekt der Erarbeitung von Vorschlägen für die geologischen Standortgebiete für die weiteren Untersuchungen für Etappe 3 hatte 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.

Die Vorschläge der geologischen Standortgebiete für das SMA- bzw. das HAA-Lager und für ein Kombilager für die weiteren Untersuchungen für Etappe 3 des Sachplans wurden mit den Entsorgungspflichtigen an einer Klausurtagung sowie an verschiedenen Sitzungen ausführlich diskutiert und von ihnen an der Sitzung der Verwaltung der Nagra vom 21. Nov. 2014 freigegeben.

Für die Erstellung der in diesem Bericht verwendeten Karten wurden, soweit nicht anders vermerkt, die folgenden digitalen Datensätze der swisstopo verwendet: GG25, DHM25, DTM-AV, swissALTI3D, Vector 25, Vector200, GeoKarte 1:500'000, Geologischer Atlas 1:25'000, GeoCover.

ISSN 1015-2636

Korrigierte PDF-Version, Januar 2015

“Copyright © 2014 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

Wichtige Schritte zur Entsorgung der radioaktiven Abfälle der Schweiz sind heute realisiert. Dies betrifft die Behandlung und Verpackung der radioaktiven Abfälle, ihre Charakterisierung und Inventarisierung sowie die Zwischenlagerung und die dazu gehörenden Transporte. Bei der Vorbereitung der geologischen Tiefenlager wurde ein guter technisch-wissenschaftlicher Stand erreicht; der Nachweis der Machbarkeit von langfristig sicheren geologischen Tiefenlagern in der Schweiz für alle hier anfallenden radioaktiven Abfälle wurde erbracht (Entsorgungsnachweise) und vom Bundesrat anerkannt. Mit dem vom Bundesrat im Jahr 2008 genehmigten Konzept "Sachplan geologische Tiefenlager" wurde das Standortwahlverfahren für die Tiefenlager festgelegt und dessen Umsetzung in Angriff genommen. Federführende Behörde ist das Bundesamt für Energie (BFE). Gemäss Konzept Sachplan geologische Tiefenlager (SGT) erfolgt die Auswahl von Standorten für geologische Tiefenlager in der Schweiz in drei Etappen. Etappe 1 endete mit der Festlegung von geologisch geeigneten Standortgebieten. Innerhalb dieser Gebiete werden in den Etappen 2 und 3 des Verfahrens die Projekte konkretisiert und die Sicherheit detaillierter beurteilt, was schliesslich zur Festsetzung der Standorte für die Realisierung der benötigten geologischen Tiefenlager und zur Erteilung der Rahmenbewilligungen führen soll.

Im November 2008 hat die Nagra für Etappe 1 sechs geologische Standortgebiete für das geologische Tiefenlager für die schwach- und mittelaktiven Abfälle (SMA) und drei für das geologische Tiefenlager für die hochaktiven Abfälle (HAA) vorgeschlagen, die unter Berücksichtigung der Kriterien zur Sicherheit und technischen Machbarkeit sowie weiterer Vorgaben gemäss SGT erarbeitet wurden. Für die geologischen Standortgebiete, die sowohl für das HAA-Lager wie auch für das SMA-Lager vorgeschlagen wurden, wurde festgehalten, dass dort beide Lagertypen gleichzeitig angeordnet werden könnten; für eine solche Anlage wird der Begriff "Kombilager" verwendet. Mit dem Entscheid des Bundesrats vom November 2011 wurden die von der Nagra vorgeschlagenen geologischen Standortgebiete in den Sachplan geologische Tiefenlager aufgenommen.

Gemäss SGT sind in Etappe 2 in den Planungsperimetern der geologischen Standortgebiete in Zusammenarbeit mit den Standortregionen und mit den betroffenen Kantonen Vorschläge für die Platzierung der Oberflächenanlage zu erarbeiten und mögliche Standortareale zu bezeichnen. Dazu hat die Nagra zu Beginn der Etappe 2 zuhanden der Gremien der regionalen Partizipation in den Standortregionen diesbezügliche Vorschläge unterbreitet als Diskussionsgrundlage für die Zusammenarbeit. Diese Vorschläge wurden im Laufe der Etappe 2 von den Regionen und Kantonen diskutiert, geprüft und auf deren Wunsch fallweise angepasst sowie mit zusätzlichen Vorschlägen ergänzt. Auf Basis der Stellungnahmen der Partizipationsgremien hat die Nagra für jedes Standortgebiet im Rahmen von Planungsstudien mindestens ein Standortareal für die Oberflächenanlage pro Standortregion bezeichnet. Die Planungsstudien dienen in allen Regionen als Grundlage für sozioökonomisch-ökologische Wirkungsstudien (SÖW) unter Leitung des BFE und für Voruntersuchungen zu späteren Umweltverträglichkeitsprüfungen.

Weiter ist in Etappe 2 basierend auf einem sicherheitstechnischen Vergleich eine Einengung auf mindestens zwei geologische Standortgebiete pro Lagertyp für die weiteren Untersuchungen für Etappe 3 vorzunehmen. Dabei hat die Langzeitsicherheit des geologischen Tiefenlagers oberste Priorität. Ein geologisches Standortgebiet kann in Etappe 2 nur dann zurückgestellt werden, wenn es eindeutige sicherheitstechnische Nachteile im Vergleich mit den übrigen Standortgebieten aufweist. Der Sicherheit nachgeordnet sind Aspekte der Raumplanung, Ökologie, Wirtschaft und Gesellschaft; die SÖW hat keinen Einfluss auf die Auswahl der vorzuschlagenden geologischen Standortgebiete.

Gemäss SGT und Vorgaben des Eidgenössischen Nuklearsicherheitsinspektorats (ENSI) hat die Nagra für jedes Standortgebiet eine provisorische Sicherheitsanalyse sowie einen sicherheitstechnischen Vergleich durchzuführen und gestützt darauf eine vergleichende Gesamtbewertung vorzunehmen. Dies erlaubt es schliesslich, geologische Standortgebiete für die weiteren Untersuchungen in Etappe 3 vorzuschlagen.

Der vorliegende Bericht hat zum Ziel, die für die weiteren Untersuchungen in SGT Etappe 3 zu betrachtenden geologischen Standortgebiete für das SMA- und das HAA-Lager vorzuschlagen und diesen Vorschlag zu begründen. Dazu werden die behördlichen Vorgaben und das darauf basierende Vorgehen erläutert, die für die Bewertung und Einengung notwendigen Unterlagen zusammenfassend dargestellt und der schrittweise Prozess der Einengung aufgezeigt. Die Erarbeitung der Vorschläge erfolgt in fünf Schritten:

- In einem *ersten Schritt* wird die in Etappe 1 verwendete Methodik an die veränderten Rahmenbedingungen angepasst. Neben den Vorgaben im Sachplan und den Präzisierungen des ENSI werden dazu auch die Behördenkommentare zu Etappe 1 und die spezifischen Eigenschaften der in Etappe 1 festgelegten Wirtgesteine und geologischen Standortgebiete berücksichtigt. Wichtiges Element beim Vorgehen in Etappe 2 ist der Optimierungsgedanke: Um die Vorschläge gemäss Etappe 1 möglichst gut zu nutzen, erfolgt eine dreistufige Optimierung (Festlegung des prioritären Wirtgesteins in Standortgebieten mit mehr als einem Wirtgestein, Abgrenzung von optimierten Lagerperimetern innerhalb der geologischen Standortgebiete, Zurückstellen von geologischen Standortgebieten mit eindeutigen Nachteilen, vgl. Schritte 2, 3 und 5).
- Im *zweiten Schritt* wird in denjenigen Standortgebieten für das SMA-Lager mit mehr als einem Wirtgestein basierend auf einem sicherheitstechnischen Vergleich der Wirtgesteine das prioritäre Wirtgestein festgelegt, welches für die weiteren Schritte verwendet wird. Für das HAA-Lager entfällt dieser Schritt; in Etappe 1 wurde der Opalinuston als Wirtgestein festgelegt. Für das SMA-Lager wurde in diesem Schritt mit Ausnahme des Standortgebiets Wellenberg ebenfalls der Opalinuston als prioritäres Wirtgestein festgelegt.
- Im *dritten Schritt* wird innerhalb der in Etappe 1 festgelegten Standortgebiete eine optimierte räumliche Konfiguration der prioritären Wirtgesteine ausgewählt (Abgrenzung von optimierten Lagerperimetern).
- Im *vierten Schritt* erfolgt eine Prüfung der sicherheitstechnischen Eignung der geologischen Standortgebiete bzw. der zugehörigen Lagerperimeter, einerseits anhand von Dosisberechnungen (charakteristische Dosisintervalle) und andererseits durch eine qualitative Bewertung anhand der Kriterien zur Sicherheit und technischen Machbarkeit gemäss SGT.
- Im *fünften Schritt* erfolgen der sicherheitstechnische Vergleich und die vergleichende Gesamtbewertung der geologischen Standortgebiete bzw. der zugehörigen Lagerperimeter anhand der vom ENSI festgelegten entscheiderelevanten Merkmale (Identifikation geologischer Standortgebiete mit eindeutigen Nachteilen).

Für die Umsetzung der Methodik werden neben den schon für Etappe 1 verwendeten Informationen auch die in der Zwischenzeit neu erarbeiteten Grundlagen insbesondere aus der Beteiligung an Bohrungen Dritter sowie aus der neuen 2D-Seismik und der reprozessierten Seismik verwendet. Zur Prüfung der Sensitivität der Vorschläge bezüglich bestehender Ungewissheiten werden in jedem Umsetzungsschritt bei Bedarf alternative Konzeptualisierungen und Parameterwerte berücksichtigt.

Dieses Vorgehen hat für das SMA-Lager und das HAA-Lager zu einer Einengung auf je zwei geologische Standortgebiete geführt, welche die Nagra im Auftrag der Entsorgungspflichtigen für die weiteren Untersuchungen in der dritten Etappe des Sachplanverfahrens vorschlägt.

Es sind dies für das SMA-Lager die geologischen Standortgebiete

- Zürich Nordost (ZH, TG) mit dem Standortareal ZNO-6b und
- Jura Ost (AG) mit dem Standortareal JO-3+

und für das HAA-Lager die geologischen Standortgebiete

- Zürich Nordost (ZH, TG) mit dem Standortareal ZNO-6b und
- Jura Ost (AG) mit dem Standortareal JO-3+.

In beiden Gebieten besteht das Potenzial, das SMA- und das HAA-Lager am selben Standort anzuordnen und dort ein sogenanntes Kombilager zu erstellen.

Die eingereichten Vorschläge werden durch die Behörden geprüft, und in etwa 2½ Jahren wird nach einer Anhörung der Entscheid des Bundesrats zu den vorgeschlagenen geologischen Standortgebieten erwartet. Für Etappe 3 werden die verbleibenden geologischen Standortgebiete für das SMA- und das HAA-Lager vertieft untersucht im Hinblick auf die Wahl der Standorte für die Vorbereitung der Rahmenbewilligungsgesuche. Ca. 5 Jahre nach Abschluss von Etappe 2 sollen gemäss BFE die Rahmenbewilligungsgesuche eingereicht werden und der Standortentscheid für die geologischen Tiefenlager für SMA und HAA mit der Rahmenbewilligung durch den Bundesrat soll ca. 2027 erfolgen. Die Rahmenbewilligung muss durch das Parlament genehmigt werden und unterliegt dem fakultativen nationalen Referendum. Anschliessend folgen der Bau der standortspezifischen Felslabors und die untertägige Erkundung. Dies führt dann zu den nuklearen Baubewilligungsverfahren; der Beginn der Betriebsphase für das SMA-Lager ist gemäss heutiger Planung im Jahr 2050 vorgesehen, für das HAA-Lager im Jahr 2060.

Résumé

Plusieurs étapes importantes de la gestion des déchets radioactifs produits en Suisse ont déjà été concrétisées, qu'il s'agisse du traitement et du conditionnement des déchets, de leur caractérisation et de la compilation des inventaires, de l'entreposage et des transports qui lui sont associés. En ce qui concerne les travaux préparatoires en vue de l'aménagement de dépôts en couches géologiques profondes, un bon niveau de connaissances scientifiques et techniques a été atteint. Sur la base d'études de faisabilité («Entsorgungsnachweise»), il a été démontré que des dépôts géologiques sûrs et durables peuvent être construits pour stocker l'ensemble des déchets radioactifs produits en Suisse ; cette démonstration a été acceptée par le Conseil fédéral. La procédure de sélection des sites a été définie dans la conception générale du plan sectoriel «Dépôts en couches géologiques profondes» et sa mise en application a débuté après l'accord formel du Conseil fédéral en 2008. L'autorité responsable de la procédure est l'Office fédéral de l'énergie (OFEN). Le plan sectoriel prévoit une sélection des sites de stockage en trois étapes. La première étape s'est terminée par la définition de tous les domaines d'implantation géologiques en Suisse susceptible d'accueillir un dépôt. Les étapes 2 et 3 de la procédure permettront de concrétiser les projets relatifs à ces domaines d'implantation et à évaluer plus en détail les aspects concernant la sûreté, pour aboutir finalement à la sélection des sites pour la réalisation des dépôts en profondeur et à l'octroi des autorisations générales.

Dans le cadre de la première étape, la Nagra a proposé, en novembre 2008, six domaines d'implantation géologiques pour le dépôt destiné aux déchets de faible et de moyenne activité (DFMA) et trois pour le dépôt pour les déchets de haute activité (DHA). Cette sélection s'est effectuée sur la base de critères de sûreté et de faisabilité technique, en tenant compte d'un ensemble d'exigences énoncées dans le plan sectoriel. Dans le cas des domaines d'implantation proposés à la fois pour un dépôt DHA et un dépôt DFMA, il a été indiqué que ces sites seraient appropriés pour les deux types de déchets, c'est-à-dire qu'ils pourraient accueillir un dépôt dit «combiné». Par sa décision de novembre 2011, le Conseil fédéral a inscrit les domaines d'implantation géologiques proposés par la Nagra dans le plan sectoriel «Dépôts en couches géologiques profondes».

Selon la conception générale du plan sectoriel, l'étape 2 doit conduire à formuler, en collaboration avec les régions d'implantation et les cantons concernés, des propositions pour la localisation des installations de surface au sein des périmètres de planification des domaines d'implantation géologiques et à désigner des aires d'implantation envisageables. A cet effet, la Nagra a soumis aux organes de participation régionale concernés, au début de l'étape 2, des propositions qui constituaient une base de discussion concrète pour initier la collaboration. Ces propositions ont été examinées et débattues par les régions et les cantons. Dans certains cas, elles ont été, à la demande de ceux-ci, adaptées ou complétées par d'autres propositions. Se fondant sur les prises de position des organes de participation, la Nagra a ensuite défini au moins une aire d'implantation pour les installations de surface dans chacun des domaines, concrétisée dans chaque cas par une étude de planification. Ces études de planification vont servir de base à l'OFEN pour effectuer des études sur l'impact socio-économique et écologique dans toutes les régions et des examens préliminaires en vue des futures études d'impact sur l'environnement.

L'étape 2 a pour autre objectif d'affiner la sélection des domaines d'implantation en ramenant leur nombre à au moins deux par type de dépôt. Cette deuxième sélection, issue d'une comparaison basée sur des critères de sûreté, permettra de définir les domaines d'implantation qui seront examinés en détail au cours de l'étape 3. Une priorité absolue est accordée à la sûreté à long terme des dépôts. Un domaine d'implantation géologique ne peut par conséquent être mis à

l'écart lors de l'étape 2 que si, du point de vue de la sûreté, il présente des désavantages manifestes par rapport aux autres domaines. L'aménagement du territoire, l'écologie, l'économie et la société sont tous subordonnés à la sûreté ; ainsi, l'étude sur l'impact socio-économique et écologique ne joue aucun rôle dans la sélection des domaines d'implantation géologiques proposés.

Selon la conception générale du plan sectoriel et les exigences de l'Inspection fédérale de la sécurité nucléaire (IFSN), la Nagra doit procéder à une analyse de sûreté provisoire pour chaque domaine d'implantation et à une comparaison des aspects relevant de la sûreté. Sur cette base, elle doit ensuite effectuer une évaluation globale. Celle-ci va finalement permettre de proposer les domaines d'implantation géologiques qui seront retenus pour l'étape 3.

Le présent rapport a pour objet de proposer les domaines d'implantation géologiques pour les dépôts DFMA et DHA qui seront retenus pour les examens approfondis effectués à l'étape 3 du plan sectoriel, et de motiver ces choix. A cet effet, il détaille les exigences posées et les procédures qui en découlent, présente brièvement les documents requis pour l'évaluation et la procédure de sélection et explique la démarche progressive qui a permis d'affiner la sélection. Cette démarche comprend cinq phases distinctes:

- *Phase 1* : la méthodologie utilisée lors de l'étape 1 est adaptée aux nouvelles conditions cadres. A côté des exigences spécifiées dans le plan sectoriel et des précisions apportées par l'ENSI, il est notamment tenu compte des commentaires effectués par les autorités à l'issue de l'étape 1 ainsi que des caractéristiques spécifiques des roches d'accueil et des domaines d'implantation géologiques qui ont été définis. L'optimisation des propositions issues de la première étape fait ici partie des préoccupations principales. Sa mise en œuvre s'effectue en trois temps: définition des roches d'accueil prioritaires dans les domaines comptant plus d'une telle roche, délimitation de périmètres optimisés pour les dépôts à l'intérieur des domaines d'implantations géologiques retenus, mise à l'écart des domaines géologiques présentant de nets désavantages (cf. phases 2, 3 et 5).
- *Phase 2* : dans les domaines d'implantation pour le dépôt DFMA qui comptent plus d'une roche d'accueil, une comparaison basée sur des critères de sûreté permet de déterminer la roche d'accueil prioritaire qui sera examinée plus en détail par la suite. Cette phase ne s'applique pas au dépôt DHA, dans la mesure où l'Argile à Opalinus a déjà été définie comme roche d'accueil au cours de l'étape 1. Pour le dépôt DFMA, à l'exception du domaine d'implantation du Wellenberg, l'Argile à Opalinus a également été définie comme roche d'accueil.
- *Phase 3* : une configuration spatiale optimisée des roches d'accueil prioritaires est identifiée au sein des domaines d'implantation définis au cours de l'étape 1 (délimitation de périmètres optimisés pour les dépôts).
- *Phase 4* : les domaines d'implantation géologiques et les périmètres de dépôt qui y ont été délimités sont examinés du point de vue de la sûreté. Cet examen se fait sur la base de calculs de dose (intervalles de dose caractéristiques) et d'une évaluation qualitative reposant sur les critères de sûreté et de faisabilité technique définis dans le plan sectoriel.
- *Phase 5* : on procède à une comparaison des aspects relatifs à la sûreté et à une évaluation comparative globale des différents domaines d'implantation géologiques et des périmètres de dépôt correspondants. Ces appréciations sont basées sur les caractéristiques définies par l'IFSN (identification de domaines d'implantation présentant de nets désavantages).

Pour mettre en œuvre cette méthodologie, on a utilisé, outre les informations déjà utilisées à l'étape 1, celles qui ont été élaborées dans l'intervalle, provenant en particulier de la participation aux forages de tiers, de la nouvelle campagne de sismique 2D et du retraitement de données sismiques. Afin de vérifier l'impact potentiel des incertitudes existantes sur les propositions, des situations et des valeurs de paramètres alternatives ont été au besoin évaluées à chaque phase de la mise en œuvre.

Cette procédure a permis d'affiner la sélection jusqu'à obtenir pour chacun des dépôts (DFMA et DHA) deux domaines d'implantation géologiques, que la Nagra – pour le compte des responsables de la gestion des déchets – propose à présent d'étudier plus en détail au cours de l'étape 3.

Pour le dépôt DFMA, il s'agit des domaines d'implantation géologiques suivants :

- Zürich Nordost (ZH, TG), avec l'aire d'implantation ZNO-6b pour les installations de surface
- Jura Ost (AG), avec l'aire d'implantation JO-3+ pour les installations de surface.

Pour le dépôt DHA, il s'agit des domaines d'implantation géologiques suivants :

- Zürich Nordost (ZH, TG), avec l'aire d'implantation ZNO-6b pour les installations de surface
- Jura Ost (AG), avec l'aire d'implantation JO-3+ pour les installations de surface.

Dans les deux domaines, il est possible d'implanter le dépôt DFMA et le dépôt DHA sur le même site et de mettre en œuvre un dépôt dit «combiné».

Les autorités vont examiner les propositions qui leur ont été soumises. La décision du Conseil fédéral concernant les domaines d'implantation géologiques proposés est attendue dans 2 ans et demi environ, après une procédure de consultation. Suivra l'étape 3 du plan sectoriel, à savoir l'examen approfondi des domaines d'implantation géologiques retenus pour les dépôts DFMA et DHA, en vue de la sélection des sites et de la préparation des demandes d'autorisation générale. Selon l'OFEN, ces dernières devraient être déposées dans les cinq ans environ après la fin de l'étape 2 ; la sélection définitive des sites pour dépôts en couches géologiques profondes DFMA et DHA sera ensuite avalisée par le Conseil fédéral, qui devrait octroyer l'autorisation générale autour de 2027. Cette autorisation devra être approuvée par le Parlement, puis sera soumise au référendum facultatif au niveau national. Viendront ensuite la construction du laboratoire souterrain à l'emplacement du site de stockage et l'exploration du sous-sol, qui déboucheront sur la demande d'autorisation de construire ; d'après le calendrier de réalisation actuel, l'exploitation du dépôt DFMA devrait débuter en 2050, celle du dépôt DHA en 2060.

Abstract

A number of important steps have been taken in Switzerland towards ensuring the safe management and disposal of radioactive waste. These include the conditioning and packaging of the waste already available, waste characterisation, the development of inventories as well as interim storage and the associated transport campaigns. The preparations for deep geological disposal make use of a sound scientific and technical basis; the feasibility of safe long-term disposal of all wastes arising in Switzerland in deep geological repositories has been demonstrated in so-called 'Entsorgungsnachweis' projects and was confirmed by the Federal Government. The site selection process is set out in the conceptual part of the "Sectoral Plan for Deep Geological Repositories" that was launched by the Federal Government in 2008. The lead authority in the process is the Swiss Federal Office of Energy (SFOE). The conceptual part of the Sectoral Plan specifies that the selection of sites for geological repositories in Switzerland is to be conducted in three stages. Stage 1 ended in 2011 with the identification of six potential geological siting regions. The repository projects will be concretised within these siting regions in Stages 2 and 3 of the process and safety will be evaluated in more detail. This will ultimately lead to the identification of the sites for repository implementation and granting of the general licences.

For Stage 1 of the process, Nagra proposed six geological siting regions for the repository for low- and intermediate-level waste (L/ILW) and three for the repository for high-level waste (HLW) in November 2008. These siting proposals were prepared on the basis of criteria relating to safety and technical feasibility, as well as other requirements set out in the Sectoral Plan. It was noted for the three siting regions that were proposed for both the HLW and the L/ILW repositories that the two repository types could be co-located at the same site; the term used for such a facility is a 'combined repository'. The siting regions proposed by Nagra were entered in the Sectoral Plan with a decision by the Federal Council in November 2011.

In Stage 2, proposals for siting the repository surface facility within the so-called planning perimeters of the regions had to be prepared together with the siting regions and the affected Cantons for potential areas. Nagra put forward siting proposals for the surface facility at the beginning of Stage 2 and these then formed the basis for a discussion and cooperation with the regional participation bodies. The proposals were evaluated and reviewed by the regions and the Cantons during the course of Stage 2 and were also, upon their request, modified and supplemented with additional proposals. As a result, Nagra was able to propose at least one siting area for the surface facility in each of the siting regions and to complete the associated planning studies. These planning studies serve as the basis for the socio-economic-ecological impact studies for each region that are prepared under the lead of the SFOE and for the preliminary investigations for the environmental impact assessment to be conducted at a later stage.

Stage 2 also includes a narrowing-down of the potential geological siting regions to at least two for each repository type for further investigation for Stage 3. This is done by conducting a safety-based comparison of the siting regions, with the highest priority being assigned to the long-term safety of the repository. A geological siting region can only be placed in reserve in Stage 2 if it shows clear disadvantages in terms of safety compared with the other regions. Aspects of spatial planning, ecology, economy and society are of secondary importance as selection criteria and the socio-economic studies have no impact on the selection of the geological siting regions.

According to the Sectoral Plan and the requirements specified by the Swiss Federal Nuclear Safety Inspectorate (ENSI), Nagra has to carry out a provisional safety analysis and a safety-based comparison for each siting region; an overall comparative assessment is then carried out based on the results. Based on this comparative assessment, geological siting regions are to be proposed for further investigation for Stage 3.

The purpose of the present report is to propose the geological siting regions for the HLW and L/ILW repositories for further investigation for Stage 3 and to explain and justify these proposals. The requirements behind the selection procedure are explained and an overview is provided of the information used for evaluating and narrowing down the sites and the stepwise narrowing-down process is explained. The proposals were prepared in five steps:

- In *the first step*, the methodology used in Stage 1 is modified to address the changes in boundary conditions. Besides the requirements set out in the conceptual part of the Sectoral Plan and the specifications provided by ENSI, the comments and reviews made by the authorities on Stage 1 and the specific properties of the host rocks and geological siting regions proposed in Stage 1 are also taken into consideration. Optimisation is considered a key element in Stage 2 of the process: in order to make best possible use of the proposals from Stage 1, a three-stage optimisation is undertaken (identifying the priority host rocks in the siting regions with more than one potential host rock, defining optimised disposal perimeters within the geological siting regions and placing siting regions with clear disadvantages into reserve; cf. steps 2, 3 and 5).
- In *the second step*, a safety-based comparison of the host rocks leading to identification of the priority host rock that will be used for the next steps is carried out in the siting regions for the L/ILW repository with more than one host rock. This step is not required for the HLW repository as only the Opalinus Clay was identified as a host rock in Stage 1.
- In *the third step*, an optimised spatial configuration of the priority host rock is selected within the siting regions identified in Stage 1 (identification of optimised disposal perimeters).
- In *the fourth step*, the suitability of the geological siting regions and the associated disposal perimeters in terms of safety is reviewed, on the one hand using dose calculations (characteristic dose intervals) and, on the other hand, through a qualitative assessment using the criteria relating to safety and technical feasibility set out in the Sectoral Plan.
- The *fifth step* involves a safety-based comparison and overall comparative assessment of the geological siting regions and the associated disposal perimeters based on the relevant features specified by ENSI (identification of siting regions with clear disadvantages).

To implement the methodology, the information from Stage 1 is used as well as new data acquired in the meantime, particularly from participation in drilling projects by third parties, new 2D seismic investigations and reprocessing of existing seismic results. Where necessary, alternative situations and parameter values are evaluated in each assessment step in order to investigate the sensitivity of the siting proposals to existing uncertainties.

The procedure has led to the identification of two geological siting regions each for the L/ILW and HLW repositories. These are proposed by Nagra, on behalf of the waste producers, for further investigation for Stage 3 of the Sectoral Plan process.

The siting regions proposed for the L/ILW repository are

- Zürich Nordost (Cantons ZH, TG) with the siting area ZNO-6b for the surface facility and
- Jura Ost (Canton AG) with the siting area JO-3+ for the surface facility

and the siting regions proposed for the HLW repository are

- Zürich Nordost (Cantons ZH, TG) with the siting area ZNO-6b for the surface facility and
- Jura Ost (Canton AG) with the siting area JO-3+ for the surface facility.

The potential exists in both regions for constructing the L/ILW and HLW repositories at the same site, i.e. a so-called combined repository.

The proposals submitted will be reviewed by the authorities. Following an open consultation phase, the decision of the Federal Council on the proposed geological siting regions is expected in around two and a half years. In Stage 3, the siting regions for HLW and L/ILW remaining in the process will undergo more detailed investigations with a view to selecting the sites for the preparation of the general licence applications. According to the SFOE, the general licence applications will be submitted around 5 years after the end of Stage 2 and the siting decision for the repositories for HLW and L/ILW will be made by the Federal Council around 2027. The general licence has to be approved by Parliament and is subject to an optional national referendum. This will be followed by the construction of a site-specific rock laboratory and an underground investigation programme, leading to the nuclear construction licencing procedure. According to current planning, the start of the operational phase for the L/ILW repository is scheduled for 2050 and that for the HLW repository for 2060.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	I
Résumé	V
Abstract	IX
Inhaltsverzeichnis.....	XIII
Tabellenverzeichnis.....	XVII
Figurenverzeichnis	XX
1 Einleitung	1
1.1 Ausgangslage und Zielsetzung des Berichts.....	1
1.2 Aufbau des Berichts.....	3
2 Vorgaben, Vorgehen und wichtige Grundlagen	5
2.1 Vorgaben aus dem Konzept Sachplan geologische Tiefenlager und aus zugehörigen Berichten	5
2.1.1 Überblick und Begriffsdefinitionen	5
2.1.2 Vorgaben zum Vorgehen in Etappe 2.....	6
2.1.3 Präzisierungen zum Vorgehen in Etappe 2.....	11
2.1.4 Anforderungen des ENSI an die Dokumentation in Etappe 2	15
2.1.5 Weitere Vorgaben und Hinweise.....	16
2.2 Rahmenbedingungen und Festlegungen	17
2.2.1 Ausgangslage.....	17
2.2.2 Wichtige Grundlagen und Konzepte	21
2.3 Vorgehen bei den provisorischen Sicherheitsanalysen und beim sicherheitstechnischen Vergleich der geologischen Standortgebiete	26
2.3.1 Schrittweises Vorgehen, Festlegung der verwendeten Indikatoren sowie Umgang mit Variabilität und Ungewissheiten.....	26
2.3.2 Vorgehen bei der Prüfung der sicherheitstechnischen Eignung und Gleich- wertigkeit sowie bei der Bewertung und Priorisierung der Wirtgesteine	40
2.3.3 Vorgehen bei der Abgrenzung von untertägigen Lagerperimetern in den geologischen Standortgebieten	48
2.3.4 Vorgehen bei der Prüfung der sicherheitstechnischen Eignung und Gleichwertigkeit der geologischen Standortgebiete	52
2.3.5 Vorgehen bei der qualitativen Bewertung der geologischen Standortgebiete	54
2.3.6 Vorgehen bei der vergleichenden Gesamtbewertung und beim sicherheitstechnischen Vergleich.....	59
2.3.7 Zusammenfassende Darstellung des Verfahrens	62
3 Bewertung der Wirtgesteine und Auswahl der prioritären Wirtgesteine	65
3.1 Vorgehen und verwendete Grundlagen	65
3.1.1 Ausgangslage.....	65

3.1.2	Vorgehen bei den Dosisberechnungen	68
3.1.3	Vorgehen bei der qualitativen Bewertung	70
3.1.4	Unterlagen	71
3.1.5	Einhaltung der Mindest- und verschärften Anforderungen gemäss Etappe 1	71
3.2	Wirtgesteinspezifische Dosisberechnungen für das SMA-Lager.....	85
3.2.1	Charakteristische Dosisintervalle	86
3.2.2	Hinweise aus den Dosisberechnungen für die qualitative Bewertung ausgewählter Indikatoren.....	96
3.2.3	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen.....	101
3.3	Charakterisierung und qualitative Bewertung der Wirtgesteine für das SMA- und HAA-Lager	102
3.3.1	Opalinuston.....	105
3.3.2	Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger'.....	113
3.3.3	Effinger Schichten	121
3.3.4	Mergel-Formationen des Helvetikums	128
3.3.5	Zusammenfassung der qualitativen Bewertung der Wirtgesteine für das SMA-Lager	137
3.3.6	Charakterisierung und qualitative Bewertung des Opalinustons für das HAA-Lager	142
3.3.7	Zusammenfassung der qualitativen Bewertung des Opalinustons für das HAA-Lager	147
3.4	Bewertung der Wirtgesteine für das SMA-Lager anhand der entscheid- relevanten Merkmale und Identifikation von eindeutigen Nachteilen.....	151
3.4.1	Bewertungsergebnisse	152
3.4.2	Zusammenfassung der eindeutigen Nachteile der Wirtgesteine für das SMA-Lager	158
3.5	Vergleichende Gesamtbewertung der Wirtgesteine und Auswahl der prioritären Wirtgesteine für das SMA-Lager.....	161
4	Abgrenzung optimierter Lagerperimeter und deren Bewertung.....	165
4.1	Vorgehen und verwendete Grundlagen	165
4.2	Abgrenzung von untertägigen Lagerperimetern in den geologischen Standortgebieten	180
4.2.1	Vorgehen und verwendete Grundlagen	180
4.2.2	Lagerperimeter vor der Optimierung, Grobcharakterisierung der Lagerperimeter sowie Festlegung der Optimierungsstrategie	181
4.2.3	Abgrenzung optimierter Lagerperimeter (Teilschritt 2)	188
4.2.4	Abgrenzung der Lagerperimeter für das Standortgebiet Wellenberg	203
4.2.5	Tabellarische Übersicht der betrachteten Lagerperimeter	214
4.3	Prüfung der sicherheitstechnischen Eignung und Gleichwertigkeit der geologischen Standortgebiete sowie Bewertung der Wirksamkeit der Barrierensysteme	220
4.3.1	Vorgehen und verwendete Grundlagen	220
4.3.2	Charakteristische Dosisintervalle	220

4.3.3	Hinweise aus den Dosisberechnungen für die qualitative Bewertung ausgewählter Indikatoren.....	235
4.3.4	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen.....	237
4.4	Beschreibung und qualitative Bewertung der geologischen Standortgebiete.....	237
4.4.1	Vorgehen und verwendete Grundlagen.....	237
4.4.2	Charakterisierung und Bewertung der geologischen Standortgebiete für das SMA-Lager und das HAA-Lager bezüglich grossräumiger Aspekte.....	252
4.4.3	Charakterisierung und Bewertung der geologischen Standortgebiete für das SMA-Lager.....	256
4.4.3.1	Einleitung.....	256
4.4.3.2	SMA-Lagerperimeter Südranden (SMA-SR).....	256
4.4.3.3	SMA-Lagerperimeter Zürich Nordost (SMA-ZNO).....	262
4.4.3.4	SMA-Lagerperimeter Nördlich Lägern (SMA-NL).....	267
4.4.3.5	SMA-Lagerperimeter Jura Ost (SMA-JO).....	273
4.4.3.6	SMA-Lagerperimeter Jura-Südfuss (SMA-JS).....	279
4.4.3.7	SMA-Lagerperimeter Wellenberg (SMA-WLB).....	285
4.4.3.8	Zusammenfassung der Bewertung der geologischen Standortgebiete für das SMA-Lager.....	292
4.4.4	Charakterisierung und Bewertung der geologischen Standortgebiete für das HAA-Lager.....	298
4.4.4.1	Einleitung.....	298
4.4.4.2	HAA-Lagerperimeter Zürich Nordost (HAA-ZNO).....	298
4.4.4.3	HAA-Lagerperimeter Nördlich Lägern (HAA-NL).....	303
4.4.4.4	HAA-Lagerperimeter Jura Ost (HAA-JO).....	310
4.4.4.5	Zusammenfassung der Bewertung der geologischen Standortgebiete für das HAA-Lager.....	316
5	Sicherheitstechnischer Vergleich der geologischen Standortgebiete.....	323
5.1	Vorgehen und verwendete Grundlagen.....	323
5.2	Bewertung der geologischen Standortgebiete anhand der entscheidrelevanten Merkmale und Identifikation von eindeutigen Nachteilen.....	324
5.2.1	Bewertungsergebnisse.....	324
5.2.1.1	SMA-Lager.....	325
5.2.1.2	HAA-Lager.....	332
5.2.2	Zusammenfassung der eindeutigen Nachteile der Standortgebiete.....	337
5.2.2.1	SMA-Lager.....	338
5.2.2.2	HAA-Lager.....	340
5.3	Vergleichende Gesamtbewertung der geologischen Standortgebiete unter Berücksichtigung aller Informationen.....	349
6	Hinweise für die Standortuntersuchungen für Etappe 3.....	357

7	Schlussfolgerungen	363
7.1	Ausgangslage und Bezeichnung der für die weiteren Untersuchungen in Etappe 3 vorgeschlagenen geologischen Standortgebiete	363
7.2	Vorgaben und Vorgehen sowie verwendete Grundlagen für die Erarbeitung der Vorschläge	366
7.2.1	Vorgaben und Vorgehen.....	366
7.2.2	Geologische Unterlagen und Beurteilung des Kenntnisstands für die Einengung.....	367
7.3	Begründung der vorgeschlagenen geologischen Standortgebiete: Resultate des sicherheitstechnischen Vergleichs.....	370
7.3.1	Begründungen für das SMA-Lager	370
7.3.2	Begründungen für das HAA-Lager	378
7.4	Plausibilität der vorgeschlagenen geologischen Standortgebiete	381
7.5	Ausblick.....	382
8	Literaturverzeichnis	385

Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1-1:	Übergeordnete Vorgaben bei der Auswahl von geologischen Standortgebieten in Etappe 2.....	7
Tab. 2.1-2:	Kriteriengruppen und Kriterien zur Sicherheit und technischen Machbarkeit für die Standortevaluation gemäss SGT.....	11
Tab. 2.1-3:	Vorgaben des ENSI bezüglich des sicherheitstechnischen Vergleichs von geologischen Standortgebieten in Etappe 2.	12
Tab. 2.1-4:	Vorgaben des ENSI bezüglich des standardisierten Parametervariationsverfahrens für den Vergleich von geologischen Standortgebieten in Etappe 2.....	13
Tab. 2.1-5:	Vorgaben des ENSI bezüglich entscheidrelevanter Merkmale in Etappe 2.....	14
Tab. 2.1-6:	Vorgaben des ENSI bezüglich der Dokumentation der provisorischen Sicherheitsanalysen und des sicherheitstechnischen Vergleichs in Etappe 2.	16
Tab. 2.1-7:	Übergeordnete Vorgaben an die bautechnische Risikoanalysen und an die ergänzenden Sicherheitsbetrachtungen für die Zugangsbauwerke in Etappe 2.....	17
Tab. 2.2-1:	Geologische Standortgebiete mit ihren Wirtgesteinen und Rahmengesteinen gemäss Etappe 1 (BFE 2011).....	20
Tab. 2.3-1:	Liste der bei der Optimierung in Etappe 2 verwendeten entscheidrelevanten Merkmale und der zugehörigen Indikatoren.	31
Tab. 2.3-2:	Detaillierte Liste der bei der Bewertung, Optimierung und Einengung in Etappe 2 verwendeten Indikatoren (Mastertabelle).	32
Tab. 2.3-3:	Verwendete Indikatoren für die qualitative Bewertung der Wirtgesteine in Etappe 2.....	45
Tab. 2.3-4:	Entscheidrelevante Merkmale und Indikatoren für die Identifikation eindeutiger Nachteile der Wirtgesteine.	47
Tab. 2.3-5:	Indikatoren für die Abgrenzung der Lagerperimeter für das SMA- und HAA-Lager.	49
Tab. 2.3-6:	Indikatoren zur Tiefenlage und ihre funktionale Bedeutung bei der Optimierung der Lagerperimeter für das Beispiel des Opalinustons.	52
Tab. 2.3-7:	Verwendete Indikatoren für die qualitative Bewertung der geologischen Standortgebiete bzw. der zugehörigen Lagerperimeter in Etappe 2.	57
Tab. 2.3-8:	Entscheidrelevante Merkmale und Indikatoren für die Identifikation eindeutiger Nachteile der geologischen Standortgebiete bzw. der zugehörigen Lagerperimeter.	61
Tab. 3.1-1:	Mächtigkeiten der lithofaziellen Einheiten für das geologische Standortgebiet Südranden.....	77
Tab. 3.1-2:	Mächtigkeiten der lithofaziellen Einheiten für das geologische Standortgebiet Zürich Nordost.	78
Tab. 3.1-3:	Mächtigkeiten der lithofaziellen Einheiten für das geologische Standortgebiet Nördlich Lägern.	79

Tab. 3.1-4:	Mächtigkeiten der lithofaziellen Einheiten für das geologische Standortgebiet Jura Ost.....	80
Tab. 3.1-5:	Mächtigkeiten der lithofaziellen Einheiten für das geologische Standortgebiet Jura-Südfuss.	81
Tab. 3.1-6:	Relevante Transportpfadlängen in den Mergel-Formationen des Helvetikums für das geologische Standortgebiet Wellenberg (vgl. dazu Nagra 2014b, Dossier VI).	83
Tab. 3.1-7:	Zusammenfassung der (schichtquerenden) hydraulischen Parameter der lithofaziellen Einheiten in den Wirtgesteinsformationen (vgl. Nagra 2014b, Dossier VI).....	84
Tab. 3.2-1:	Verwendung von Rechenfällen zur Ableitung von Hinweisen für die qualitative Bewertung ausgewählter Indikatoren (vgl. Nagra 2014a).....	96
Tab. 3.2-2:	Dosismaxima für Rechenfälle zur Ableitung von Hinweisen für die qualitative Bewertung des Indikators 'Hydraulische Durchlässigkeit' bei der Bewertung der Wirtgesteine (vgl. Nagra 2014a).	98
Tab. 3.2-3:	Dosismaxima für Rechenfälle zur Ableitung von Hinweisen für die qualitative Bewertung der Indikatoren 'Art der Transportpfade und Ausbildung des Porenraums' und 'Transmissivität präferenzierter Freisetzungspfade' bei der Bewertung der Wirtgesteine (vgl. Nagra 2014a).	100
Tab. 3.2-4:	Dosismaxima für Rechenfälle zur Ableitung von Hinweisen für die qualitative Bewertung des Indikators 'Länge der massgebenden Freisetzungspfade' bei der Bewertung der Wirtgesteine (vgl. Nagra 2014a).....	101
Tab. 3.3-1:	Zusammenfassende Darstellung der Bewertungsergebnisse für die Wirtgesteine in den geologischen Standortgebieten für das SMA-Lager (massgebender Fall für die Einengung).	140
Tab. 3.3-2:	Zusammenfassende Darstellung der Bewertungsergebnisse für den Opalinuston in den geologischen Standortgebieten für das HAA-Lager (massgebender Fall für die Einengung).	148
Tab. 3.4-1:	Bewertung der entscheiderelevanten Merkmale und der zugehörigen Indikatoren für die Wirtgesteine für das SMA-Lager und die daraus abgeleiteten Hinweise auf eindeutige Nachteile (massgebender Fall für die Einengung).	154
Tab. 3.4-2:	Zusammenfassung der Hinweise auf eindeutige Nachteile und daraus abgeleitete eindeutige Nachteile der Wirtgesteine auf Stufe der entscheiderelevanten Merkmale und der zugehörigen Indikatoren (massgebender Fall für die Einengung).	159
Tab. 4.2-1:	Hinweise aus der Grobcharakterisierung der geologischen Standortgebiete in der Nordschweiz hinsichtlich der Indikatoren, die für die Optimierung der Lagerperimeter wichtig und daher prioritär zu berücksichtigen sind.....	188
Tab. 4.2-2:	Unterscheidung zwischen massgebender Konzeptualisierung für die Einengung und alternativer Konzeptualisierung hinsichtlich der Annahme zur Bildung einer Durchbruchsrinne in den einzelnen geologischen Standortgebieten der Nordschweiz.	202
Tab. 4.2-3:	Ausgewählte Kenndaten für die relevanten Lagerperimeter sowie Erläuterungen zu den Ungewissheiten und Sensitivitäten.	214

Tab. 4.3-1:	Dosismaxima für Rechenfälle zur Ableitung von Hinweisen für die qualitative Bewertung des Indikators "Mächtigkeit" bei der Bewertung der Standortgebiete (vgl. Nagra 2014a).	236
Tab. 4.4-1:	Bewertungsskalen für vier Schlüsselindikatoren mit Modifikationen gegenüber Etappe 1.	240
Tab. 4.4-2:	Zusammenfassende Darstellung der Bewertungsergebnisse für die Lagerperimeter in den geologischen Standortgebieten für das SMA-Lager (massgebender Fall für die Einengung).	294
Tab. 4.4-3:	Zusammenfassende Darstellung der Bewertungsergebnisse für die Lagerperimeter in den geologischen Standortgebieten für das HAA-Lager (massgebender Fall für die Einengung).	318
Tab. 5.2-1:	Bewertung der entscheiderelevanten Merkmale und der zugehörigen Indikatoren für die Standortgebiete bzw. die zugehörigen Lagerperimeter für das SMA-Lager und die daraus abgeleiteten Hinweise auf eindeutige Nachteile (massgebender Fall für die Einengung).	328
Tab. 5.2-2:	Bewertung der entscheiderelevanten Merkmale und der zugehörigen Indikatoren für die Standortgebiete bzw. die zugehörigen Lagerperimeter für das HAA-Lager und die daraus abgeleiteten Hinweise auf eindeutige Nachteile (massgebender Fall für die Einengung).	334
Tab. 5.2-3:	Zusammenfassung der Hinweise auf eindeutige Nachteile und daraus abgeleitete eindeutige Nachteile der Standortgebiete und zugehörigen Lagerperimeter auf Stufe der entscheiderelevanten Merkmale und der zugehörigen Indikatoren für das SMA-Lager (massgebender Fall für die Einengung).	341
Tab. 5.2-4:	Zusammenfassung der Hinweise auf eindeutige Nachteile und daraus abgeleitete eindeutige Nachteile der Standortgebiete und zugehörigen Lagerperimeter auf Stufe der entscheiderelevanten Merkmale und der zugehörigen Indikatoren für das HAA-Lager (massgebender Fall für die Einengung).	346

Figurenverzeichnis

Fig. 2.1-1:	Vorgaben des ENSI bezüglich der zu verwendenden sicherheitstechnischen Methodik für die Auswahl von geologischen Standortgebieten in Etappe 2.	8
Fig. 2.1-2:	Vorgaben des ENSI bezüglich der Bestimmung des charakteristischen Dosisintervalls mit Hilfe des standardisierten Parametervariationsverfahrens.	9
Fig. 2.1-3:	Vorgaben des ENSI bezüglich der Beurteilung der charakteristischen Dosisintervalle.	10
Fig. 2.2-1:	Klassifizierung von geologischen Elementen im Wirtgestein bzw. einschliesswirksamen Gebirgsbereich im Hinblick auf die Anordnung der Lagerkammern und auf die Einlagerung von Endlagerbehältern.	24
Fig. 2.3-1:	In Etappe 2 verwendete Bewertungsstufen (inkl. verfeinerte Abstufung) für die qualitative Bewertung.	38
Fig. 2.3-2:	Vorgehen bei der Aggregation der qualitativen Bewertungen aller wirtgesteinsspezifischen Indikatoren (oben) bzw. der entscheiderelevanten Indikatoren im Hinblick auf die Identifikation eindeutiger Nachteile der Wirtgesteine (unten).	44
Fig. 2.3-3:	Vorgehen bei der Aggregation der qualitativen Bewertungen aller Indikatoren zur Gesamtbewertung (oben) bzw. der entscheiderelevanten Indikatoren zu den entscheiderelevanten Merkmale zur Identifikation eindeutiger Nachteile der geologischen Standortgebiete bzw. der zugehörigen Lagerperimeter (unten).	56
Fig. 2.3-4:	Schematische Darstellung des Vorgehens bei der vergleichenden Gesamtbewertung unter Berücksichtigung aller Informationen.	62
Fig. 2.3-5:	Schematische Darstellung des gesamten Verfahrens in 5 Schritten.	64
Fig. 3.1-1:	Stratigraphische Übersichtskorrelation wichtiger Bohrungen und Aufschlüsse für die Standortgebiete in der Nordschweiz (aus Nagra 2014b, Dossier VI).	73
Fig. 3.1-2:	Schematische Darstellung der Wirkung von Versätzen und Diskontinuitäten auf den Wasserfluss in den "harten Bänken" und in den tonreichen Abfolgen (vgl. Nagra 2014b, Dossier VI).	74
Fig. 3.1-3:	Geologische Konzeptbilder der Gesteinsprofile für die Standortgebiete in der Nordschweiz mit den die Barrierenwirkung potenziell beeinflussenden "harten Bänken" (vgl. Nagra 2014b, Dossier VI).	75
Fig. 3.1-4:	Zusammenhang zwischen mittlerem Tonmineralgehalt und grossräumiger hydraulischer Durchlässigkeit (vgl. Nagra 2014b, Dossier VI).	76
Fig. 3.1-5:	Geologisches Konzeptbild und Radionuklidfreisetzungspfade für die Mergel-Formationen im geologischen Standortgebiet Wellenberg (vgl. dazu Nagra 2014b, Dossier VI).	83
Fig. 3.2-1:	Übersicht der wirtgesteinsspezifischen Dosiskurven für das SMA-Lager für die verschiedenen Standortgebiete, in denen mehr als ein Wirtgestein vorkommt, sowie die resultierenden charakteristischen Dosisintervalle, vgl. Nagra (2014a).	88

Fig. 3.2-2:	Zusammenfassende Darstellung der charakteristischen Dosisintervalle für die Wirtgesteine für das SMA-Lager für diejenigen Standortgebiete, in denen mehr als ein Wirtgestein vorkommt, vgl. Nagra (2014a).	89
Fig. 3.2-3:	Dosiskurven für das SMA-Lager mit dem Wirtgestein Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger' im Standortgebiet Zürich Nordost (SMA-ZNO-BD), vgl. Nagra (2014a).	90
Fig. 3.2-4:	Dosiskurven für das SMA-Lager mit dem Wirtgestein Opalinuston im Standortgebiet Zürich Nordost (SMA-ZNO-OPA), vgl. Nagra (2014a).....	91
Fig. 3.2-5:	Dosiskurven für das SMA-Lager mit dem Wirtgestein Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger' im Standortgebiet Nördlich Lägern (SMA-NL-BD), vgl. Nagra (2014a).	92
Fig. 3.2-6:	Dosiskurven für das SMA-Lager mit dem Wirtgestein Opalinuston im Standortgebiet Nördlich Lägern (SMA-NL-OPA), vgl. Nagra (2014a).	93
Fig. 3.2-7:	Dosiskurven für das SMA-Lager mit dem Wirtgestein Effinger Schichten im Standortgebiet Jura-Südfuss (SMA-JS-EFF), vgl. Nagra (2014a).....	94
Fig. 3.2-8:	Dosiskurven für das SMA-Lager mit dem Wirtgestein Opalinuston im Standortgebiet Jura-Südfuss (SMA-JS-OPA), vgl. Nagra (2014a).....	95
Fig. 3.3-1:	Zusammenfassende Darstellung der Bewertungsergebnisse für die Wirtgesteine in den geologischen Standortgebieten für das SMA-Lager (massgebender Fall für die Einengung).	141
Fig. 3.3-2:	Zusammenfassende Darstellung der Bewertungsergebnisse für den Opalinuston in den geologischen Standortgebieten für das HAA-Lager (massgebender Fall für die Einengung).	149
Fig. 3.4-1:	Zusammenfassende Darstellung der Bewertungsergebnisse für die Wirtgesteine für das SMA-Lager in den geologischen Standortgebieten mit mehr als einem Wirtgestein (entscheidrelevante Merkmale und Indikatoren, massgebender Fall für die Einengung).....	156
Fig. 4.1-1:	Datenlage: Darstellung der bei der Erstellung der Unterlagen für SGT Etappe 1 vorhandenen Daten und der nachher erhobenen Daten (Seismik, Bohrungen (Auswahl)).....	166
Fig. 4.1-2:	Karte der regionalen tektonischen Elemente (regionale Störungszonen und zu meidende tektonische Zonen) in der Nordschweiz (vgl. Nagra 2014b, Dossier II).	168
Fig. 4.1-3:	Die bei der Abgrenzung optimierter Lagerperimeter und ihrer Bewertung betrachteten Erosionsmechanismen (Nagra 2014b, Dossier III).....	172
Fig. 4.1-4:	Karte der Tiefenlage von Top Opalinuston (Basis OPA minus 100 m) unter Terrain in der Nordschweiz (Nagra 2014b, Dossier III).	173
Fig. 4.1-5:	Karte der lokalen Erosionsbasis in der Nordschweiz (Nagra 2014b, Dossier III).	174
Fig. 4.1-6:	Karte der Tiefenlage von Top Opalinuston (Basis OPA minus 100 m) unter lokaler Erosionsbasis in der Nordschweiz (Nagra 2014b, Dossier III).....	175
Fig. 4.1-7:	Karte der Tiefenlage von Top Opalinuston (Basis OPA minus 100 m) unter Top Fels in der Nordschweiz (Nagra 2014b, Dossier III).....	176

Fig. 4.1-8:	Karte der Tiefenlage der Lagerebene unter Terrain in der Nordschweiz – Referenzfall.....	177
Fig. 4.1-9:	Karte der Tiefenlage der Lagerebene unter Terrain in der Nordschweiz – untiefere Lage des Wirtgesteins.....	178
Fig. 4.1-10:	Karte der Tiefenlage der Lagerebene unter Terrain in der Nordschweiz – tiefere Lage des Wirtgesteins.....	179
Fig. 4.2-1:	Lagerperimeter für das SMA-Lager im geologischen Standortgebiet Südranden (SR): Lagerperimeter vor der Optimierung (Resultat von Teilschritt 1).....	182
Fig. 4.2-2:	Lagerperimeter für das SMA-Lager im geologischen Standortgebiet Zürich Nordost (ZNO): Lagerperimeter vor der Optimierung (Resultat von Teilschritt 1).....	182
Fig. 4.2-3:	Lagerperimeter für das SMA-Lager im geologischen Standortgebiet Nördlich Lägern (NL): Lagerperimeter vor der Optimierung (Resultat von Teilschritt 1).....	183
Fig. 4.2-4:	Lagerperimeter für das SMA-Lager im geologischen Standortgebiet Jura Ost (JO): Lagerperimeter vor der Optimierung (Resultat von Teilschritt 1).	183
Fig. 4.2-5:	Lagerperimeter für das SMA-Lager im geologischen Standortgebiet Jura-Südfuss (JS): Lagerperimeter vor der Optimierung (Resultat von Teilschritt 1).....	184
Fig. 4.2-6:	Lagerperimeter für das HAA-Lager im geologischen Standortgebiet Zürich Nordost (ZNO): Lagerperimeter vor der Optimierung (Teilschritt 1).	184
Fig. 4.2-7:	Lagerperimeter für das HAA-Lager im geologischen Standortgebiet Nördlich Lägern (NL): Lagerperimeter vor der Optimierung (Resultat von Teilschritt 1).....	185
Fig. 4.2-8:	Lagerperimeter für das HAA-Lager im geologischen Standortgebiet Jura Ost (JO): Lagerperimeter vor der Optimierung (Resultat von Teilschritt 1).	185
Fig. 4.2-9:	Übersicht über die geologischen Standortgebiete mit den zugehörigen Lagerperimetern für das SMA-Lager: Ergebnisse aus Teilschritt 2 (Lagerperimeter nach der Optimierung, resultierend in "massgebende Lagerperimeter für die Einengung"), teilweise zusätzlich mit "modellhaft modifizierten" Lagerperimetern.....	189
Fig. 4.2-10:	Übersicht über die geologischen Standortgebiete mit den zugehörigen Lagerperimetern für das HAA-Lager: Ergebnisse aus Teilschritt 2 (Lagerperimeter nach der Optimierung, resultierend in "massgebende Lagerperimeter für die Einengung"), teilweise zusätzlich mit "modellhaft modifizierten" Lagerperimetern.....	190
Fig. 4.2-11:	Lagerperimeter für das SMA-Lager im geologischen Standortgebiet Südranden (SR): Lagerperimeter nach der Optimierung (ohne östlichen Teil); massgebender Lagerperimeter für die Einengung (Teilschritt 2).....	191
Fig. 4.2-12:	Lagerperimeter für das SMA-Lager im geologischen Standortgebiet Zürich Nordost (ZNO): Lagerperimeter nach der Optimierung; massgebender Lagerperimeter für die Einengung (Teilschritt 2).	192

Fig. 4.2-13:	Lagerperimeter für das SMA-Lager im geologischen Standortgebiet Zürich Nordost (ZNO): Lagerperimeter nach der Optimierung; massgebender Lagerperimeter für die Einengung (Teilschritt 2); modellhaft modifiziert.	193
Fig. 4.2-14:	Lagerperimeter für das SMA-Lager im geologischen Standortgebiet Nördlich Lägern (NL): Lagerperimeter nach der Optimierung; massgebender Lagerperimeter für die Einengung (Teilschritt 2).....	194
Fig. 4.2-15:	Lagerperimeter für das SMA-Lager im geologischen Standortgebiet Jura Ost (JO): Lagerperimeter nach der Optimierung; massgebender Lagerperimeter für die Einengung (Teilschritt 2).....	194
Fig. 4.2-16:	Lagerperimeter für das SMA-Lager im geologischen Standortgebiet Jura Ost (JO): Lagerperimeter nach der Optimierung; massgebender Lagerperimeter für die Einengung (Teilschritt 2); modellhaft modifiziert.	195
Fig. 4.2-17:	Lagerperimeter für das SMA-Lager im geologischen Standortgebiet Jura-Südfuss (JS): Lagerperimeter nach der Optimierung; massgebender Lagerperimeter für die Einengung (Teilschritt 2).....	196
Fig. 4.2-18:	Lagerperimeter für das SMA-Lager im geologischen Standortgebiet Jura-Südfuss (JS): Lagerperimeter nach der Optimierung; massgebender Lagerperimeter für die Einengung (Teilschritt 2), modellhaft modifiziert.....	197
Fig. 4.2-19:	Lagerperimeter für das HAA-Lager im geologischen Standortgebiet Zürich Nordost (ZNO): Lagerperimeter nach der Optimierung; massgebender Lagerperimeter für die Einengung (Teilschritt 2).	198
Fig. 4.2-20:	Lagerperimeter für das HAA-Lager im geologischen Standortgebiet Zürich Nordost (ZNO): Lagerperimeter nach der Optimierung; massgebender Lagerperimeter für die Einengung (Teilschritt 2); modellhaft modifiziert.	199
Fig. 4.2-21:	Lagerperimeter für das HAA-Lager im geologischen Standortgebiet Nördlich Lägern (NL): Lagerperimeter nach der Optimierung; massgebender Lagerperimeter für die Einengung (Teilschritt 2).....	200
Fig. 4.2-22:	Lagerperimeter für das HAA-Lager im geologischen Standortgebiet Jura Ost (JO): Lagerperimeter nach der Optimierung; massgebender Lagerperimeter für die Einengung (Teilschritt 2).....	200
Fig. 4.2-23:	Lagerperimeter für das HAA-Lager im geologischen Standortgebiet Jura Ost (JO): Lagerperimeter nach der Optimierung; massgebender Lagerperimeter für die Einengung (Teilschritt 2); modellhaft modifiziert.	201
Fig. 4.2-24:	Tiefe unter Terrain der verschiedenen Lagerebenen (Zeitpunkt heute), vgl. Nagra (2014b, Dossier III).	205
Fig. 4.2-25:	Profile zur Tiefenlage von Bezugshorizonten am Ende des Betrachtungszeitraums von 100'000 Jahren für drei Szenarien zur Erosion, vgl. Nagra (2014b, Dossier III).....	206
Fig. 4.2-26a:	Tiefe der Lagerebenen unter Terrain nach 100'000 Jahren für das Szenarium mit einer glazialen Übertiefung von 50 m, vgl. Nagra (2014b, Dossier III).	207
Fig. 4.2-26b:	Tiefe der Lagerebenen unter Oberfläche Fels nach 100'000 Jahren für das Szenarium mit einer glazialen Übertiefung von 50 m, vgl. Nagra (2014b, Dossier III).	208

Fig. 4.2-27a: Tiefe der Lagerebenen unter Terrain nach 100'000 Jahren für das Szenarium mit einer glazialen Übertiefung von 200 m, vgl. Nagra (2014b, Dossier III).	209
Fig. 4.2-27b: Tiefe der Lagerebenen unter Oberfläche Fels nach 100'000 Jahren für das Szenarium mit einer glazialen Übertiefung von 200 m, vgl. Nagra (2014b, Dossier III).	210
Fig. 4.2-28a: Abstand zu Nebengestein für den "massgebenden Fall", wo die Palfris-Formation und das Tertiär als Wirtgestein genutzt werden, abgeleitet aus 3D-Modell des Wirtgesteinskörpers Wellenberg, vgl. Nagra (2014b, Dossier II).	211
Fig. 4.2-28b: Abstand zu Nebengestein für den "massgebenden Fall", wo nur die Palfris-Formation als Wirtgestein genutzt wird, abgeleitet aus 3D-Modell des Wirtgesteinskörpers Wellenberg, vgl. Nagra (2014b, Dossier II).	212
Fig. 4.2-29: Lagerperimeter für das SMA-Lager im geologischen Standortgebiet Wellenberg (WLB): Lagerperimeter nach der Optimierung für die drei Lagerebenen 540 m ü.M., 400 m ü.M. und 200 m ü.M.; massgebender Lagerperimeter für die Einengung (Teilschritt 2).	213
Fig. 4.3-1: Übersicht der Dosiskurven gemäss den Vorgaben des ENSI für die geologischen Standortgebiete sowie resultierende charakteristische Dosisintervalle, vgl. Nagra (2014a).	223
Fig. 4.3-2: Zusammenfassende Darstellung der charakteristischen Dosisintervalle gemäss den Vorgaben des ENSI für die verschiedenen geologischen Standortgebiete, vgl. Nagra (2014a).	225
Fig. 4.3-3: Dosiskurven für das SMA-Lager im Standortgebiet Südranden (SMA-SR), vgl. Nagra (2014a).	226
Fig. 4.3-4: Dosiskurven für das SMA-Lager im Standortgebiet Zürich Nordost (SMA-ZNO), vgl. Nagra (2014a).	227
Fig. 4.3-5: Dosiskurven für das SMA-Lager im Standortgebiet Nördlich Lägern (SMA-NL), vgl. Nagra (2014a).	228
Fig. 4.3-6: Dosiskurven für das SMA-Lager im Standortgebiet Jura Ost (SMA-JO), vgl. Nagra (2014a).	229
Fig. 4.3-7: Dosiskurven für das SMA-Lager im Standortgebiet Jura-Südfuss (SMA-JS), vgl. Nagra (2014a).	230
Fig. 4.3-8: Dosiskurven für das SMA-Lager im Standortgebiet Wellenberg (SMA-WLB), vgl. Nagra (2014a).	231
Fig. 4.3-9: Dosiskurven für das HAA-Lager im Standortgebiet Zürich Nordost (HAA-ZNO), vgl. Nagra (2014a).	232
Fig. 4.3-10: Dosiskurven für das HAA-Lager im Standortgebiet Nördlich Lägern (HAA-NL), vgl. Nagra (2014a).	233
Fig. 4.3-11: Dosiskurven für das HAA-Lager im Standortgebiet Jura Ost (HAA-JO), vgl. Nagra (2014a).	234
Fig. 4.4-1: Regionale Störungszonen, zu meidende tektonische Zonen und tektonisches Regime im Grossraum der Standortgebiete in der Nordschweiz, vgl. Nagra (2014b, Dossier II).	242

Fig. 4.4-2:	Aus wiederholten Präzisionsnivellement-Messungen bestimmte Hebungs- raten in der Schweiz und Umgebung, vgl. Nagra (2014b, Dossier III).....	243
Fig. 4.4-3a:	Historische und instrumentell erfasste Seismizität in der Schweiz und Umgebung, vgl. Nagra (2014b, Dossier III) sowie die dort zu dieser Figur aufgeführten Referenzen.	244
Fig. 4.4-3b:	Profilschnitt gemäss Fig. 4.4-3a (Schwarzwald – Brugg – Wellenberg – Varese) mit projizierten Erdbeben und Hebungsdaten, vgl. Nagra (2014b, Dossier III).	245
Fig. 4.4-3c:	Auftretenswahrscheinlichkeit von Erdbeben mit Magnituden $M_w \geq 6$ in der Schweiz basierend auf Einschätzungen von vier Expertengruppen im Rahmen des PRP-Projekts (swissnuclear 2013), vgl. auch Nagra (2014b, Dossier III).	246
Fig. 4.4-4:	Mögliche Nutzungskonflikte mit Kohlenwasserstoff-Ressourcen im Grossraum der Standortgebiete in der Nordschweiz, vgl. Nagra (2014b, Dossier VII).....	247
Fig. 4.4-5:	Mögliche Nutzungskonflikte mit Salzvorkommen im Mittleren Muschelkalk im Grossraum der Standortgebiete in der Nordschweiz, vgl. dazu auch Nagra (2014b, Dossier VII).	248
Fig. 4.4-6:	Normierte geothermische Produktivität im Grossraum der Standortgebiete in der Nordschweiz (nach Signorelli et al. 2004 und Kohl et al. 2010), vgl. dazu auch Nagra (2014b, Dossier VII).	249
Fig. 4.4-7:	CO ₂ -Speicherpotenzial von salinen sedimentären Aquiferen im Grossraum der Standortgebiete in der Nordschweiz (nach Chevalier et al. 2010 und Diamond et al. 2010), vgl. dazu auch Nagra (2014b, Dossier VII).....	250
Fig. 4.4-8:	Mögliche Nutzungskonflikte in Zusammenhang mit wichtigen Mineral- und Thermalwassernutzungen im Grossraum der Standortgebiete in der Nordschweiz, vgl. dazu Nagra (2014b, Dossier VII).	251
Fig. 4.4-9:	Zusammenfassende Darstellung der Bewertungsergebnisse für die Lager- perimeter in den geologischen Standortgebieten für das SMA-Lager (massgebender Fall für die Einengung).	296
Fig. 4.4-10:	Zusammenfassende Darstellung der Bewertungsergebnisse für die Lager- perimeter in den geologischen Standortgebieten für das HAA-Lager (massgebender Fall für die Einengung).	320
Fig. 5.2-1:	Zusammenfassende Darstellung der Bewertungsergebnisse für die Standort- gebiete bzw. die zugehörigen Lagerperimeter für das SMA-Lager (entscheidrelevante Merkmale und Indikatoren, massgebender Fall für die Einengung).	329
Fig. 5.2-2:	Zusammenfassende Darstellung der Bewertungsergebnisse für die Standortgebiete bzw. die zugehörigen Lagerperimeter für das HAA-Lager (entscheidrelevante Merkmale und Indikatoren, massgebender Fall für die Einengung).	335
Fig. 5.3-1:	Übersicht der Dosiskurven gemäss Vorgaben des ENSI für die geo- logischen Standortgebiete sowie resultierende charakteristische Dosisintervalle, vgl. Nagra (2014a).	352

Fig. 5.3-2:	Zusammenfassende Darstellung der charakteristischen Dosisintervalle gemäss Vorgaben des ENSI für das SMA-, das HAA- und das Kombilager in den verschiedenen geologischen Standortgebieten, vgl. Nagra (2014a).....	354
Fig. 5.3-3:	Lagerperimeter für das Kombilager im Standortgebiet Zürich Nordost	355
Fig. 5.3-4:	Lagerperimeter für das Kombilager im Standortgebiet Jura Ost.	355
Fig. 7.1-1:	Die in Etappe 1 festgelegten geologischen Standortgebiete mit den zugehörigen von der Nagra in Etappe 2 bezeichneten Standortarealen für das SMA- und das HAA-Lager.....	363
Fig. 7.1-2:	Die für die vertieften Untersuchungen für Etappe 3 vorgeschlagenen geologischen Standortgebiete mit den zugehörigen Standortarealen für das SMA- und das HAA-Lager.	365
Fig. 7.3-1:	Zusammenfassende Darstellung der Bewertungsergebnisse für die Standortgebiete bzw. die zugehörigen Lagerperimeter für das SMA-Lager (entscheidrelevante Merkmale und Indikatoren, massgebender Fall für die Einengung).	378
Fig. 7.3-2:	Zusammenfassende Darstellung der Bewertungsergebnisse für die Standortgebiete bzw. die zugehörigen Lagerperimeter für das HAA-Lager (entscheidrelevante Merkmale und Indikatoren, massgebender Fall für die Einengung).	381

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage und Zielsetzung des Berichts

Wichtige Schritte zur Entsorgung der radioaktiven Abfälle der Schweiz sind heute realisiert. Dies betrifft die Behandlung und Verpackung der radioaktiven Abfälle, ihre Charakterisierung und Inventarisierung sowie die Zwischenlagerung und die dazu gehörenden Transporte. Bei der Vorbereitung der geologischen Tiefenlager wurde ein guter technisch-wissenschaftlicher Stand erreicht; der Nachweis der Machbarkeit von langfristig sicheren geologischen Tiefenlagern in der Schweiz für alle hier anfallenden radioaktiven Abfälle wurde erbracht (Entsorgungsnachweise) und vom Bundesrat anerkannt. Mit dem vom Bundesrat am 2. April 2008 genehmigten Konzept "Sachplan geologische Tiefenlager" (BFE 2008) wurde das Standortwahlverfahren für die Tiefenlager festgelegt und dessen Umsetzung unter der Federführung des Bundesamts für Energie (BFE) in Angriff genommen. Gemäss Konzept Sachplan geologische Tiefenlager (SGT) erfolgt die Auswahl von Standorten für geologische Tiefenlager in der Schweiz in drei Etappen. Etappe 1 endete mit der Festlegung von geologisch geeigneten Standortgebieten. Innerhalb dieser Gebiete werden in den Etappen 2 und 3 des Verfahrens die Projekte konkretisiert und die Sicherheit detaillierter beurteilt, was schliesslich zur Festsetzung der Standorte für die Realisierung der benötigten geologischen Tiefenlager und zur Erteilung der Rahmenbewilligungen führen soll.

Im November 2008 hat die Nagra im Auftrag der Entsorgungspflichtigen für Etappe 1 sechs geologische Standortgebiete für das geologische Tiefenlager für die schwach- und mittelaktiven Abfälle (SMA) und drei geologische Standortgebiete für das geologische Tiefenlager für die hochaktiven Abfälle (HAA)¹ vorgeschlagen, die aufgrund der Kriterien zur Sicherheit und technischen Machbarkeit sowie weiterer Vorgaben gemäss SGT erarbeitet wurden. Für die geologischen Standortgebiete, die sowohl für das HAA-Lager wie auch für das SMA-Lager vorgeschlagen wurden, wurde festgehalten, dass dort beide Lagertypen gleichzeitig angeordnet werden könnten unter Nutzung möglicher Synergien (z.B. gemeinsame Oberflächenanlage, evtl. teilweise gemeinsame untertägige Lagerteile (Erschliessung etc.)); für eine solche Anlage wird der Begriff "Kombilager" verwendet. Mit dem Entscheid des Bundesrats vom 30. November 2011 wurden die von der Nagra vorgeschlagenen geologischen Standortgebiete in den Sachplan geologische Tiefenlager aufgenommen.

Gemäss SGT sind in Etappe 2 in den Planungssperimetern der geologischen Standortgebiete in Zusammenarbeit mit den Standortregionen und mit den betroffenen Kantonen Vorschläge für die Platzierung der Oberflächenanlage zu erarbeiten und mögliche Standortareale zu bezeichnen. Weiter ist in Etappe 2 basierend auf einem sicherheitstechnischen Vergleich eine Einengung auf mindestens zwei geologische Standortgebiete pro Lagertyp für die weiteren Untersuchungen für Etappe 3 vorzunehmen.

Im Hinblick auf die Platzierung der Oberflächenanlage und der Bezeichnung möglicher Standortareale wurde die Nagra aufgefordert, zu Beginn der Etappe 2 zuhanden der Gremien der regionalen Partizipation in den Standortregionen diesbezügliche Vorschläge zu unterbreiten. Die Nagra hat ihre Vorschläge als Diskussionsgrundlage für die Zusammenarbeit in einem Bericht

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

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 SMA- und ATA-Abfälle (ATA: Alphatoxische Abfälle), die zusammen mit den BE/HAA ins HAA-Lager eingebracht werden, als LMA bezeichnet.

dargelegt (Nagra 2011). Diese Vorschläge wurden im Laufe der Etappe 2 von den Regionen und Kantonen diskutiert, geprüft und auf deren Wunsch fallweise angepasst sowie mit zusätzlichen Vorschlägen ergänzt. Auf Basis der Stellungnahmen der Partizipationsgremien hat die Nagra für jedes Standortgebiet im Rahmen von sogenannten Planungsstudien (Nagra 2013/2014) mindestens ein Standortareal für die Oberflächenanlage bezeichnet.

Diese Planungsstudien dienen einerseits der Information der direkt betroffenen Regionen. Andererseits dienen sie als Grundlage für sozioökonomisch-ökologische Wirkungsstudien und für die Voruntersuchungen zur Umweltverträglichkeitsprüfung. Mit den vom Bundesamt für Energie (BFE) in Etappe 2 in allen Standortregionen durchgeführten sozioökonomisch-ökologischen Wirkungsstudien (SÖW) sollen mögliche wirtschaftliche, ökologische und gesellschaftliche Auswirkungen eines geologischen Tiefenlagers auf eine Standortregion frühzeitig identifiziert werden. Gestützt auf die Resultate der SÖW und weiterer Studien kann mit geeigneten Massnahmen allfälligen negativen Entwicklungen entgegengewirkt werden, es können mögliche Kompensationsmassnahmen geplant, aber auch Chancen für positive Entwicklungen genutzt werden.

Im SGT wurde festgelegt, dass im Standortwahlverfahren die Langzeitsicherheit des geologischen Tiefenlagers oberste Priorität hat. Dies gilt uneingeschränkt auch für die Erarbeitung der Vorschläge zur Einengung der geologischen Standortgebiete in Etappe 2. Ein Standortgebiet kann deshalb in Etappe 2 nur dann zurückgestellt werden, wenn es eindeutige sicherheitstechnische Nachteile im Vergleich mit den übrigen Standortgebieten aufweist. Der Sicherheit nachgeordnet sind Aspekte der Raumplanung, Ökologie, Wirtschaft und Gesellschaft. Die Resultate der SÖW haben deshalb keinen Einfluss auf die Auswahl der vorzuschlagenden geologischen Standortgebiete in Etappe 2. Die SÖW-Ergebnisse können neben den oben genannten Zwecken jedoch dazu beitragen, innerhalb eines Standortgebiets eine Auswahl zwischen mehreren Standortarealen für die Oberflächenanlage zu treffen. Gestützt auf die Zusammenarbeit mit den Regionen und Kantonen in Etappe 2 trifft dies jedoch nur für die Region Nördlich Lägern zu, in welcher zwei Standortareale bezeichnet wurden. Dort wäre die Wahl eines Standortareals in enger Diskussion mit Region und Kanton zu einem späteren Zeitpunkt zu treffen. In den übrigen Regionen wurde jeweils nur ein Standortareal für die Oberflächenanlage bezeichnet.

Im Hinblick auf die Einengung auf mindestens zwei geologische Standortgebiete pro Lagertyp sind gemäss SGT und Vorgaben des Eidgenössischen Nuklearsicherheitsinspektorats (ENSI) (ENSI 2013a) für jedes Standortgebiet eine provisorische Sicherheitsanalyse sowie ein sicherheitstechnischer Vergleich durchzuführen. Gestützt darauf ist eine vergleichende Gesamtbewertung vorzunehmen, anhand welcher die Nagra mindestens zwei geologische Standortgebiete pro Lagertyp für die weitere Bearbeitung in Etappe 3 vorzuschlagen hat. Gemäss SGT sind dann für Etappe 3 diese vorgeschlagenen Standortgebiete vertieft zu untersuchen und die standortspezifischen geologischen Kenntnisse mittels erdwissenschaftlicher Untersuchungen (Seismik, Bohrungen etc.) auf einen Stand zu bringen, der für die beiden Lagertypen eine gut begründete Standortwahl zulässt. Basierend darauf werden die Rahmenbewilligungsgesuche erarbeitet und bei den Bundesbehörden zur Prüfung eingereicht.

Im Rahmen der Vorbereitung von Etappe 2 war es gemäss SGT Aufgabe der Nagra, ausgehend von den Vorgaben des ENSI zu beurteilen, ob der geologische Kenntnisstand in den verschiedenen geologischen Standortgebieten ausreicht, um belastbare Aussagen für den sicherheitstechnischen Vergleich machen zu können. Zu dieser Beurteilung der Nagra (Nagra 2010) wurde vom ENSI und weiteren Behörden Stellung genommen. In seinem Gutachten hat das ENSI als Ergänzung zur Beurteilung der Nagra 41 Forderungen für zusätzliche Untersuchungen in Etappe 2 formuliert (ENSI 2011). Auch die Eidgenössische Kommission für Nukleare Sicherheit (KNS), die Kommission für Nukleare Entsorgung (KNE) und die Arbeitsgruppe Sicherheit

der Kantone/Kantonale Expertengruppe Sicherheit (AG SiKa/KES) hatten Empfehlungen und Hinweise zu Untersuchungen in Etappe 2 gegeben (KNS 2011, KNE 2011, AG SiKa/KES 2011). In der Folge hat die Nagra diese Hinweise aufgenommen und auch einem Wunsch der KNS und der Kantone entsprochen und im Winter 2011/12 weitere 2D-seismische Messungen durchgeführt. In sogenannten *Zwischenhalt-Fachsitzungen* wurden die zuständigen Behörden und Gremien über die vorhandenen Unterlagen und die Ergebnisse der geforderten Untersuchungen im Hinblick auf die in Etappe 2 anstehenden Entscheide informiert. Als Fazit der Fachsitzungen hat das ENSI Ende August 2014 (ENSI 2014) festgehalten, dass die Nagra die Themen der 41 ENSI-Forderungen aus dem Jahr 2011 vollständig und detailliert behandelt hat. Zusammen mit den weiteren Untersuchungen ist damit der geologische Kenntnisstand ausreichend, um darauf basierend die provisorischen Sicherheitsanalysen und den sicherheitstechnischen Vergleich in Etappe 2 durchzuführen und dann die Unterlagen einzureichen. Die Nagra hat anschliessend die Berichterstattung zu den Vorschlägen der für Etappe 3 weiter zu untersuchenden geologischen Standortgebiete fertig gestellt und anschliessend die Berichte beim BFE eingereicht.

Der vorliegende Bericht hat zum Ziel, die für die weiteren Untersuchungen für Etappe 3 zu betrachtenden geologischen Standortgebiete für das SMA- und das HAA-Lager vorzuschlagen und diesen Vorschlag zu begründen. Dazu werden die Vorgaben und das darauf basierende Vorgehen erläutert, die für die Bewertung und Einengung notwendigen Unterlagen zusammenfassend dargestellt und der schrittweise Prozess der Einengung aufgezeigt. Vorliegender Bericht wird ergänzt durch eine vereinfachte Darlegung in einer zusammenfassenden Broschüre (Nagra 2014i).

Die zu diesen geologischen Standortgebieten gehörenden Standortareale sind in den Planungsstudien der Nagra (Nagra 2013/2014) bereits bezeichnet und dokumentiert worden.

1.2 Aufbau des Berichts

Nach den einführenden Bemerkungen in Kap. 1 werden in Kap. 2 die behördlichen Vorgaben zusammengefasst und das auf den Vorgaben basierende Vorgehen bei der Erarbeitung der Vorschläge erläutert; am Schluss von Kap. 2 findet sich eine zusammenfassende Darstellung des Vorgehens beim sicherheitstechnischen Vergleich. In Kap. 3 werden die in Etappe 1 für die verschiedenen Standortgebiete vorgeschlagenen Wirtgesteine charakterisiert und bewertet. Für das SMA-Lager wird in den Standortgebieten mit mehr als einem Wirtgestein ein sicherheitstechnischer Vergleich zwischen den Wirtgesteinen durchgeführt mit dem Ziel, ein prioritäres Wirtgestein festzulegen, falls ein Wirtgestein im Vergleich zum anderen Wirtgestein eindeutige Nachteile aufweist. Für das HAA-Lager entfällt dieser Schritt, weil bereits in Etappe 1 ein prioritäres Wirtgestein festgelegt wurde – der Opalinuston. In Kap. 4 werden zuerst das Vorgehen zusammenfassend wiederholt und die Grundlagen erläutert (Kap. 4.1). Dann werden die Abgrenzung optimierter Lagerperimeter sowie Varianten zu den Lagerperimetern für die Untersuchung des Einflusses von alternativen Optimierungsansätzen und von Ungewissheiten in der Tiefenlage der Wirtgesteine beschrieben (Kap. 4.2). Anschliessend wird die Beurteilung der optimierten Lagerperimeter bezüglich sicherheitstechnischer Eignung und Gleichwertigkeit anhand von Dosisberechnungen aufgezeigt (Kap. 4.3). Kap. 4.4 enthält die gesamtheitliche qualitative Bewertung der optimierten Lagerperimeter. In Kap. 5 werden die verschiedenen Standortgebiete bzw. die zugehörigen Lagerperimeter bezüglich eindeutiger Nachteile analysiert. Die Resultate werden für den sicherheitstechnischen Vergleich und die daraus abgeleiteten Vorschläge zur Einengung verwendet. In Kap. 6 sind die Hinweise für die Untersuchung der vorgeschlagenen Standortgebiete für Etappe 3 zusammengestellt. Kap. 7 schliesslich enthält die Schlussfolgerungen mit der Begründung des Einengungsvorschlags. In den Anhängen (separater Berichtsband) finden sich für verschiedene Themen detailliertere Unterlagen; dies betrifft die

Identifikation der entscheiderelevanten Indikatoren (Anhang A), Karten für die Lagerperimeter (massgebender Fall für den sicherheitstechnischen Vergleich und alternative Varianten) und deren Schlüsseigenschaften (Anhang B), tabellarische Zusammenstellungen zu den Bewertungen der Wirtgesteine und Lagerperimeter (Anhang C) und eine Beschreibung der verwendeten "multi-criteria decision analysis" (MCDA)-Verfahren (Anhang D).

Im Bericht wird darauf geachtet, dass die Einengungsschritte innerhalb eines jeden Kapitels transparent dargestellt und nachvollziehbar sind. Dies resultiert in Wiederholungen sowie in zahlreichen Anmerkungen und Verweisen (häufig in Form von Fussnoten).

2 Vorgaben, Vorgehen und wichtige Grundlagen

2.1 Vorgaben aus dem Konzept Sachplan geologische Tiefenlager und aus zugehörigen Berichten

2.1.1 Überblick und Begriffsdefinitionen

Gemäss SGT (BFE 2008) erfolgt die Auswahl von geologischen Standortgebieten und zugehörigen Standortarealen für die geologischen Tiefenlager in der Schweiz in drei Etappen:

- Etappe 1: Auswahl von geologischen Standortgebieten je für ein geologisches Tiefenlager für SMA und für HAA²
- Etappe 2: Auswahl von mindestens zwei Standorten³ je für ein geologisches Tiefenlager für SMA und für HAA²
- Etappe 3: Standortwahl und Rahmenbewilligungsverfahren für je ein geologisches Tiefenlager für SMA und für HAA²

In Etappe 1 hat die Nagra basierend auf den Kriterien zur Sicherheit und technischen Machbarkeit gemäss SGT sechs geologische Standortgebiete für das SMA-Lager und drei geologische Standortgebiete für das HAA-Lager vorgeschlagen (Nagra 2008b). In seiner Entscheidung vom 30. November 2011 hat der Bundesrat den Ergebnisbericht zur Etappe 1 (BFE 2011) gutgeheissen und entschieden, die sechs (SMA) bzw. drei (HAA) von der Nagra vorgeschlagenen geologischen Standortgebiete in die Objektblätter aufzunehmen. In seiner Entscheidung hat der Bundesrat gleichzeitig die in BFE (2011) vorgeschlagenen Planungssperimeter bezeichnet, innerhalb derer die Standortareale für die Oberflächenanlage und die allfälligen Areale für die Schachtkopfanlagen der Tiefenlager platziert werden sollen.

Als Vorbereitung für Etappe 2 wurde ferner die Notwendigkeit von ergänzenden Untersuchungen für Etappe 2 von der Nagra abgeklärt (Nagra 2010) und vom ENSI beurteilt (ENSI 2011). Dazu hat die Nagra einen Bericht erstellt (Nagra 2010), in welchem die Resultate von Testrechnungen zu den charakteristischen Dosisintervallen dokumentiert sind und wo auch das Vorgehen zur qualitativen Bewertung evaluiert wurde. Dazu wurden die für die Sicherheit und technische Machbarkeit relevanten Prozesse und Parameter abgeleitet und der diesbezügliche Kenntnisstand beurteilt. In ihrer Stellungnahme zu diesem Bericht der Nagra hat das ENSI der Ableitung der Prozesse und Parameter zugestimmt und zum Vorgehen bei der Ableitung der charakteristischen Dosisintervalle keine Vorbehalte angemeldet. Dementsprechend berücksichtigt die Nagra für die jetzt durchzuführende Einengung das in Nagra (2010) verwendete Vorgehen.

² Erfüllt ein geologisches Standortgebiet sowohl die Anforderungen für das SMA-Lager als auch für das HAA-Lager (einschliesslich eines ausreichenden Platzangebots für beide Lager), so kann das Auswahlverfahren auch zu einem gemeinsamen geologischen Standortgebiet für das SMA- und das HAA-Lager führen, wo in einem sog. Kombilager alle radioaktiven Abfälle entsorgt werden (BFE 2008).

³ Gemäss Vorgabe des ENSI sind die provisorischen Sicherheitsanalysen und der sicherheitstechnische Vergleich in Etappe 2 auf der Stufe der geologischen Standortgebiete – unter Berücksichtigung der zugehörigen Standortareale für die Oberflächenanlagen und der für die Analysen verwendeten untertägigen Lagerperimeter – durchzuführen (vgl. ENSI 2013a).

In Etappe 2 sollen sowohl für das SMA-Lager als auch das HAA-Lager je mindestens zwei geologische Standortgebiete zur vertieften Untersuchung für Etappe 3 ausgewählt und dazugehörig jeweils mindestens ein Standortareal für die Oberflächenanlage bezeichnet werden. Die detaillierten Vorgaben zum Vorgehen in Etappe 2 bei der Einengung auf mindestens je zwei Standortgebiete pro Lagertyp werden im folgenden Kapitel erläutert.

2.1.2 Vorgaben zum Vorgehen in Etappe 2

In Etappe 2 werden die geologischen Standortgebiete anhand der Vorgaben im Konzeptteil SGT (BFE 2008) und verschiedenen präzisierenden Vorgaben des ENSI (ENSI 2010a, ENSI 2013a, ENSI 2013c) für die weiteren Untersuchungen für Etappe 3 ausgewählt. Die übergeordneten Vorgaben bei der Auswahl von mindestens je zwei geologischen Standortgebieten für das SMA- und HAA-Lager sind in Tab. 2.1-1 und Fig. 2.1-1 zusammengefasst. Gemäss ENSI-Vorgaben kann ein geologisches Standortgebiet in Etappe 2 nur dann zurückgestellt werden, wenn mindestens eine der folgenden vier Fragen mit einem Ja beantwortet wird (vgl. Figur 1 in ENSI 2013a, s. Fig. 2.1-1):

- Frage 1: Erfüllt das Standortgebiet das Dosis-Schutzkriterium nicht?
- Frage 2: Ist das Standortgebiet aufgrund der Ergebnisse der Dosisberechnungen eindeutig weniger geeignet?
- Frage 3: Ist die Gesamtbewertung des Standortgebiets schlechter als "geeignet"?
- Frage 4: Können beim Standortgebiet anhand der Kriterien zur Sicherheit und technischen Machbarkeit belastbare eindeutige Nachteile gegenüber anderen Standortgebieten festgestellt werden?

Im Folgenden werden diese Fragen einzeln erläutert.

Gemäss Frage 1 ist zunächst anhand von Dosisberechnungen zu überprüfen, ob die in Etappe 1 ausgewählten geologischen Standortgebiete sicherheitstechnisch geeignet sind. Die Beantwortung dieser ersten Frage erfolgt anhand des Vergleichs der für vorgegebene Rechenfälle ermittelten Dosen mit dem Schutzkriterium von 0.1 mSv/a gemäss Richtlinie ENSI-G03 (ENSI 2009).

Gemäss Frage 2 ist zu überprüfen, ob die ausgewählten geologischen Standortgebiete sicherheitstechnisch gleichwertig sind. Die Beantwortung dieser Frage erfolgt anhand von charakteristischen Dosisintervallen (vgl. Fig. 2.1-2). Dort wird geprüft, ob der obere Rand des Dosisintervalls über der Schwelle zur Optimierung gemäss Strahlenschutzverordnung (StSV 1994) von 0.01 mSv/a liegt und das Dosisintervall nicht mit dem niedrigsten Dosisintervall überlappt (vgl. Fig. 2.1-3 sowie detaillierte Erläuterung in Kap. 2.1.3). Diejenigen geologischen Standortgebiete, welche basierend auf der Beurteilung der Dosisberechnungen eine ungenügende Sicherheit oder aber keine vergleichbare Sicherheit aufweisen, werden ausgeschlossen bzw. zurückgestellt.

Gemäss Frage 3 sind die verbleibenden geologischen Standortgebiete bezüglich der Kriterien gemäss Tabelle 1 des Konzepts SGT (vgl. Tab. 2.1-2) qualitativ zu bewerten. Basierend auf dieser qualitativen Bewertung werden diejenigen geologischen Standortgebiete zurückgestellt, welche bei der Gesamtbewertung unter Berücksichtigung aller Kriterien nicht mindestens die Bewertung "geeignet" erreichen (vgl. auch Kap. 2.1.3).

Gemäss Frage 4 wird ein geologisches Standortgebiet auch dann zurückgestellt, wenn es gegenüber den anderen Standortgebieten *eindeutige Nachteile* aufweist. Dazu kommen die vom ENSI (ENSI 2013a) festgelegten entscheiderelevanten Merkmale zur Anwendung.

Gemäss den Vorgaben des ENSI (ENSI 2013a) müssen die bei der Auswahl von geologischen Standortgebieten verwendeten Unterlagen belastbar sein, d.h. die entscheidenden Aussagen bezüglich der Einengung müssen auch unter Berücksichtigung der bestehenden Variabilität und Ungewissheiten gültig sein. Dies bedeutet auch, dass kein Standortgebiet aufgrund eines ungenügenden Kenntnisstands zurückgestellt werden darf.

Schliesslich sollen die Ergebnisse der provisorischen Sicherheitsanalysen auch Hinweise auf den Umfang der notwendigen weiteren Untersuchungen für Etappe 3 liefern, um eine begründete Standortwahl zu treffen und um eine ausreichende Datengrundlage für die Rahmenbewilligungsgesuche zu erreichen.

Im folgenden Kapitel werden die Vorgaben zum Vorgehen bei der Einengung von geologischen Standortgebieten in Etappe 2 vertieft.

Tab. 2.1-1: Übergeordnete Vorgaben bei der Auswahl von geologischen Standortgebieten in Etappe 2.

Zitat aus ENSI (2013a).

Gemäss Konzeptteil SGT sind in Etappe 2 SGT für die in Etappe 1 SGT festgelegten Standortgebiete die charakteristischen Dosisintervalle abzuleiten, eine Bewertung anhand aller 13 Kriterien zu Sicherheit und technischer Machbarkeit vorzunehmen und allfällig vorhandene sicherheitstechnische Nachteile aufzuzeigen. Die Annahmen für die Berechnungen der charakteristischen Dosisintervalle, die Bewertungen und die Bezeichnung eindeutiger Nachteile müssen belastbar sein, das heisst, Aussagen zur Sicherheit und technischen Machbarkeit müssen auch unter Berücksichtigung der bestehenden Variabilität und Ungewissheiten gültig sein.

Standortgebiete können in Etappe 2 SGT ausgeschlossen werden, falls sie eindeutige Nachteile gegenüber anderen Standortgebieten aufweisen. In der sicherheitstechnischen Methodik für die Auswahl von mindestens zwei Standortgebieten je für HAA und SMA in Etappe 2 SGT hat die Nagra deshalb aufzuzeigen, wie die eindeutigen Nachteile erfasst, beurteilt und im Entscheid für den Vorschlag von mindestens zwei Standortgebieten pro Lagertyp (...) berücksichtigt werden.

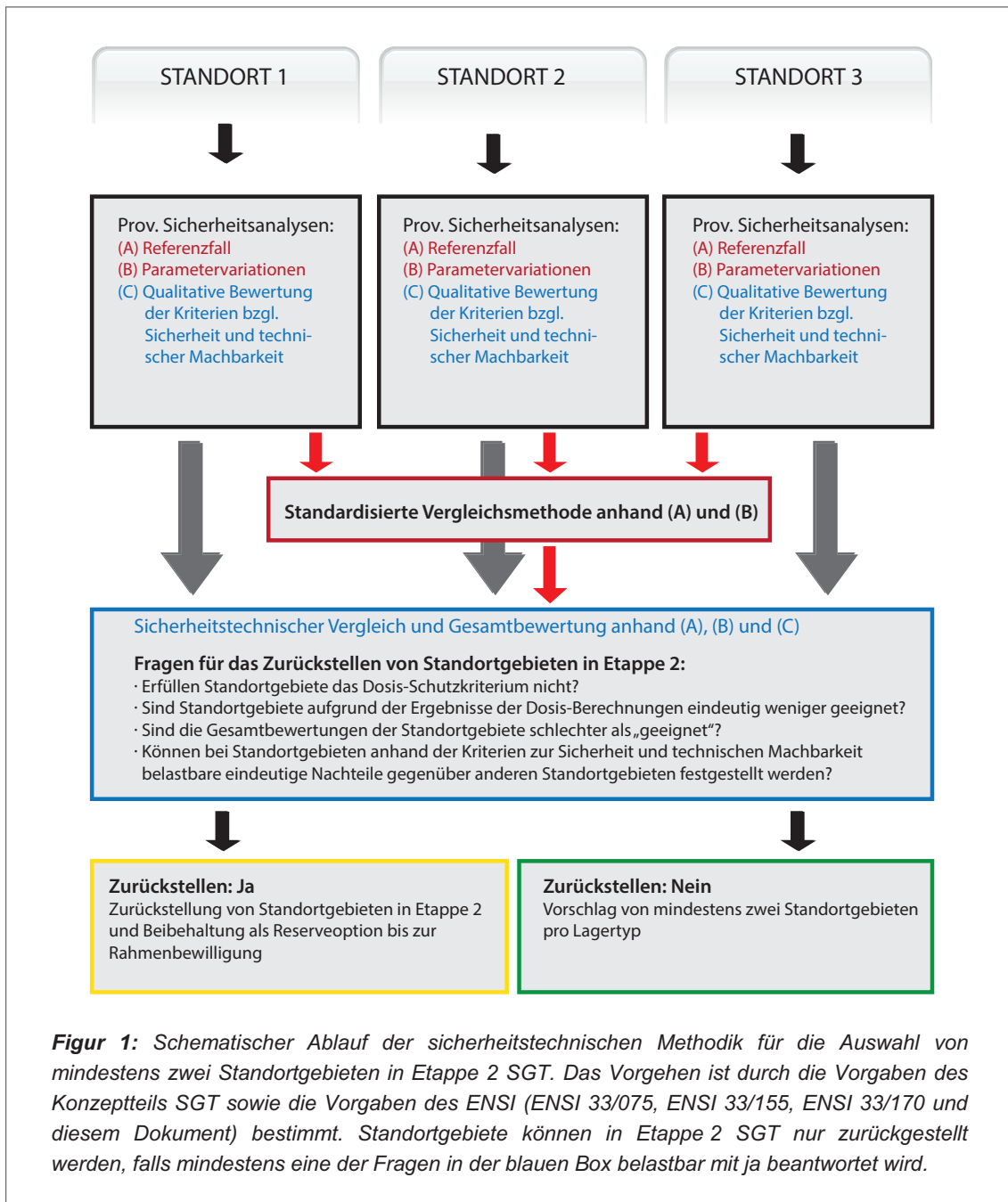


Fig. 2.1-1: Vorgaben des ENSI bezüglich der zu verwendenden sicherheitstechnischen Methodik für die Auswahl von geologischen Standortgebieten in Etappe 2.

Kopie der Figur 1, inkl. des zugehörigen Figurentexts aus ENSI (2013a).

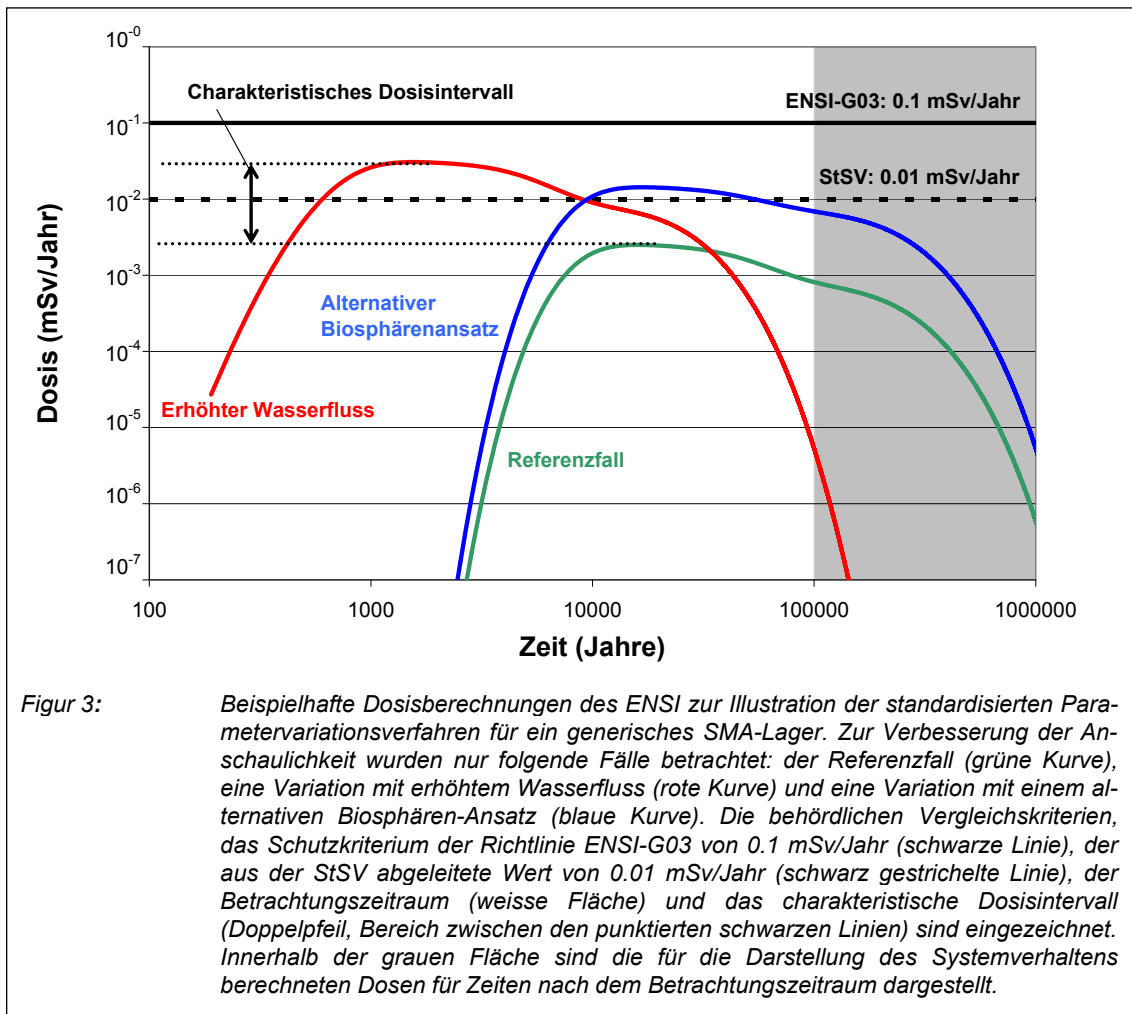


Fig. 2.1-2: Vorgaben des ENSI bezüglich der Bestimmung des charakteristischen Dosisintervalls mit Hilfe des standardisierten Parametervariationsverfahrens.

Kopie der Figur 3, inkl. des zugehörigen Figurentexts aus ENSI (2010a).

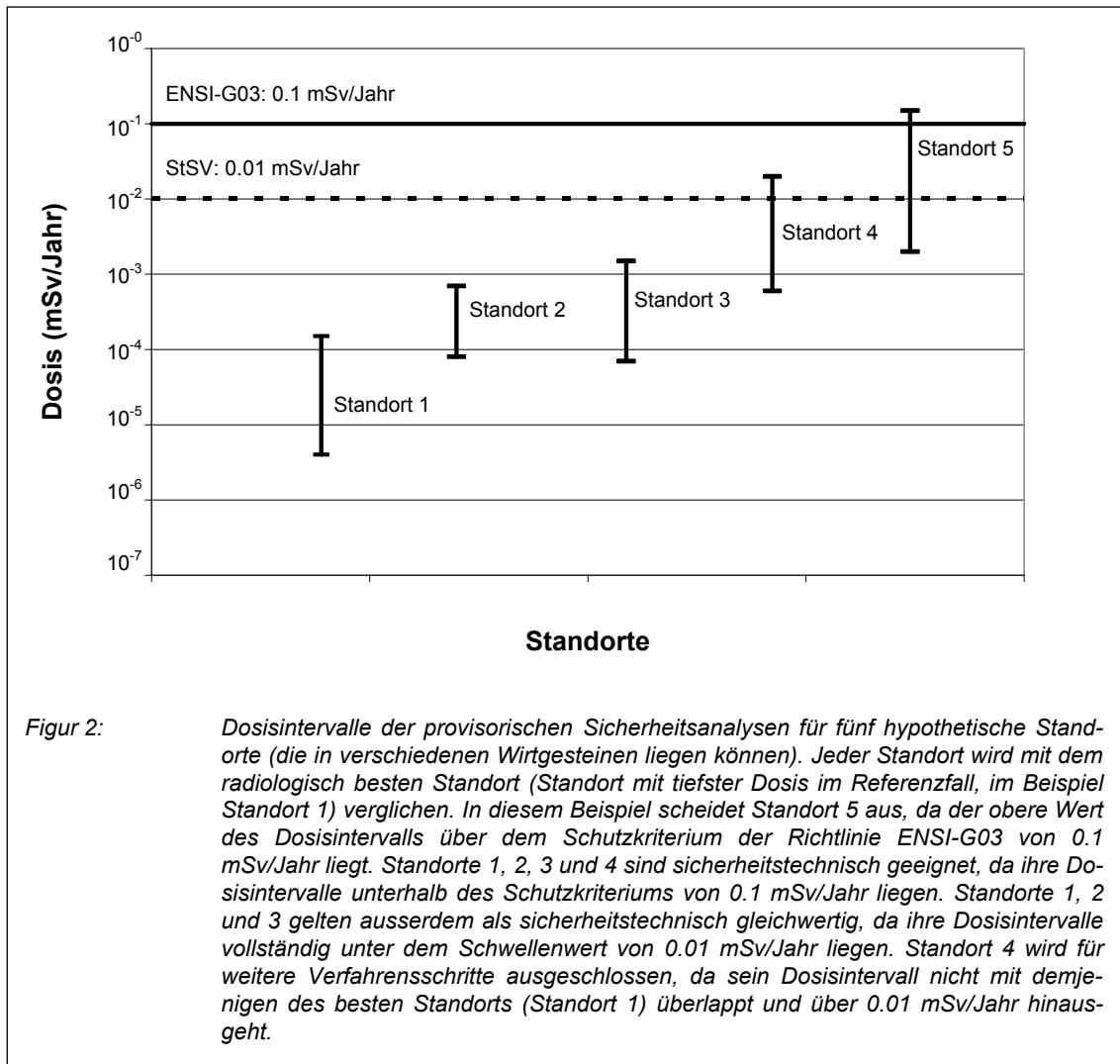


Fig. 2.1-3: Vorgaben des ENSI bezüglich der Beurteilung der charakteristischen Dosisintervalle.

Kopie der Figur 2, inkl. des zugehörigen Figurentexts aus ENSI (2010a).

Tab. 2.1-2: Kriteriengruppen und Kriterien zur Sicherheit und technischen Machbarkeit für die Standortevaluation gemäss SGT.

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

2.1.3 Präzisierungen zum Vorgehen in Etappe 2

Gemäss BFE (2008), ENSI (2010a) und ENSI (2013a) hat der sicherheitstechnische Vergleich der geologischen Standortgebiete in Etappe 2 anhand eines standardisierten Vorgehens zu erfolgen; dieses enthält einen quantitativen und einen qualitativen Teil (vgl. Tab. 2.1-3 und Fig. 2.1-1).

Der quantitative Teil erfolgt anhand von Dosisberechnungen für die realistischerweise zu erwartende Entwicklung des Tiefenlagers (Referenzszenarium mit zugehörigem Referenzfall; Punkt A in Tab. 2.1-3 und Fig. 2.1-1) sowie anhand von Parametervariationen, welche die radiologischen Auswirkungen der bestehenden Variabilität und Ungewissheiten der in den Modellrechnungen verwendeten Prozesse und Parameter quantifizieren (Diskussion der Robustheit, Punkt B in Tab. 2.1-3 und Fig. 2.1-1). Die gemäss ENSI mindestens durchzuführenden Rechenfälle des standardisierten Parametervariationsverfahrens sind in Tab. 2.1-4 aufgeführt. Damit lässt sich für jedes geologische Standortgebiet ein charakteristisches Dosisintervall bestimmen (vgl. Fig. 2.1-2), welches die Auswirkungen der bestehenden Variabilität und Ungewissheiten auf die Dosis quantifiziert. Für die Dosisberechnungen sind die Variabilität und Ungewissheiten in den Prozessen und Parametern durch Eckwerte von Parameterbandbreiten zu erfassen. Geologische Standortgebiete, deren oberer Rand des Dosisintervalls über dem Schutzkriterium von 0.1 mSv/a liegt, werden ausgeschlossen. Ferner werden geologische Standortgebiete zurückgestellt, deren oberer Rand des Dosisintervalls über der Schwelle zur Optimierung gemäss Strahlenschutzverordnung (0.01 mSv/a) liegt und deren Dosisintervall nicht mit dem niedrigsten Dosisintervall überlappt (vgl. Fig. 2.1-3 sowie detailliertes Vorgehen gemäss ENSI 2010a).

Für die verbleibenden geologischen Standortgebiete wird anschliessend eine qualitative Bewertung (Punkt C in Tab. 2.1-3 und Fig. 2.1-1) der in SGT Tabelle 1 definierten Kriterien zur Sicherheit und technischen Machbarkeit durchgeführt. Die Bewertung umfasst neben den

Eigenschaften des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs und der Langzeitstabilität auch die Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen und die bautechnische Eignung. Zur Beurteilung der bautechnischen Eignung fordert das ENSI (2013c) Berichte zur bautechnischen Risikoanalyse und zu den ergänzenden Sicherheitsbetrachtungen (vgl. Nagra 2014c und Nagra 2014d).

Das Gesamtergebnis der qualitativen Bewertung unter Berücksichtigung aller Kriterien soll anhand der Skala "sehr geeignet", "geeignet", "bedingt geeignet" und "weniger geeignet" dargestellt werden. Als Standortgebiete kommen nur solche in Frage, welche mindestens die Bewertung "geeignet" erreicht haben.

Zusätzlich kann ein geologisches Standortgebiet auch dann zurückgestellt werden, falls es eindeutige, belastbare Nachteile gegenüber den anderen geologischen Standortgebieten aufweist (vgl. Fig. 2.1-1). Dazu hält das ENSI (2013a) präzisierend fest, dass die Nagra diejenigen Indikatoren, welche von besonderer Bedeutung für die Langzeitsicherheit und die technische Machbarkeit sind, transparent und nachvollziehbar auszuweisen und die eindeutigen Nachteile anhand von entscheidungsrelevanten Merkmalen zu beurteilen und zu begründen hat (vgl. Tab. 2.1-5).

Für den sicherheitstechnischen Vergleich hat die Nagra schliesslich eine vergleichende Gesamtbewertung der geologischen Standortgebiete bezüglich der in den Punkten A, B und C erarbeiteten Befunde vorzulegen. Dies umfasst die quantitativen Ergebnisse der Dosisberechnungen (charakteristische Dosisintervalle), die qualitative Bewertung der Kriterien zur Sicherheit und technischen Machbarkeit und allenfalls identifizierte eindeutige Nachteile der geologischen Standortgebiete. Dabei sind die Ergebnisse der Dosisberechnungen, welche insbesondere Aussagen zum Rückhaltevermögen des Gesamtsystems, zum Beitrag der geologischen Barriere zur Langzeitsicherheit und zum Langzeitverhalten der technischen Barrieren erlauben, auch bei der qualitativen Bewertung zu berücksichtigen.

Tab. 2.1-3: Vorgaben des ENSI bezüglich des sicherheitstechnischen Vergleichs von geologischen Standortgebieten in Etappe 2.

Zitat aus Kapitel 5 in ENSI (2010a).

Der SGT fordert für den sicherheitstechnischen Vergleich von potenziellen Standort[gebiet]en ein standardisiertes Vorgehen, das die quantitativen Ergebnisse der einzelnen provisorischen Sicherheitsanalysen berücksichtigt, aber auch den qualitativen Aspekten der Betrachtungen zu Sicherheit und technischer Machbarkeit Rechnung trägt (...).

Der Vergleich enthält folgende Elemente (...):

- A) Darlegung der quantitativen Ergebnisse der Freisetzungsberechnungen für die realistischere zu erwartende Entwicklung des Tiefenlagers (Referenzszenarium, zeitlicher Verlauf der Personendosiskurve)(...).*
- B) Diskussion der Robustheit des Tiefenlagersystems, Angaben zum Variationsbereich und Aufzeigen der Ungewissheiten in den bei der Modellierung verwendeten Parametern und deren Einfluss auf die Personendosiskurve unter Berücksichtigung der Vorgaben zu den durchzuführenden Rechenfällen.*
- C) Qualitative Bewertung der Kriterien gemäss Tabelle 1 (z.B. Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen, mögliche Beeinträchtigung des Tiefenlagerstandorts durch Erosion) (...).*

Tab. 2.1-4: Vorgaben des ENSI bezüglich des standardisierten Parametervariationsverfahrens für den Vergleich von geologischen Standortgebieten in Etappe 2.

Zitat aus Kapitel 5.1 in ENSI (2010a).

Für das standardisierte Parametervariationsverfahren sollen (...) ausgehend vom Referenzfall mindestens folgende Fälle berechnet werden (...):

- a) Berechnungen mit einem gegenüber dem Referenzfall erhöhten Wasserfluss durch den Tiefenlagerbereich (oberer Eckwert).*
- b) Berechnungen mit gegenüber dem Referenzfall ungünstigen nuklidspezifischen Diffusionskoeffizienten (obere Eckwerte für homogen-poröse Wirtgesteine, untere Eckwerte für geklüftete Wirtgesteine) in der Geosphäre.*
- c) Berechnungen mit gegenüber dem Referenzfall erhöhten nuklidspezifischen Löslichkeitslimiten (obere Eckwerte) im Nahfeld.*
- d) Berechnungen mit gegenüber dem Referenzfall verringerten Sorptionskoeffizienten (untere Eckwerte für K_d) im Nah- und Fernfeld. Falls der K_d -Referenzwert eines Nuklids weniger als $0.001 \text{ m}^3/\text{kg}$ beträgt, ist in den Berechnungen ein K_d -Wert von $0 \text{ m}^3/\text{kg}$ zu verwenden.*
- e) Ausgehend vom Referenzfall ist der Einfluss von möglichen alternativen Klimavarianten (...) im Betrachtungszeitraum für das SMA- resp. HAA-Lager aufzuzeigen.*

Wegen der gegenüber dem SMA-Lager erhöhten Radiotoxizität ist für das HAA-Lager zusätzlich die Robustheit gegenüber alternativen Annahmen zum Verhalten der technischen Barrieren zu untersuchen (...):

- f) Berechnungen mit einer gegenüber dem Referenzfall hundertfach erhöhten Auflösungsrate der einzulagernden abgebrannten Brennelemente (Brennstoffmatrix und Brennelementhüllen).*
- g) Berechnungen mit Annahme einer auf 1000 Jahre begrenzten Behälterlebensdauer (...).*

Tab. 2.1-5: Vorgaben des ENSI bezüglich entscheidrelevanter Merkmale in Etappe 2.

Zitat aus Kapitel 2.1 in ENSI (2013a).

Die Nagra hat beim sicherheitstechnischen Vergleich in Etappe 2 die eindeutigen Nachteile bezüglich Sicherheit und technischer Machbarkeit anhand mindestens folgender entscheidrelevanter Merkmale zu beurteilen und zu begründen:

a) die Wirksamkeit der geologischen Barriere

- *Günstig sind Verhältnisse, bei welchen das Wirtgestein bzw. der einschlusswirksame Gebirgsbereich derart beschaffen und ausgedehnt ist, dass die Radionuklide grösstenteils im Wirtgestein bzw. im einschlusswirksamen Gebirgsbereich zurückgehalten werden.*
- *Eine geringe hydraulische Durchlässigkeit führt zu einer geringen Wasserführung. Eine solche ist zunächst für das Verhalten und den Schutz der technischen Barrieren im Tiefenlager günstig. In einer späteren Phase stellt sie auch sicher, dass der Radionuklidtransport im Wirtgestein bzw. im einschlusswirksamen Gebirgsbereich nur sehr langsam erfolgen kann (Barrierewirkung).*
- *Günstig sind Transportpfade, die zu einer erheblichen Verzögerung der Radionuklidfreisetzung aus dem Wirtgestein bzw. dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich führen. Günstig ist dabei eine homogene Verteilung der Fliesswege im Gestein, im Gegensatz zu einer Konzentration des Flusses auf wenige Klüfte, Adern oder andere Inhomogenitäten.*
- *Günstig sind Gesteine, die ein Selbstabdichtungsvermögen von Rissen und Klüften bzw. Störungszonen aufweisen.*
- *Als günstig werden die Homogenität des Wirtgesteins und die Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (oder das Vorhandensein wirksamer Rahmengesteine im Liegenden und Hangenden) bewertet.*

b) die Langzeitstabilität der geologischen Barriere

- *Günstig sind Gebiete und Gesteine, die über den für die Sicherheitsbewertung zu betrachtenden Zeitraum die erforderliche Barrierenwirkung gewährleisten können.*
- *Günstig sind Gesteine mit einer geringen Neigung zur Bildung neuer Wasserwegsamkeiten und die bei Deformation eine Selbstabdichtung von Rissen/Klüften/Störungen aufweisen.*
- *Günstig sind geologische Situationen, bei denen differenzielle Bewegungen innerhalb des Tiefenlagers unwahrscheinlich sind.*

c) die Explorier- und Charakterisierbarkeit der geologischen Barriere im Standortgebiet

- *Günstig ist, wenn die Wirtgesteins-eigenschaften möglichst homogen sind und ohne übermässig destruktive Untersuchungen ermittelt werden können (keine wesentliche Beeinträchtigung der Barrierenwirkung des Wirtgesteins durch schichtverletzende Untersuchungen).*
- *Günstig ist, wenn die Lagerungsverhältnisse und die Geometrie des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs einfach und von der Erdoberfläche aus gut explorierbar sind (z.B. mit Reflexionsseismik).*
- *Günstig ist, wenn die Beobachtungen bzw. Untersuchungen der sicherheitsrelevanten Eigenschaften räumlich inter- und extrapolierbar sind.*
- *Günstig ist, wenn die sicherheitsrelevanten Eigenschaften und die Geometrie des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs über die erforderlichen Zeiträume genügend zuverlässig prognostizierbar sind.*
- *Als günstig beurteilt wird, falls möglichen Problemzonen (komplexe tektonische Überprägung) und Problemgesteinen (heterogenen Abfolgen mit kalkigen Lagen) ausgewichen werden kann.*

d) Bautechnische Machbarkeit eines Tiefenlagers unter Berücksichtigung der vorgeschlagenen Standortareale

- *Günstig sind bautechnisch einfach beherrschbare Verhältnisse, bei denen sich durch die Tiefenlage keine extremen Anforderungen bei der Erstellung, beim Betrieb, bei der Überwachung (inkl. einer eventuellen Rückholung) oder beim Verschluss des Lagers ergeben. Günstig ist, wenn der Verschluss der Lagerteile ohne technische Probleme mit der erforderlichen Abdichtung realisiert werden kann.*
- *Günstig ist, wenn keine wesentlichen hydrogeologischen und geotechnischen Probleme oberhalb der Lagerebene zu erwarten sind.*

2.1.4 Anforderungen des ENSI an die Dokumentation in Etappe 2

Die Vorgaben des ENSI bezüglich der in Etappe 2 erforderlichen Dokumentation zum sicherheitstechnischen Vergleich in Etappe 2 (ENSI 2010a) sind in Tab. 2.1-6 zusammengefasst.

Für jedes geologische Standortgebiet und jeden Lagertyp sind Dosisberechnungen durchzuführen und zu dokumentieren. In diesem Teil der Dokumentation ist aufzuzeigen, welche Kenntnisse über die in den Modellierungen verwendeten Prozesse und Parameter vorliegen und welche Ungewissheiten bestehen. Dabei sind die realistischerweise anzunehmenden Verhältnisse für jedes geologische Standortgebiet und jeden Lagertyp in einem Referenzfall abzubilden, während die Ungewissheiten bezüglich der in den Modellrechnungen berücksichtigten Prozesse und Parameter in spezifischen Parametervariationen (standardisierte Vergleichsmethode) einfließen sollen. Neben den quantitativen Dosisberechnungen sind auch die Resultate der qualitativen Bewertung für die Kriterien zur Sicherheit und technischen Machbarkeit darzulegen.

In einem übergeordneten sicherheitstechnischen Bericht zur Etappe 2 (vorliegender Bericht⁴) sind die für jedes geologische Standortgebiet und jeden Lagertyp erzielten Ergebnisse zusammenfassend darzulegen und gesamthaft zu bewerten. Bei dieser vergleichenden Gesamtbewertung soll den geologischen Barrieren ein besonderes Augenmerk gelten: Einerseits ist ihr Beitrag zur Langzeitsicherheit anhand der Sicherheitsfunktionen zu diskutieren, und andererseits sind die Eigenschaften wichtiger geologischer Merkmale (Wasserfluss, Gastransport, Radionuklidtransport, mechanische und thermische Stabilität, Selbstabdichtungsvermögen, chemisches Milieu) beim qualitativen Vergleich der geologischen Standortgebiete zu berücksichtigen⁵.

Der sicherheitstechnische Bericht bildet die Grundlage für die Vorschläge der geologischen Standortgebiete durch die Entsorgungspflichtigen⁶.

⁴ Detailliertere Angaben finden sich in den entsprechenden Referenzberichten, insbesondere in Nagra (2014 a, b).

⁵ Im vorliegenden Bericht werden die Eigenschaften wichtiger geologischer Merkmale über die entsprechenden Indikatoren erfasst.

⁶ Die Sicherheit hat Vorrang gegenüber den Aspekten der Raumplanung, Umweltverträglichkeit und Sozioökonomie.

Tab. 2.1-6: Vorgaben des ENSI bezüglich der Dokumentation der provisorischen Sicherheitsanalysen und des sicherheitstechnischen Vergleichs in Etappe 2.

Zitat aus Kapitel 6 in ENSI (2010a).

Provisorische Sicherheitsanalysen

In den provisorischen Sicherheitsanalysen enthalten ist jeweils ein Referenzszenarium mit Diskussion der dazugehörigen Prozesse, Parameter und deren Ungewissheiten. Als Teil der provisorischen Sicherheitsanalysen sind der Referenzfall sowie die standardisierten Parametervariationen dokumentiert, die für die standardisierte Vergleichsmethode verwendet werden, sowie die Resultate der qualitativen Bewertung der Kriterien gemäss Tabelle 1 SGT.

Sicherheitstechnischer Bericht in Etappe 2

Im sicherheitstechnischen Bericht der Etappe 2 werden die Ergebnisse der einzelnen provisorischen Sicherheitsanalysen, der standardisierten Vergleichsmethode und der qualitativen Bewertung der Kriterien (Tabelle 1) für alle Standort[gebiet]e zusammengefasst und gesamthaft bewertet.(...)

2.1.5 Weitere Vorgaben und Hinweise

Weitere Vorgaben des ENSI für Etappe 2 betreffen die Durchführung von bautechnischen Risikoanalysen und von ergänzenden Sicherheitsbetrachtungen für die Zugangsbauwerke (ENSI 2013c, vgl. Tab. 2.1-7). Die dazu erforderlichen geologischen Baugrundmodelle und Konzepte für die Erschliessung der untertägigen Anlagen (Zugangsbauwerke) sind standortspezifisch auszuarbeiten, sollen aber für Etappe 2 stufengerecht sein (d.h. auf Stufe Vorstudie im Rahmen der Projektentwicklung). Insbesondere muss im Rahmen der Etappe 2 noch nicht über die definitive Auslegung der Zugangsbauwerke und definitive Linienführung der Zugangsbauwerke entschieden werden. Diese Entscheide bleiben späteren Phasen der Lagerrealisierung vorbehalten.

Die bautechnischen Risikoanalysen sind pro Standortgebiet bzw. pro Lagerperimeter und deren jeweilige Zugangsbauwerke durchzuführen. Dabei sollen nach heutiger Planung mögliche Linienführungen der Zugangsbauwerke, welche die vorgeschlagenen Standortareale mit den untertägigen Lagerperimetern verbinden, betrachtet werden. Als zentrales Element der bautechnischen Risikoanalysen sind Gefährdungsbilder und Gefährdungsszenarien zu erarbeiten und zu beschreiben. Die geforderten bautechnischen Risikoanalysen sind qualitativer Art, d.h. sie beruhen auf Abschätzungen der Eintretenswahrscheinlichkeit einer denkbaren Gefährdung (z.B. Einstufung gering/mittel/hoch) und deren Schadensausmass. Für die Risikoabschätzung ist auch die Wirkung von möglichen bzw. bereits geplanten Massnahmen zu beschreiben. Schliesslich sollen die Ergebnisse der bautechnischen Risikoanalysen in die Bewertung und den sicherheitstechnischen Vergleich der verschiedenen Standortgebiete einfließen.

In Ergänzung zu den bautechnischen Risikoanalysen, deren Fokus auf geologisch bedingten, standortspezifischen Risiken liegt, hat die Nagra im Rahmen von ergänzenden Sicherheitsbetrachtungen auch stufengerecht den sicheren Normalbetrieb der Zugangsbauwerke und die Beherrschbarkeit von Störfällen aufzuzeigen. Dies hat mittels einer strukturierten Vorgehensweise (z.B. mittels logischer Netze) zu erfolgen. Dabei sind standortspezifische sicherheitsrelevante Risiken für die Zugangsbauwerke auszuweisen. Mögliche Varianten der Zugangsbauwerke (Rampe, Schacht oder Kombinationen) sind zu untersuchen und es ist darzulegen, ob diese Bauwerke unter Berücksichtigung der getroffenen Massnahmen trotz der bestehenden

Ungewissheiten sicher gebaut, betrieben und verschlossen werden können. Die Beurteilung der Bedeutung der Eigenschaften und Qualität der Versiegelungsbauwerke beim Verschluss der geologischen Tiefenlager ist Gegenstand von Poller et al. (2014).

Die bautechnische Risikoanalysen und die ergänzenden Sicherheitsbetrachtungen sind in Nagra (2014c und d) dokumentiert.

Tab. 2.1-7: Übergeordnete Vorgaben an die bautechnische Risikoanalysen und an die ergänzenden Sicherheitsbetrachtungen für die Zugangsbauwerke in Etappe 2.

Zitat aus ENSI (2013c).

Hinsichtlich des Projektstandes der geologischen Tiefenlager befinden sich die Arbeiten für Etappe 2 des Sachplans geologische Tiefenlager (SGT) auf der Stufe einer Vorstudie im Rahmen der Projektentwicklung. Der für Etappe 2 SGT notwendige Detaillierungsgrad erfordert standortspezifische geologische Baugrundmodelle und standortspezifische Konzepte der Zugangsbauwerke.

Das ENSI fordert qualitative bautechnische Risikoanalysen pro Standortgebiet, resp. pro untertägigen Lagerperimeter und deren jeweilige Zugangsbauwerke unter Einbezug der Variabilität der Gebirgseigenschaften und unter Berücksichtigung der zugehörigen Standortareale für die Oberflächenanlagen. Dabei müssen neben den Gefährdungsbildern auch die geplanten oder berücksichtigten Massnahmen beschrieben werden. Die Ergebnisse der bautechnischen Risikoanalysen fliessen in die Bewertung und den sicherheitstechnischen Vergleich der verschiedenen Standort[gebiet]e ein.

Die Nagra hat zudem stufengerecht anhand einer systematischen, generischen Darlegung den sicheren Normalbetrieb der Zugangsbauwerke und die Beherrschbarkeit der Auswirkungen von Störfällen während des Betriebs inkl. Beobachtungsphase eines geologischen Tiefenlagers aufzuzeigen.

2.2 Rahmenbedingungen und Festlegungen

2.2.1 Ausgangslage

Die in Etappe 1 festgelegten geologischen Standortgebiete mit ihren Wirt- und Rahmengesteinen (Tab. 2.2-1) bilden den Ausgangspunkt für den sicherheitstechnischen Vergleich und die weitere Einengung der geologischen Standortgebiete in Etappe 2.

Die Beurteilung der geologischen Standortgebiete in Etappe 2 erfolgt entsprechend den Vorgaben des Sachplans (BFE 2008) und des ENSI (2010a bzw. 2013a) grundsätzlich gleich wie in Etappe 1. Aufgrund der unterschiedlichen Ausgangslage und Rahmenbedingungen für Etappe 2 werden aber die folgenden wichtigen Anpassungen vorgenommen (für eine detaillierte Erläuterung der Anpassungen siehe Kap. 2.3):

- **Ergänzungen bzw. Anpassung der Elemente der Beurteilung:** Gemäss SGT (BFE 2008) und Vorgabe des ENSI (ENSI 2010a) erfolgt die Beurteilung der geologischen Standortgebiete mit ihren Wirt- und Rahmengesteinen neu auch anhand von Dosisberechnungen (charakteristische Dosisintervalle und Vergleich mit Dosis-Schutzkriterium von 0.1 mSv/a gemäss Richtlinie ENSI-G03 und Schwellenwert zur Optimierung von 0.01 mSv/a gemäss Strahlenschutzverordnung). Danach erfolgt wie in Etappe 1 eine qualitative Bewertung der

geologischen Standortgebiete mit ihren Wirt- und Rahmengesteinen, wobei diese neu eine Gesamtbewertung von mindestens "geeignet" aufweisen müssen (vgl. BFE 2008 bzw. ENSI 2013a). Schliesslich können in Etappe 2 geologische Standortgebiete neu auch dann zurückgestellt werden, falls sie gegenüber den anderen Standortgebieten eindeutige Nachteile aufweisen (vgl. BFE 2008 bzw. ENSI 2013a).

- Sicherheitstechnische Optimierung:** Ausgangspunkt für den sicherheitstechnischen Vergleich und die Einengung bilden die in Etappe 1 bezeichneten Wirtgesteine, welche unterschiedliche Eigenschaften aufweisen, und die geologischen Standortgebiete, deren Platzangebot grösser ist als erforderlich und wo innerhalb des Standortgebiets teilweise deutlich unterschiedliche Eigenschaften bestehen. Um die Vorschläge gemäss Etappe 1 möglichst gut zu nutzen, erfolgt eine dreistufige Optimierung. Zunächst wird in den Standortgebieten mit zwei Wirtgesteinen geprüft, ob eines als *prioritäres Wirtgestein* einzustufen ist, d.h. ob es eine optimale Barrierenwirkung gewährleistet und ob das andere Wirtgestein eindeutige Nachteile aufweist. Danach wird eine optimale räumliche Konfiguration des prioritären Wirtgesteins innerhalb eines jeden geologischen Standortgebiets ausgewählt (im vorliegenden Bericht als *optimierte untertägige Lagerperimeter* bezeichnet). Diese Lagerperimeter sind eine Arbeitsunterlage und werden am Ende der Etappe 2 nicht in die Objektblätter aufgenommen (BFE 2013)⁷. Schliesslich wird der optimierte untertägige Lagerperimeter für jedes geologische Standortgebiet anhand der entscheiderelevanten Merkmalen und zugehörigen Indikatoren bewertet. Auf dieser Basis werden diejenigen Standortgebiete identifiziert, welche entweder die Bewertung "geeignet" nicht erreicht haben oder aber im Vergleich mit den anderen Standortgebieten eindeutige Nachteile aufweisen und deshalb nicht für die weiteren Untersuchungen für Etappe 3 vorgeschlagen werden. Ausgehend von der Vorgabe, dass mindestens je zwei Standortgebiete pro Lagertyp für Etappe 3 vorgeschlagen werden sollen, wird sich der Vergleich zur Identifikation der eindeutigen Nachteile an den geeignetsten Standortgebieten orientieren⁸; wenn ein Standortgebiet gegenüber diesen geeignetsten Standortgebieten bezüglich der entscheiderelevanten Merkmale und Indikatoren deutlich abfällt und die zugehörigen Nachteile eindeutig sind, wird es nicht weiter verfolgt.
- Umgang mit Variabilität und Ungewissheiten:** Gemäss den Vorgaben des ENSI (ENSI 2010a) müssen die bei der Auswahl von geologischen Standortgebieten in Etappe 2 verwendeten Unterlagen belastbar sein, d.h. die entscheidenden Aussagen für die Einengung müssen auch unter Berücksichtigung der bestehenden Variabilität und Ungewissheiten gültig sein. Relevante räumliche Variabilität werden wie bisher durch GIS-Karten erfasst und fliessen einerseits in die Abgrenzung und Optimierung der Lagerperimeter ein und werden andererseits bei der Prüfung der sicherheitstechnischen Eignung und Gleichwertigkeit der geologischen Standortgebiete und bei deren qualitativen Bewertung berücksichtigt. Die relevanten Ungewissheiten werden neu auf zwei Ebenen erfasst: Zur Berücksichtigung von konzeptuellen Ungewissheiten wird ein Spektrum von alternativen Konzeptualisierungen betrachtet. Bei der Beurteilung dieser Konzeptualisierungen⁹ beim sicherheitstechnischen Vergleich der geologischen Standortgebiete werden die Möglichkeiten zur Abklärung bzw. zur Reduktion dieser Ungewissheiten im Zuge der Untersuchungen für Etappe 3

⁷ Für eine weitere Einengung innerhalb der geologischen Standortgebiete sind zuerst die Untersuchungen für Etappe 3 durchzuführen; die abschliessende Wahl eines Lagerbereichs innerhalb der Standortgebiete ist deshalb erst Gegenstand der Rahmenbewilligungsgesuche. Die detaillierte Anordnung und Auslegung der Lagerkammern erfolgt erst nach der untertägigen Erkundung im Hinblick auf das nukleare Baugesuch.

⁸ Weil die in Etappe 1 gewählten Standortgebiete eine gute Qualität haben, werden beim Vergleich der Optionen bei Bedarf strenge Massstäbe angesetzt; dies bedeutet z.B., dass bei einem wichtigen Indikator auch eine "günstige Bewertung" gegenüber einer "sehr günstigen Bewertung" zu einem Nachteil führen kann.

⁹ Bei der Festlegung der Fälle für die Dosisberechnungen in Nagra (2014a) wird anstelle des Begriffs "Konzeptualisierung" auch der Begriff "Situation" verwendet.

(insbesondere Charakterisierbarkeit der Gesteinseigenschaften, Explorierbarkeit der räumlichen Situation und Prognostizierbarkeit der zukünftigen geologischen Entwicklung) berücksichtigt. Dabei wird unterschieden zwischen Ungewissheiten, die mit genügender Zuverlässigkeit im erforderlichen Umfang reduziert werden können und solchen, wo eine solche Reduktion wegen inhärenter Ungewissheiten nicht möglich ist. Zur Berücksichtigung von Parameter-Ungewissheiten werden bei der Einengung für die verschiedenen Konzeptualisierungen wo notwendig die vorhandenen Bandbreiten der Parameterwerte berücksichtigt. Die Betrachtung verschiedener Konzeptualisierungen und Parameterwerte dient zur Untersuchung der Robustheit der Einengungsentscheide bezüglich der vorhandenen Ungewissheiten. Falls sich die Ungewissheiten durch zukünftige Untersuchungen nicht zuverlässig im erforderlichen Mass reduzieren lassen, werden diese in einer vorsichtigen sicherheitsgerichteten Art in die Entscheidung einfließen.

- **Spezifische Anpassungen der Indikatoren und Bewertungsskalen:** Grundsätzlich basiert die Beurteilung in Etappe 2 auf den gleichen Indikatoren und Bewertungsskalen wie in Etappe 1. Aufgrund der Fokussierung auf die geologischen Standortgebiete mit ihren Wirt- und Rahmengesteinen sind einige der Indikatoren nicht mehr relevant und werden deshalb in Etappe 2 nicht mehr verwendet. Dabei handelt es sich insbesondere um diejenigen Indikatoren, welche in Etappe 1 nur bei der Beurteilung der Grossräume angewendet wurden (bzw. für Standortgebiete irrelevant sind), und um solche, welche in Etappe 2 durch andere Indikatoren besser erfasst werden. Ferner werden einige Indikatoren und ihre Bewertungsskalen präzisiert, um den gegenüber Etappe 1 jetzt erhöhten Detaillierungsgrad zu berücksichtigen.

Die Bewertungsskalen mit ihren Bewertungsstufen *sehr günstig*, *günstig*, *bedingt günstig*, *ungünstig* sind identisch mit denjenigen in Etappe 1. Mit dem Ziel, die Abstufung der Bewertung im oberen Bereich der Bewertungsskala zu verbessern, reicht die Werteskala neu von 0 bis 5 (statt von 0 bis 4 wie in Etappe 1). Von 0 bis 3 bleibt die Werteskala unverändert.

- **Berücksichtigung der Standortareale für die Oberflächenanlage:** In Etappe 1 stand für die in Zusammenhang mit dem Zugang nach Untertag zu erfolgende Beurteilung des Indikators 'Geotechnische und hydrogeologische Verhältnisse in überlagernden Gesteinsformationen' noch kein Standortareal zur Verfügung, sodass die Beurteilung generell erfolgte. Für die jetzt von der Nagra aufgrund der Zusammenarbeit bezeichneten Standortareale und die in diesem Bericht abgegrenzten Lagerperimeter wurden bautechnische Risikoanalysen durchgeführt (Nagra 2014c), die auf modellhaft festgelegten Zugangskorridoren beruhen. Die Resultate der bautechnischen Risikoanalysen fliessen in die Bewertung des Indikators 'Geotechnische und hydrogeologische Verhältnisse in überlagernden Gesteinsformationen' ein.

Beim Zugang nach Untertag ist weiter zu berücksichtigen, dass aus Sicht der Sicherheit während der Betriebsphase (inkl. Überwachungsphase und Verschluss) Schacht und Rampe gleichwertige Optionen darstellen (vgl. Nagra 2014d). Dies ergibt für alle Standortgebiete mit Ausnahme von Jura Ost und Wellenberg¹⁰ die Flexibilität, für den Zugang nach Untertag von den Standortarealen aus sowohl Schacht als auch Rampe verwenden zu können.

¹⁰ In diesen Standortgebieten wird für den Zugang nach Untertag von den Standortarealen aus eine Rampe verwendet, für welche dort sehr günstige Bedingungen bestehen.

Tab. 2.2-1: Geologische Standortgebiete mit ihren Wirtgesteinen und Rahmengesteinen gemäss Etappe 1 (BFE 2011).

Das Wirtgestein und seine Rahmengesteine werden zusammen als einschlusswirksamer Gebirgsbereich bezeichnet.

- 1) Gegenüber Nagra (2008b) wurden die Bezeichnungen einiger geologischer Standortgebiete auf Antrag der Kantone/Regionen geändert: Südranden (statt Südliches Schaffhausen), Zürich Nordost (statt Zürcher Weinland) und Jura Ost (statt Bözberg).
- 2) Das SMA-Lager kann auf mehreren Lagerebenen erstellt werden (vgl. auch Nagra 2008b).
- 3) Für die spätere Realisierung bleibt die Einlagerung eines Teils der SMA-Abfälle im 'Braunen Dogger' oder in den Effinger Schichten grundsätzlich vorbehalten.
- 4) Zusätzlich existieren weitere geringdurchlässige Formationen bis Top Muschelkalk. Anstelle des in Etappe 1 verwendeten Begriffs "Oberer Lias" wird jetzt der Begriff "Toniger Lias" verwendet.

Lager-typ	Geologisches Standortgebiet ¹⁾	Wirtgestein	Obere Rahmengesteine	Untere Rahmengesteine
HAA	Zürich Nordost	Opalinuston	Effinger Schichten, 'Brauner Dogger'	Oberer Lias ⁴⁾
	Nördlich Lägern	Opalinuston	Effinger Schichten, 'Brauner Dogger'	Oberer Lias ⁴⁾
	Jura Ost	Opalinuston	Basis Hauptrogenstein-Formation bis Top Opalinuston	Oberer Lias ⁴⁾
SMA	Südranden	Opalinuston	Effinger Schichten, 'Brauner Dogger'	Oberer Lias ⁴⁾
	Zürich Nordost ^{2), 3)}	'Brauner Dogger'	Effinger Schichten	Opalinuston, Oberer Lias ⁴⁾
		Opalinuston	Effinger Schichten, 'Brauner Dogger'	Oberer Lias ⁴⁾
	Nördlich Lägern ^{2), 3)}	'Brauner Dogger'	Effinger Schichten	Opalinuston, Oberer Lias ⁴⁾
		Opalinuston	Effinger Schichten, 'Brauner Dogger'	Oberer Lias ⁴⁾
	Jura Ost	Opalinuston	Basis Hauptrogenstein-Formation bis Top Opalinuston	Oberer Lias ⁴⁾
	Jura-Südfuss ^{2), 3)}	Effinger Schichten	-	-
		Opalinuston	Top Opalinuston bis Basis Hauptrogenstein-Formation	Oberer Lias ⁴⁾
Wellenberg ²⁾	Mergel-Formationen des Helvetikums	-	-	
Kombi-lager	Zürich Nordost	'Brauner Dogger' (SMA) ^{2), 3)}	Effinger Schichten	Opalinuston, Oberer Lias ⁴⁾
		Opalinuston (SMA ^{2), 3)} / HAA)	Effinger Schichten, 'Brauner Dogger'	Oberer Lias ⁴⁾
	Nördlich Lägern	'Brauner Dogger' (SMA) ^{2), 3)}	Effinger Schichten	Opalinuston, Oberer Lias ⁴⁾
		Opalinuston (SMA ^{2), 3)} / HAA)	Effinger Schichten, 'Brauner Dogger'	Oberer Lias ⁴⁾
	Jura Ost	Opalinuston (SMA/HAA)	Basis Hauptrogenstein-Formation bis Top Opalinuston	Oberer Lias ⁴⁾

2.2.2 Wichtige Grundlagen und Konzepte

Wichtige Grundlagen und Konzepte für die Durchführung der provisorischen Sicherheitsanalysen und des sicherheitstechnischen Vergleichs in Etappe 2 betreffen das Abfallinventar und die Abfallzuteilung auf die beiden Lagertypen sowie den zugehörigen Betrachtungszeitraum, die Lager-, Barrieren- und Sicherheitskonzepte und die geologischen Standortgebiete. Diese Grundlagen und Konzepte basieren weitgehend auf den Festlegungen der Etappe 1 (vgl. Nagra 2008b) und werden im Folgenden erläutert; wo es Änderungen gegenüber den in Etappe 1 gemachten Festlegungen gibt, werden diese aufgezeigt und begründet.

- Für die Dosisberechnungen in Etappe 2 wird ein aktualisiertes Inventar der radioaktiven Abfälle und Materialien MIRAM 14 (Nagra 2014e) verwendet. Das MIRAM 14 unterstellt einen 60-jährigen Betrieb der bestehenden KKW, mit Ausnahme des KKM (Betrieb bis 2019), und eine wegen angepasster Zeitpläne verlängerte Sammelperiode für die Abfälle aus Medizin, Industrie und Forschung neu bis 2065¹¹. Im Hinblick auf mögliche Änderungen in den Freigrenzen¹² wird für die möglicherweise zusätzlich anfallenden SMA-Abfälle eine Reserve berücksichtigt. Bei der Beurteilung des Platzangebots für die geologischen Tiefenlager wird in Übereinstimmung mit der vom Bundesrat genehmigten Etappe 1 weiterhin vom "Umhüllenden Inventar" (200'000 m³ SMA, 7'500 m³ LMA und 20'000 m³ BE/HAA; vgl. Nagra 2008b) ausgegangen, wie es in Etappe 1 für die Festlegung der Standortgebiete verwendet wurde (vgl. BFE 2011a, b).
- Es wird das in Etappe 1 beschriebene und auch im Entsorgungsprogramm dokumentierte Entsorgungskonzept mit einem HAA-Lager und einem SMA-Lager verwendet (Nagra 2008b, Nagra 2008a). Dieses Konzept erlaubt es, neben den ATA¹³ auch die dosisdominierenden SMA-Abfallsorten im LMA-Teil des HAA-Lagers zu entsorgen. Die in Etappe 1 definierte Abfallzuteilung zu den Lagern SMA und HAA (Referenzzuteilung) wird grundsätzlich beibehalten, wobei jedoch die neuen Informationen gemäss MIRAM 14 berücksichtigt werden¹⁴. Das SMA- und das HAA-Lager können in zwei verschiedenen Standortgebieten, bei einer entsprechenden geologischen Situation aber auch im gleichen Standortgebiet (mit den Lagerkammern für beide Lager räumlich getrennt entweder im gleichen oder aber in unterschiedlichen Wirtgesteinen) erstellt werden, mit teilweiser gemeinsamer Nutzung der Oberflächeninfrastruktur und evtl. der untertägigen Erschliessung ('Kombilager').
- Die Lagerkonzepte sowie die Barrieren- und Sicherheitskonzepte für das SMA- und das HAA-Lager entsprechen den Konzepten, wie sie in der Dokumentation zu der vom Bundesrat genehmigten Etappe 1 definiert wurden (Nagra 2008b). Die geologischen Tiefenlager umfassen die Oberflächeninfrastruktur, die Zugangsbauwerke und die auf Lagerebene erstellten Pilot- und Hauptlager mit den Lagerkammern sowie die Testbereiche. Die Barrieren- und Sicherheitskonzepte für das SMA- und das HAA-Lager werden in Nagra (2014a) erläutert.

Neben diesem Referenzkonzept wurden auch die sich durch alternative Lager- und Barrierenkonzepte für das SMA- und HAA-Lager ergebenden Möglichkeiten bezüglich maximaler Tiefenlage und Platzbedarf im Hinblick auf die Einengung der Standortgebiete

¹¹ Früher bis 2050 (vgl. dazu Nagra 2008a, e).

¹² Freigrenzen definieren, welche radioaktiven Stoffe als radioaktive Abfälle zu entsorgen sind (vgl. StSV 1994). Derzeit ist eine Revision der Verordnung im Gange, die eine Anpassung der Freigrenzen vorsieht.

¹³ ATA: alphatoxische Abfälle gemäss KEV (2004), Art. 51.

¹⁴ Es bleibt vorbehalten, in Etappe 3 oder später eine andere Abfallzuteilung zu verwenden, falls dies sicherheitstechnisch sinnvoll ist.

geprüft¹⁵. Für das HAA-Lager wurden folgende Klassen von alternativen Lagerkonzepten (mit jeweils unterschiedlichen Varianten bezüglich Endlagerbehälter, Verfüllung, Sicherung / Ausbau und Lagerarchitektur) betrachtet: (i) Einlagerung in horizontalen Lagerstollen im Opalinuston (Referenz-Lagerkonzept gemäss Etappe 1, Nagra 2008b); (ii) horizontaler Betriebstunnel im Opalinuston mit Einlagerung in verrohrten kurzen oder langen horizontalen Bohrlöchern (Durchmesser ca. 1 m); (iii) horizontaler Betriebstunnel im Opalinuston mit Einlagerung in kurzen verrohrten vertikalen Bohrlöchern (Durchmesser ca. 1 – 1.75 m); (iv) horizontaler Betriebstunnel in überlagernder Formation mit Einlagerung in verrohrten vertikalen oder geneigten Bohrlöchern im Opalinuston. Für das SMA-Lager wurden Lagerkonzeptvarianten bezüglich Anzahl und Grösse der Lagerkavernen, Abfallbehandlung und alternativer Gastransportbarrieren untersucht. Für das HAA-Lager würde insbesondere Lagerkonzept (iv) die Möglichkeit bieten, Opalinuston in grösseren Tiefen zu nutzen. Anhand von grundsätzlichen Auslegungsanforderungen bezüglich betrieblicher Aspekte (inkl. Rückholung) und bezüglich Beeinträchtigung der Barrierenwirkung für die Langzeitsicherheit können die alternativen Lagerkonzepte beurteilt werden. Dabei werden für das HAA-Lager das alternative Lagerkonzept (ii) mit langen Bohrlöchern sowie das alternative Lagerkonzept (iv) aus betrieblichen Gründen (schwierige Zugänglichkeit für Interventionen bei Betriebsstörungen, schwierige Randbedingungen für die Rückholung von Endlagerbehältern) als kritisch beurteilt. Auch aus Sicht der Langzeitsicherheit (Verletzung der geologischen Barriere durch zahlreiche Perforationen, deren zuverlässige Verfüllung und Versiegelung aus heutiger Sicht nicht uneingeschränkt gewährleistet werden kann) wird das Konzept (iv) als unvorteilhaft beurteilt. Weiter werden Konzepte mit Bohrlöchern bzw. Lagerstollen mit genügend grossem Durchmesser mit einer genügenden Mächtigkeit der Bentonitverfüllung bevorzugt. Dies führt zur Schlussfolgerung, dass es aus heutiger Sicht bezüglich Standortwahl von Vorteil ist, keine Standorte zu wählen, welche die Verwendung des heutigen Lager- und Barrierenkonzepts verunmöglichen würden. Eine erneute Überprüfung dieser Konzepte in zukünftigen Phasen soll damit aber nicht ausgeschlossen werden.

- In Übereinstimmung mit der bisherigen Praxis (Nagra 1994, 2002a, Nagra 2008b, d) ist weiterhin vorgesehen, diejenigen Abfallsorten, die Stoffe enthalten, welche die Mobilität der Radionuklide im Zementnahfeld erhöhen könnten, entsprechend dem Gehalt an solchen Stoffen in zwei Abfallgruppen einzuteilen und diese somit getrennt einzulagern. Dabei werden der Gruppe 1 solche Abfälle zugeteilt, die im Hinblick auf eine mögliche Beeinträchtigung der geochemischen Rückhalte-mechanismen nur geringe Konzentrationen an Störstoffen enthalten, der Gruppe 2 alle übrigen Abfälle. Dabei werden die neuen Informationen gemäss MIRAM 14 (Nagra 2014e) bei der Zuteilung der Abfälle zu den Abfallgruppen berücksichtigt.
- Für die optimale Nutzung des geologischen Untergrunds (Berücksichtigung von Lage und Häufigkeit von gebietsbegrenzenden und anordnungsbestimmenden geologischen Elementen) wird ein Lagerkonzept verwendet, welches die Verwendung verschiedener räumlich getrennter Lagerfelder erlaubt und – wo es sinnvoll und möglich ist – innerhalb der Lagerfelder Lagerkammern von unterschiedlicher Länge zulässt. Dies erlaubt es, neben den regionalen, die geologischen Standortgebiete begrenzenden Elementen (vgl. Nagra 2008b) auch die weiteren, eher kleinräumigen geologischen Elemente bei der Anordnung der Lagerkammern zu berücksichtigen. Solchen Elementen (die sog. *anordnungsbestimmenden geologischen Elemente*, vgl. Fig. 2.2-1) wird bei der Anordnung der Lagerkammern ausgewichen, unter Einhaltung eines adäquaten Sicherheitsabstands; diesbezüglich orientieren sich die hier gemachten Überlegungen an den Angaben in Nagra (2008d). Zusätzlich wird für den BE/HAA-Teil des HAA-Lagers eine weitere Kategorie von geologischen Elementen (die

¹⁵ Die Prüfung alternativer Lagerkonzepte entspricht auch einem Hinweis der KNS bzw. der Kantone (KNS 2010, z.B. AG SiKa/KES 2012).

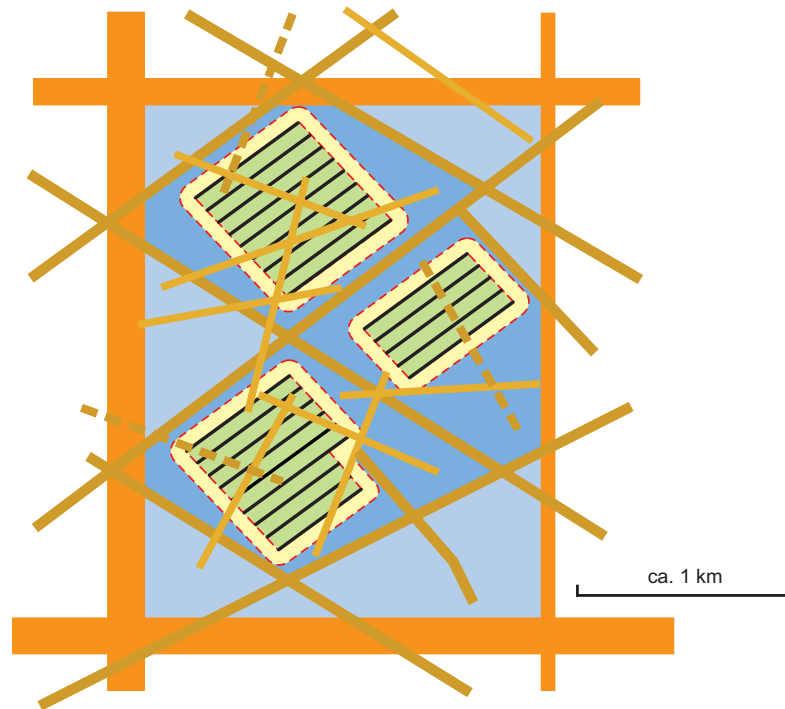
sog. *einlagerungsbestimmenden geologischen Elemente*, vgl. Fig. 2.2-1) berücksichtigt, denen zwar bei der Anordnung der Lagerstollen nicht ausgewichen wird, wo aber an den entsprechenden Stellen keine Einlagerung der BE/HAA-Endlagerbehälter in den Lagerstollen erfolgt. Dazu sind genügende Platzreserven vorzusehen, welche zusätzlich auch die Auswirkungen von geotechnischen Erschwernissen (keine Nutzung ausgewählter Lagerkammern bzw. Teile davon für die Einlagerung wegen grösseren unregelmässigen Ausbrüchen als Folge der Tiefenlage und der lokalen tektonischen Überprägung) zu berücksichtigen haben.

- Der Betrachtungszeitraum definiert den Zeitraum, innerhalb dessen die Einhaltung der Schutzkriterien anhand von Dosisberechnungen aufzuzeigen ist (ENSI 2010a) und legt damit fest, wie lange die Barrieren der geologischen Tiefenlager ihre Funktion zu erfüllen haben. Nach Ablauf des Betrachtungszeitraums sind gemäss ENSI-G03 (ENSI 2009) die möglichen regionalen radiologischen Auswirkungen zu ermitteln, welche nicht wesentlich höher sein dürfen als die natürliche radiologische Belastung. Der Betrachtungszeitraum wurde im Rahmen der sicherheitstechnischen Arbeiten für Etappe 1 abgeleitet und entspricht den Vorgaben in ENSI-G03 (ENSI 2009). Er beträgt – unter Berücksichtigung der Radiotoxizität des zugeteilten Abfallinventars und ihrer zeitlichen Entwicklung (radioaktiver Zerfall) – 100'000 Jahre für das SMA-Lager und eine Million Jahre für das HAA-Lager. Das ENSI hat die für Etappe 1 von den Entsorgungspflichtigen vorgeschlagenen Betrachtungszeiträume als nachvollziehbar beurteilt (ENSI 2010b); diese werden deshalb weiterhin verwendet¹⁶.

Bei der Bestimmung der charakteristischen Dosisintervalle für das Kombilager wird in vorliegendem Bericht für den BE/HAA/LMA-Teil und den SMA-Teil von einem Betrachtungszeitraum von einer Million Jahren ausgegangen. Obschon für den SMA-Teil die Dosisberechnungen nur bis 100'000 Jahre durchgeführt werden müssen, werden die Dosisberechnungen auch für den SMA-Teil bis zu einer Million Jahre weitergeführt, um mit den Dosiskurven zu Vergleichszwecken den gleichen Zeitraum wie für BE/HAA/LMA abzudecken. Für den SMA-Teil werden dabei die gleichen Parameterwerte wie am Ende des Betrachtungszeitraums für SMA (100'000 Jahre) verwendet. Dies ist in Übereinstimmung mit dem Vorgehen der Nagra bei der Überprüfung des Kenntnisstands (Nagra 2010), welchem das ENSI (ENSI 2011) zugestimmt hat.

- Die maximale Tiefenlage der Lagerebene ist von Bedeutung für die Beurteilung der geotechnischen Bedingungen für die Lagerkammern und die weiteren Bauten auf Lagerebene sowie für die Beurteilung der Möglichkeit der Beeinträchtigung des Barrierensystems in und direkt um die Lagerkammern. Dazu sind die folgenden übergeordneten Anforderungen zu beachten (vgl. Nagra 2014f): (i) die Gewährleistung des sicheren und zuverlässigen Baus, Betriebs und Verschlusses der Untertageanlagen (inkl. der Lagerkammern), (ii) der begrenzte Einsatz von Baumaterialien, welche bei übermässigem Einsatz zu einer Schädigung der technischen Barrieren (vor allem des Bentonits als Verfüll- und Versiegelungsmaterial) und nachgeordnet des umgebenden Wirtgesteins führen könnten, (iii) die Vermeidung einer unzulässigen Schädigung des Wirtgesteins im Nahbereich der BE/HAA-Lagerstollen bzw. der Versiegelungsstrecken zur Verhinderung einer unzulässigen Wasserwegsamkeit parallel zu den BE/HAA-Lagerstollen bzw. parallel zu den Versiegelungsstrecken, (iv) die Begrenzung der Störung des Wirtgesteins um die Lagerkammern auf einen beschränkten Teil der vertikalen Migrationsdistanz, sowie (v) geeignete Bedingungen für den zuverlässigen Einbau des Verfüll- und Versiegelungsmaterials im Hinblick auf seine Barrierenwirkung (kurz- und mittelfristig wirksamer Quelldruck).

¹⁶ Dies ist gerechtfertigt, weil die Radiotoxizitäten des in Etappe 2 verwendeten Abfallinventars für das HAA-Lager und für das SMA-Lagers vergleichbar sind mit denjenigen für Etappe 1 (vgl. dazu Anhang A3 in Nagra 2014a).



Signatur	Beschreibung	Bedeutung
	gebietsbegrenzende geologische Elemente	gebietsbegrenzend
	anordnungsbestimmende geologische Elemente	bestimmt Anordnung der Lagerkammern
	einlagerungsbestimmende geologische Elemente	bestimmt Einlagerung innerhalb Lagerkammern
	kleinere geologische Elemente	in Sicherheitsanalyse berücksichtigt
	Lagerkammern	-
	Lagerkammerbereich	-
	Lagerfeld	-
	nutzbare Lagerzone	-
	nicht nutzbare Lagerzone	-

Fig. 2.2-1: Klassifizierung von geologischen Elementen im Wirtgestein bzw. einschlusswirksamen Gebirgsbereich im Hinblick auf die Anordnung der Lagerkammern und auf die Einlagerung von Endlagerbehältern.

Es wird einerseits unterschieden zwischen gebietsbegrenzenden geologischen Elementen (insbesondere regionale Störungszonen und zu meidende tektonische Zonen) und anordnungsbestimmenden geologischen Elementen (bestimmen Anordnung der Lagerkammern). Weiter können geologische Elemente (Störungen) vorhanden sein, denen wegen ihrer Häufigkeit und/oder Explorierbarkeit mit den Lagerkammern nicht ausgewichen werden kann. Diese Elemente werden entweder bei der Einlagerung von BE/HAA-Endlagerbehältern gemieden (einlagerungsbestimmende geologische Elemente) oder sie werden toleriert und können dann direkt die Barrierenwirkung des Wirtgesteins beeinflussen (sie sind deshalb sicherheitsbestimmend).

Die einzelnen Aspekte werden nachfolgend kurz diskutiert.

Der Bau und Betrieb der Untertageanlagen kann bei Wahl eines geeigneten Bauvorgangs und bei Verwendung eines auf die geotechnischen Bedingungen ausgerichteten Ausbaus grundsätzlich zuverlässig bis in grössere Tiefen gewährleistet werden, falls bezüglich Störung des Gebirges im Lagerumfeld nur begrenzte Anforderungen bestehen und keine Randbedingungen zum Einsatz von Material für die Sicherung und den Ausbau zu beachten sind¹⁷. Dies ist jedoch nicht der Fall, denn aus Sicht der Optimierung der Sicherheit soll die Störung des Gebirges klein bleiben, und beim Materialeinsatz gibt es Beschränkungen.

Im Sinne einer sicherheitsgerichteten Optimierung soll der Einsatz von Spritzbeton und weiteren zementhaltigen Materialien bei den BE/HAA-Lagerstollen und Versiegelungsstrecken soweit eingeschränkt werden, dass die Bentonitumwandlung begrenzt bleibt (kurzfristige Umwandlung von Na-Bentonit in Ca-Bentonit, langfristige Auswirkungen der pH-Fahne). Die Spritzbetonstärke soll deshalb auf rund 30 cm beschränkt werden, und auch die Menge an verwendetem Stahl soll genügend klein gehalten werden. Weiter ist der Ausbruchvorgang und der Ausbau der BE/HAA-Lagerstollen bzw. der Versiegelungsstrecken so zu gestalten, dass im konturnahen Bereich der Stollen und Tunnel die Auflockerung klein bleibt und möglichst keine Hohlräume entstehen und kein loses Material an der Tunnel- bzw. Stollenwand im Bereich der Sicherung bzw. des Ausbaus verbleibt. Weiter sollen im Bereich der Versiegelung Bögen eingesetzt werden können, die es erlauben, dass im Raum zwischen den Bögen ein direkter Kontakt zwischen Bentonit und Wirtgestein besteht.

Die Begrenzung der Störung des Gebirges soll sicherstellen, dass einerseits die Auflockerungszone um die BE/HAA-Lagerstollen bzw. die Versiegelungsstrecken so klein bleibt und die Verformungen (Rissbildung) darin derart sind, dass die Wasserführung in der Auflockerungszone parallel zu den Bauwerken nach Wiederaufsättigung und Selbstabdichtung genügend klein ist (vgl. zur Beurteilung der Bedeutung der Durchlässigkeit der Auflockerungszone die Berechnungen in Poller et al. 2014). Weiter soll die Störung des Wirtgesteins auf einen möglichst kleinen Teil des vertikalen Migrationspfads beschränkt werden; dazu ist die plastifizierte Zone um die Lagerkammern genügend klein zu halten. Für die BE/HAA-Lagerstollen wird angestrebt, die plastifizierte Zone so weit zu beschränken, dass die vertikale Migrationsdistanz im ungestörten Opalinuston ca. 35 m beträgt; für die SMA/LMA-Lagerkammern wird wegen der deutlich kleineren Radiotoxizität eine vertikale Migrationsdistanz von ca. 20 m angestrebt¹⁸.

Um alle diese Anforderungen zuverlässig zu erfüllen, wird bei der Optimierung der Lagerperimeter angestrebt, die maximale Tiefenlage der Lagerebene von 800 m u.T. (Mindestanforderung für das SMA-Lager in Etappe 1) auf ca. 600 m u.T. bzw. von 900 m u.T. (Mindestanforderung für das HAA-Lager in Etappe 1) auf ca. 700 m u.T. zu beschränken (vgl. Kap. 2.3.3 und Kap. 4). Diese Anpassung berücksichtigt auch die Hinweise des ENSI und seiner Experten in ihren Gutachten zu Etappe 1 (ENSI 2010b, ENSI 2011, ENSI 2012, KNE 2010) und entspricht auch dem Vorgehen anderer Entsorgungsorganisationen mit vergleichbarem Wirtgestein, wo z.B. in Frankreich für ein vergleichbares Wirtgestein die Tiefe der Lagerebene auf ca. 600 m u.T. beschränkt wurde (Erfahrungsaustausch Andra, pers. Kommunikation).

¹⁷ Für die in Etappe 1 verwendeten Mindestanforderungen an die Tiefenlage der Lagerebene (800 m u.T. für das SMA-Lager und 900 m u.T. für das HAA-Lager) können die erforderlichen Untertagebauten sicher gebaut werden, wenn es keine Beschränkung bezüglich zu verwendender Materialien und keine strengen Vorgaben bzgl. Störung des Gebirges gibt.

¹⁸ Vergleiche dazu die Resultate von Sensitivitätsstudien für Etappe 1 (Nagra 2008d, Anhang 5).

- Grundsätzlich erfolgt die Auslegung der geologischen Tiefenlager so, dass deren Langzeitsicherheit durch lagerbedingte Einflüsse (Bildung einer Auflockerungszone im Nahbereich der Lagerkammern / Versiegelungsstrecken; chemische Auswirkungen der verwendeten Materialien für Abfall-Konditionierung und Abfall-Verpackung sowie Ausbau, Verfüllung und Versiegelung der Lagerkammern auf den für die Barrierenwirkung relevanten Teil des Wirtgesteins; Auswirkungen der Gasbildung und Auswirkungen der Wärmeentwicklung (nur HAA-Lager)) nicht signifikant beeinträchtigt wird und für die Einengung keine massgebende Bedeutung hat. Lagerbedingte Einflüsse werden insofern berücksichtigt, als dass mögliche Beeinträchtigungen der Langzeitsicherheit durch bauliche bzw. betriebliche Massnahmen bei der Lagerauslegung vermieden oder klein gehalten werden. Weiter werden die lagerbedingten Einflüsse in den Sicherheitsanalysen (inkl. Dosisberechnungen) berücksichtigt, vgl. dazu die Erläuterungen in Nagra (2014a).

Aus diesen Gründen werden lagerbedingte Einflüsse nicht direkt als entscheidrelevante Merkmale bei der Einengung der geologischen Standortgebiete in Etappe 2 betrachtet¹⁹, und es werden für diese wie in Etappe 1 keine quantitativen Anforderungen definiert. Hingegen werden die lagerbedingten Einflüsse bei der qualitativen Bewertung der Wirtgesteine und geologischen Standortgebiete berücksichtigt und fliessen so in den sicherheitstechnischen Vergleich der geologischen Standortgebiete in Etappe 2 ein (vgl. Kap. 2.3.2 und 2.3.5).

- Für das *Kombilager* gelten die gleichen Anforderungen wie für das SMA- und HAA-Lager, wobei das Platzangebot gleichzeitig für beide Teillager ausreichen muss.

2.3 Vorgehen bei den provisorischen Sicherheitsanalysen und beim sicherheitstechnischen Vergleich der geologischen Standortgebiete

2.3.1 Schrittweises Vorgehen, Festlegung der verwendeten Indikatoren sowie Umgang mit Variabilität und Ungewissheiten

Zielsetzung

In diesem Kapitel wird das Vorgehen bei den provisorischen Sicherheitsanalysen und beim sicherheitstechnischen Vergleich der geologischen Standortgebiete in Etappe 2 erläutert, welches die Vorgaben aus dem Sachplan (BFE 2008) und die Vorgaben des ENSI (insbesondere HSK 2007, ENSI 2010a, ENSI 2013a und ENSI 2013c) sowie die Hinweise aus den Gutachten und Stellungnahmen der Behörden zu Etappe 1 und zu Nagra (2010) berücksichtigt. Das Ziel von Etappe 2 besteht darin, mindestens je zwei Standortgebiete pro Lagertyp für die weiteren Untersuchungen für Etappe 3 festzulegen. Diese Einengung ist sicherheitsorientiert, d.h. sie bezieht sich auf geologische Merkmale, welche für die Langzeitsicherheit der geologischen Tiefenlager besonders wichtig sind. Die getroffenen Entscheide zur Einengung stützen sich auf Dosisberechnungen, welche die Wirksamkeit des Barrierensystems quantifizieren, auf eine qualitative Bewertung der 13 Kriterien zur Sicherheit und technischen Machbarkeit, auf den sicherheitstechnischen Vergleich der Wirtgesteine und geologischen Standortgebiete mit Fokus auf die eindeutigen Nachteile sowie auf eine vergleichende Gesamtbewertung aller Unterlagen. Bautechnische Aspekte werden berücksichtigt, sofern sie die technische Machbarkeit in Frage

¹⁹ Indirekt werden die lagerbedingten Einflüsse wo notwendig bei der Einengung direkt berücksichtigt, z.B. durch Begrenzung der maximalen Tiefe der Lagerebene wird die Grösse der Auflockerungszone begrenzt.

stellen (bzw. inakzeptable Risiken aufweisen) und für die Langzeitsicherheit relevant sind²⁰. Die Gewährleistung von belastbaren Entscheiden zur Einengung bedingt, dass ausreichende Kenntnisse über die geologischen Standortgebiete vorliegen²¹. Mit dem nachstehend beschriebenen Vorgehen wird sichergestellt, dass die für Etappe 3 weiter zu untersuchenden geologischen Standortgebiete sicherheitstechnisch von hoher Qualität sind und Standortgebiete mit eindeutigen Nachteilen, auch wenn sie sicherheitstechnisch geeignet sind, schon in Etappe 2 zurückgestellt werden. Ausgehend von der Vorgabe, dass mindestens je zwei Standortgebiete pro Lagertyp für Etappe 3 vorgeschlagen werden sollen, wird sich deshalb der Vergleich zur Identifikation der eindeutigen Nachteile an den geeignetsten Standortgebieten orientieren; wenn ein Standortgebiet gegenüber diesen geeignetsten Standortgebieten bezüglich der entscheidungsrelevanten Indikatoren und Merkmale deutlich abfällt und die zugehörigen Nachteile eindeutig sind, wird es zurückgestellt²².

Schrittweises Vorgehen bei der Bewertung und Einengung

Die Bewertung und Einengung der Wirtgesteine und geologischen Standortgebiete in Etappe 2 erfolgt in fünf Schritten (vgl. auch Fig. 2.3-5 in Kap. 2.3.7):

- Im ersten Schritt wird ausgehend von den behördlichen Vorgaben das detaillierte Vorgehen bei der schrittweisen Charakterisierung, Optimierung und Bewertung der Varianten (Wirtgesteine, untertägige Lagerperimeter, geologische Standortgebiete) festgelegt, einschliesslich der dabei verwendeten Indikatoren und zugehörigen Unterlagen. Dies ist Gegenstand des vorliegenden Kap. 2.3.
- Im zweiten Schritt wird in den Standortgebieten mit mehr als einem Wirtgestein eine sicherheitsorientierte Optimierung bezüglich der Wirtgesteine vorgenommen. Zunächst wird anhand von wirtgesteinsspezifischen Dosisintervallen geprüft, ob die verschiedenen Wirtgesteine sicherheitstechnisch geeignet und gleichwertig sind. Als nächstes wird mittels der qualitativen Bewertung geprüft, ob die verbleibenden Wirtgesteine gesamthaft eine Bewertung von mindestens "geeignet" aufweisen. Anhand von entscheidungsrelevanten Merkmalen und zugehörigen Indikatoren werden anschliessend in einer vergleichenden Bewertung der Wirtgesteine allfällige eindeutige Nachteile identifiziert. Wirtgesteine, die im Vergleich mit den anderen Wirtgesteinen keine eindeutigen Nachteile aufweisen, werden als *prioritäre Wirtgesteine*²³ bezeichnet. Das detaillierte Vorgehen bei der Auswahl der prioritären Wirtgesteine wird in Kap. 2.3.2 erläutert, und die Umsetzung des zugehörigen Arbeitsschritts ist Gegenstand von Kap. 3.
- Im dritten Schritt wird bezüglich der räumlichen Konfiguration der prioritären Wirtgesteine eine sicherheitsorientierte Optimierung vorgenommen. Dazu werden innerhalb der geologischen Standortgebiete möglichst günstige räumliche Konfigurationen der prioritären

²⁰ D.h. die Optimierung ist stufengerecht: Weitergehende Optimierungsschritte (z.B. detaillierte Lagerauslegung, detailliertes Betriebskonzept etc.) erfolgen erst in späteren Phasen der Lagerrealisierung.

²¹ D.h. die verbleibende Variabilität und Ungewissheiten über die Eigenschaften der geologischen Standortgebiete müssen soweit eingrenzbar sein, dass sie die Entscheide zur Einengung nicht in Frage stellen. Andernfalls müssen die betreffenden geologischen Standortgebiete in Etappe 3 weiter untersucht werden.

²² Zurückgestellt im Sinne des Sachplans bedeutet, dass sowohl in den Etappen als auch zwischen den Etappen die Möglichkeit eines Rückgriffs besteht auf geologische Standortgebiete, die bei einem Einengungsentscheid zurückgestellt wurden (vgl. SGT; BFE 2008, S. 39).

²³ Der Vergleich erfolgt pro Standortgebiet. Allenfalls im gleichen geologischen Standortgebiet vorhandene weitere Wirtgesteine werden im vorliegenden Bericht als *weitere Wirtgesteine* bezeichnet. Es bleibt vorbehalten, die weiteren Wirtgesteine bei Bedarf für Abfälle mit reduzierten Anforderungen an die Barrierenwirkung zu nutzen.

Wirtgesteine abgegrenzt. Zunächst werden in einem GIS²⁴-Schneideprozess Bereiche anhand der in Etappe 1 für die flächenwirksamen Indikatoren verwendeten Mindest- und verschärften Anforderungen abgegrenzt; die so abgegrenzten Bereiche werden als *untertägige Lagerperimeter* bezeichnet. Danach werden für flächenwirksame Indikatoren, die für die Sicherheit wichtig sind, die Anforderungen im Sinne einer Optimierung teilweise weiter verschärft²⁵; die resultierenden Bereiche werden als *optimierte untertägige Lagerperimeter* bezeichnet. Für jeden Lagerperimeter wird im Rahmen der verschiedenen Optimierungsschritte jeweils überprüft, ob das Platzangebot untertags – unter Berücksichtigung der erforderlichen Platzreserven – ausreichend ist, um das Lager aufzunehmen. Das detaillierte Vorgehen bei der Abgrenzung und Optimierung von untertägigen Lagerperimetern wird in Kap. 2.3.3 erläutert, und die Umsetzung des zugehörigen Arbeitsschritts erfolgt in Kap. 4.2.

- Im vierten Schritt wird für die optimierten untertägigen Lagerperimeter anhand von charakteristischen Dosisintervallen geprüft, ob die geologischen Standortgebiete bzw. die zugehörigen Lagerperimeter sicherheitstechnisch geeignet und gleichwertig sind. Das detaillierte Vorgehen bei diesem Arbeitsschritt wird in Kap. 2.3.4 erläutert; Kap. 4.3 enthält eine Zusammenfassung der wichtigsten Resultate (charakteristische Dosisintervalle und deren Beurteilung). Detailliertere Unterlagen zu den Dosisberechnungen finden sich in Nagra (2014a).

Als nächstes erfolgt die qualitative Bewertung der optimierten Lagerperimeter. Lagerperimeter bzw. geologische Standortgebiete, welche gesamthaft nicht mindestens die qualitative Bewertung "geeignet" aufweisen, werden zurückgestellt. Das detaillierte Vorgehen wird in Kap. 2.3.5 erläutert und die Umsetzung des zugehörigen Arbeitsschritts ist Gegenstand von Kap. 4.4.

- Schliesslich erfolgt im fünften Schritt eine Einengung der geologischen Standortgebiete²⁶. Diese basiert auf einer vergleichenden Gesamtbewertung der geologischen Standortgebiete anhand des jeweils zugehörigen optimierten Lagerperimeters. Dazu werden in einem ersten Teilschritt die entscheiderelevanten Merkmale anhand der entscheiderelevanten Indikatoren evaluiert. Im zweiten Teilschritt erfolgt eine vergleichende Gesamtbewertung, basierend auf einer zusammenfassenden Auswertung aller Ergebnisse, mit dem Ziel, diejenigen geologischen Standortgebiete zu identifizieren, die für die weiteren Untersuchungen für Etappe 3 vorzusehen sind. Wenn sich in der vergleichenden Gesamtbewertung bei den entscheiderelevanten Merkmalen und den zugehörigen Indikatoren eindeutige, belastbare Nachteile ergeben, so werden die betreffenden geologischen Standortgebiete zurückgestellt, d.h. sie werden nicht für die weiteren Untersuchungen für Etappe 3 vorgesehen. Die Begründung enthält auch eine Beschreibung, in welcher die geologischen Argumente für die Einengung plausibel und nachvollziehbar dargestellt werden. Das detaillierte Vorgehen wird in Kap. 2.3.6 erläutert, und der zugehörige Arbeitsschritt wird in Kap. 5 umgesetzt.

Wie oben erläutert, umfasst die qualitative Bewertung der Wirtgesteine (Schritt 2) und der geologischen Standortgebiete bzw. der zugehörigen Lagerperimeter (Schritt 4) jeweils zwei Teilschritte:

- Charakterisierung und qualitative Bewertung
- Identifikation von eindeutigen Nachteilen beim Vergleich

²⁴ GIS: Geographisches Informations-System.

²⁵ Im vorliegenden Bericht wird dafür der Begriff *Optimierungsanforderungen (OA)* verwendet.

²⁶ D.h. Standortgebiete werden als Ganzes für die weiteren Untersuchungen für Etappe 3 ausgewählt oder sie werden zurückgestellt.

Der erste Teilschritt wird für die Wirtgesteine und die geologischen Standortgebiete (anhand der zugehörigen Lagerperimeter) getrennt durchgeführt, der zweite Teilschritt beinhaltet einen expliziten Vergleich der verschiedenen Wirtgesteine und geologischen Standortgebiete bzw. Lagerperimeter.

Die Charakterisierung und qualitative Bewertung der Wirtgesteine und geologischen Standortgebiete (bzw. Lagerperimeter) erfolgt anhand der 13 Kriterien zur Sicherheit und technischen Machbarkeit aus SGT Tabelle 1 (vgl. Tab. 2.1-2) sowie – auf der tiefsten Stufe – anhand von Indikatoren, welche die für jedes Kriterium zu beurteilenden Aspekte erfassen. Die Bewertungen der Indikatoren werden auf Stufe der Kriterien und danach auf Stufe der Kriteriengruppen durch gleichgewichtete arithmetische Mittelung aggregiert (analoges Vorgehen wie in Etappe 1). Daraus ergibt sich für die Wirtgesteine und die geologischen Standortgebiete (bzw. Lagerperimeter) eine hierarchisch strukturierte Liste von Bewertungen. Das genaue Vorgehen bei der Charakterisierung und qualitativen Bewertung wird in den Kap. 2.3.2 (Wirtgesteine) und Kap. 2.3.5 (geologische Standortgebiete bzw. jeweils zugehöriger Lagerperimeter) erläutert.

Festlegung der entscheiderelevanten Indikatoren

Die Identifikation von eindeutigen Nachteilen erfolgt anhand von entscheiderelevanten Merkmalen und zugehörigen Indikatoren. Gemäss Vorgabe des ENSI (ENSI 2013a) gelten mindestens folgende vier Merkmale als entscheiderelevant (vgl. Tab. 2.1-5):

- die Wirksamkeit der geologischen Barriere
- die Langzeitstabilität der geologischen Barriere
- die Explorier- und Charakterisierbarkeit der geologischen Barriere im Standortgebiet
- die bautechnische Machbarkeit eines Tiefenlagers unter Berücksichtigung der vorgeschlagenen Standortareale

In Tab. 2.1-5 sind diejenigen Aspekte aufgelistet, welche gemäss ENSI (ENSI 2013a) für die jeweiligen entscheiderelevanten Merkmale bezüglich Sicherheit und technischer Machbarkeit zu beachten sind. Diese Aspekte werden durch entsprechende Indikatoren erfasst. Tab. A-1 im Anhang zeigt detailliert auf, wie diese entscheiderelevanten Indikatoren identifiziert werden, in welcher Beziehung sie zu den entscheiderelevanten Merkmalen stehen und wie sie bei der Optimierung bzw. bei der Identifikation von eindeutigen Nachteilen in Etappe 2 verwendet werden.

Tab. 2.3-1 nennt die entscheiderelevanten Merkmale und zugehörigen Indikatoren und gibt an, bei welchem Schritt die entscheiderelevanten Indikatoren verwendet werden. Einige entscheiderelevante Indikatoren sind von wirtgesteinsspezifischer Natur und kommen deshalb zunächst bei der Auswahl von prioritären Wirtgesteinen zum Einsatz. Andere haben einen starken räumlichen Bezug und werden bei der Abgrenzung und Bewertung der optimierten Lagerperimeter verwendet. Verschiedene Indikatoren werden mehrfach verwendet, häufig in Kombination mit einer Verwendung bei der Identifikation eindeutiger Nachteile der geologischen Standortgebiete.

Überblick über die in Etappe 2 verwendeten Indikatoren

Tab. 2.3-2 enthält alle bei der Bewertung, Optimierung und Einengung in Etappe 2 verwendeten Indikatoren und entscheiderelevanten Indikatoren (Mastertabelle). Die Reihenfolge der Indikatoren folgt der Liste der Kriterien gemäss SGT, wobei jeder Indikator nur einmal bei dem am

ehesten zutreffenden Kriterium aufgeführt ist, auch wenn bei der Bewertung, Optimierung und Einengung einige der Indikatoren mehrmals und für verschiedene Kriterien verwendet werden. Die Zusammenstellung zeigt ferner die Art der Verwendung der Indikatoren (Mindestanforderung, verschärfte Anforderung, Optimierungsanforderung, Bewertung) und den Kontext der Verwendung. Konkret werden die Indikatoren aus Tab. 2.3-2 wie folgt verwendet:

- Bewertung der Wirtgesteine: alle Indikatoren (I), die einen überwiegend wirtgesteinsspezifischen Bezug haben (Spalte "Bewertung Wirtgesteine")
- Identifikation eindeutiger Nachteile der Wirtgesteine im Hinblick auf die Auswahl von prioritären Wirtgesteinen: alle entscheiderelevanten Indikatoren (EI), die einen überwiegend wirtgesteinsspezifischen Bezug haben (Spalte "Bewertung Wirtgesteine")
- Abgrenzung untertägige Lagerperimeter: alle Indikatoren, für die flächenwirksame Anforderungen bestehen²⁷ (Spalte "Abgrenzung Lagerperimeter", Anforderungstyp MA/VA: Mindestanforderungen und verschärfte Anforderungen)
- Optimierung untertägige Lagerperimeter: alle entscheiderelevanten Indikatoren, für die flächenwirksame Optimierungsanforderungen bestehen²⁷ (Spalte "Abgrenzung Lagerperimeter", Anforderungstyp OA: Optimierungsanforderungen)
- Bewertung geologische Standortgebiete anhand der jeweils zugehörigen optimierten Lagerperimeter: alle Indikatoren (I), die in die Bewertung einbezogen werden (Spalte "Bewertung Lagerperimeter/Standortgebiete")
- Identifikation eindeutiger Nachteile der geologischen Standortgebiete anhand der jeweils zugehörigen optimierten Lagerperimeter: alle entscheiderelevanten Indikatoren (EI), die in die Bewertung einbezogen werden (Spalte "Bewertung Lagerperimeter/Standortgebiete").

In Kap. 2.3.2 bis 2.3.6 werden das detaillierte Vorgehen, die genaue Reihenfolge bei der Anwendung der Indikatoren und die Anforderungen für die Indikatoren erläutert. Kap. 2.3.7 enthält eine zusammenfassende Darstellung des Verfahrens für den sicherheitstechnischen Vergleich.

²⁷ Flächenwirksame Anforderungen werden in einem GIS-Schneideprozess umgesetzt.

Tab. 2.3-1: Liste der bei der Optimierung in Etappe 2 verwendeten entscheidrelevanten Merkmale und der zugehörigen Indikatoren.

Legende: × wird beim vorliegenden entscheidrelevanten Merkmal als zugehöriger Indikator verwendet. ¹⁾ Berücksichtigt beim Indikator 'Tiefenlage unter lokaler Erosionsbasis im Hinblick auf die Bildung neuer Rinnen'.

Entscheidrelevante Merkmale (EM) (gemäss Vorgabe des ENSI, vgl. Tab. 2.1-5) Zugehörige entscheidrelevante Indikatoren (detaillierte Begründung siehe Tab. A-1)	Verwendung der entscheidrelevanten Indikatoren bei der Optimierung in Etappe 2		
	Auswahl prioritäre Wirrgesteine	Abgrenzung optimierte Lagerperimeter	Identifikation eindeutige Nachteile / Lagerperimeter / Standortgebiete
a) EM 'Wirksamkeit der geologischen Barriere'			
Hydraulische Durchlässigkeit	×		×
Art der Transportpfade und Ausbildung des Porenraums	×		×
Homogenität des Gesteinsaufbaus	×		×
Transmissivität präferenzierter Freisetzungspfade	×		×
Selbstabdichtungsvermögen	×		×
Mächtigkeit	×		×
Länge der massgebenden Freisetzungspfade	×		×
Kolloide	×		×
b) EM 'Langzeitstabilität der geologischen Barriere'			
Potenzial zur Bildung neuer Wasserwegsamkeiten (Verkarstung)	×		×
Regionale tektonische Elemente: Zu meidende tektonische Zonen		×	
Erosion im Betrachtungszeitraum			×
Tiefenlage unter Fels im Hinblick auf glaziale Tiefenerosion		×	×
Tiefenlage unter lokaler Erosionsbasis im Hinblick auf die Bildung neuer Rinnen		×	×
Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteins-Dekompaktion		×	×
Modellvorstellungen zur Langzeitentwicklung (Geodynamik und Neotektonik; weitere Prozesse)		¹⁾	×
Selbstabdichtungsvermögen	×		×
Seismizität			×
c) EM 'Explorier- und Charakterisierbarkeit der geologischen Barriere im Standortgebiet'			
Variabilität der Gesteinseigenschaften im Hinblick auf ihre Charakterisierbarkeit	×		×
Explorationsverhältnisse im geologischen Untergrund	×		×
d) EM 'Bautechnische Machbarkeit eines Tiefenlagers unter Berücksichtigung der vorgeschlagenen Standortareale'			
Tiefenlage im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit (u.B. Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften)		×	×
Platzangebot untertags		×	×
Geotechnische und hydrogeologische Verhältnisse in überlagernden Gesteinsformationen			×

Tab. 2.3-2: Detaillierte Liste der bei der Bewertung, Optimierung und Einengung in Etappe 2 verwendeten Indikatoren (Mastertabelle).

Legende:

K-Nr/I-Nr	Kriteriennummer/Indikatornummer
MA/VA	Mindestanforderungen/verschärfte Anforderungen gemäss Etappe 1
EI	Entscheidrelevante Indikatoren
I	Für Bewertung verwendete Indikatoren
(×)	Bewertung nur für HAA
*	Gegenüber der Wirtgesteinsbewertung werden bei der Bewertung der Lagerperimeter auch konfigurationsspezifische Aspekte mitberücksichtigt.
+	Hier werden auch die Resultate der Dosisberechnungen berücksichtigt.
°	Hier werden auch die Resultate der bautechnischen Risikoanalyse berücksichtigt.

- 1) Vorgehen und Anforderungen (MA, VA) wie in SGT-E1, jedoch unter Verwendung neuer Daten und Erkenntnisse aus SGT-E2. Die Bewertungsskalen werden angepasst, falls eine Präzisierung aufgrund der in Etappe 1 erfolgten Festlegung der Wirtgesteine und geologischen Standortgebiete notwendig ist.
- 2) Entscheidrelevante Indikatoren zur Identifikation eindeutiger Nachteile der Wirtgesteine bzw. Lagerperimeter.
- 3) Verschiedene Varianten für untertägige Lagerperimeter, von denen einer als "massgebender Lagerperimeter für die Einengung" (kurz mLE) ausgewählt wird.
- 4) Nutzbare Mächtigkeit der oberen Rahmengesteine berücksichtigt über den Indikator 'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteins-Dekompaktion'.
- 5) In SGT-E1 wurde diese Mindestanforderung auch über den Indikator 'Laterale Ausdehnung' erfasst (Nr. 7, nicht in Tabelle aufgeführt).
- 6) Fliesst bei der Bewertung diverser Indikatoren ein, z.B. beim Indikator 'Selbstabdichtungsvermögen'.
- 7) Wird in SGT-E2 nicht verwendet.
- 8) Wird in SGT-E2 nicht mehr verwendet (gemäss Hinweis in ENSI 2010b).
- 9) Wird in SGT-E2 nicht mehr verwendet, da abgedeckt durch regionale geologische Elemente (verbesserter Kenntnisstand durch 2D-Seismik).
- 10) Wird in SGT-E2 nicht mehr verwendet (in SGT-E1 nur für geologisch-tektonische Grossräume verwendet).
- 11) Wird in SGT-E2 nicht mehr verwendet (detailliertere Erfassung anhand Indikatoren Nr. 43 und 44).
- 12) Wird in SGT-E2 nicht mehr verwendet (detailliertere Erfassung anhand Indikator 'Regionale tektonische Elemente: Zu meidende tektonische Zonen').

K-Nr. I-Nr.	Kriteriengruppe / Kriterium / Indikator	Bewertung Wirtgesteine		Abgrenzung Lagerperimeter			Bewertung Lagerperimeter / Standortgebiete	
		I ¹⁾	EI ²⁾	MA ¹⁾	VA ¹⁾	OA ³⁾	I ¹⁾	EI ²⁾
1	Kriteriengruppe 'Eigenschaften des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs'							
1.1	Kriterium 'Räumliche Ausdehnung'							
1	Tiefenlage im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit (u.B. Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften)			×	×	×	×	×
2	Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteins-Dekompaktion			×	×	×	×	×
3	Tiefenlage unter lokaler Erosionsbasis im Hinblick auf die Bildung neuer Rinnen					×	×	×
4	Tiefenlage unter Fels im Hinblick auf glaziale Tiefenerosion			×	×	×	×	×
5	Mächtigkeit * ⁺	×	×	×	×	4)	×	×
6	Regionale tektonische Elemente a) Abstand zu regionalen Störungszonen b) Zu meidende tektonische Zonen			×		×		
8	Platzangebot untertags			5)	×	×	×	×
1.2	Kriterium 'Hydraulische Barrierenwirkung'							
9	Hydraulische Durchlässigkeit * ⁺	×	×				×	×
10	Grundwasserstockwerke						×	
1.3	Kriterium 'Geochemische Bedingungen'							
11	Mineralogie	×					×	
12	pH	×					×	
13	Redox-Bedingungen	×		×			×	
14	Salinität	×					×	
15	Mikrobielle Prozesse	×					×	
16	Kolloide	×	×				×	×

Tab. 2.3-2: (Fortsetzung)

Tab. 2.3-2: (Fortsetzung)

K-Nr. I-Nr.	Kriteriengruppe / Kriterium / Indikator	Bewertung Wirtgesteine		Abgrenzung Lagerperimeter			Bewertung Lagerperimeter / Standortgebiete	
		I ¹⁾	EI ²⁾	MA ¹⁾	VA ¹⁾	OA ³⁾	I ¹⁾	EI ²⁾
1	Kriteriengruppe 'Eigenschaften des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs'							
1.4	Kriterium 'Freisetzungspfade'							
17	Art der Transportpfade und Ausbildung des Porenraums ⁺	×	×				×	×
18	Homogenität des Gesteinsaufbaus	×	×				×	×
19	Länge der massgebenden Freisetzungspfade ⁺	×	×				×	×
20	Transmissivität präferenzzieller Freisetzungspfade ⁺	×	×				×	×
21	Tonmineralgehalt ⁶⁾							
22	Selbstabdichtungsvermögen	×	×				×	×
2	Kriteriengruppe 'Langzeitstabilität'							
2.1	Kriterium 'Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften'							
23	Modellvorstellungen zur Langzeitentwicklung (Geodynamik und Neotektonik; weitere Prozesse)						×	×
24	Seismizität						×	×
25	Modellvorstellungen zu geochemischen Vorgängen ⁷⁾							
26	Seltene geologische Ereignisse (Vulkanismus) ⁸⁾							
27	Potenzial zur Bildung neuer Wasserwegsamkeiten (Verkarstung) [*]	×	×	×			×	×
2.2	Kriterium 'Erosion'							
28	Erosion im Betrachtungszeitraum						×	×
2.3	Kriterium 'Lagerbedingte Einflüsse'							
29	Auflockerungszone im Nahbereich der Untertagebauten	×					×	
30	Chemische Wechselwirkungen	×					×	
31	Verhalten des Wirtgesteins bezüglich Gas	×					×	
32	Verhalten des Wirtgesteins bezüglich Temperatur	(×)					(×)	

K-Nr. I-Nr.	Kriteriengruppe / Kriterium / Indikator	Bewertung Wirtgesteine		Abgrenzung Lagerperimeter			Bewertung Lagerperimeter / Standortgebiete	
		I ¹⁾	EI ²⁾	MA ¹⁾	VA ¹⁾	OA ³⁾	I ¹⁾	EI ²⁾
2	Kriteriengruppe 'Langzeitstabilität'							
2.4	Kriterium 'Nutzungskonflikte'							
33	Rohstoffvorkommen innerhalb des Wirtgesteins	×					×	
34	Rohstoffvorkommen unterhalb des Wirtgesteins			×			×	
35	Rohstoffvorkommen oberhalb des Wirtgesteins						×	
36	Mineral- und Thermalwassernutzungen			×			×	
37	Geothermie und weitere energiebezogene Nutzungen des Untergrunds						×	
3	Kriteriengruppe 'Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen'							
3.1	Kriterium 'Charakterisierbarkeit der Gesteine'							
38	Diffus gestörte Zonen ⁹⁾							
39	Variabilität der Gesteinseigenschaften im Hinblick auf ihre Charakterisierbarkeit	×	×				×	×
40	Erfahrungen	×					×	
3.2	Kriterium 'Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse'							
41	Regionales Störungsmuster und Lagerungsverhältnisse ¹⁰⁾							
42	Kontinuität der interessierenden Schichten ¹¹⁾							
43	Explorationsverhältnisse im geologischen Untergrund *	×	×				×	×
44	Explorationsbedingungen an Oberfläche			×			×	
3.3	Kriterium 'Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen'							
45	Tektonisches Regime (konzeptionell zu meidende Zonen) ¹²⁾							
46	Unabhängige Evidenzen der Langzeitisolation	×					×	

Tab. 2.3-2: (Fortsetzung)

Tab. 2.3-2: (Fortsetzung)

K-Nr. I-Nr.	Kriteriengruppe / Kriterium / Indikator	Bewertung Wirtgesteine		Abgrenzung Lagerperimeter			Bewertung Lagerperimeter / Standortgebiete	
		I ¹⁾	EI ²⁾	MA ¹⁾	VA ¹⁾	OA ³⁾	I ¹⁾	EI ²⁾
4	Kriteriengruppe 'Bautechnische Eignung'							
4.1	Kriterium 'Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen'							
47	Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften *	×					×	
4.2	Kriterium 'Untertägige Erschliessung und Wasserhaltung'							
48	Geotechnische und hydrogeologische Verhältnisse in überlagernden Gesteinsformationen °						×	×
49	Natürliche Gasführung (im Wirtgestein)			×			×	

Überblick über die in Etappe 2 verwendeten Bewertungsskalen und -stufen

Die Bewertungsskalen mit ihren verbalen Bewertungsstufen (*sehr günstig*, *günstig*, *bedingt günstig*, *ungünstig*, vgl. Vorgaben in BFE 2008) sind grundsätzlich gleich wie in Etappe 1 (Nagra 2008d, Anhang 1). Grössere Änderungen gegenüber Etappe 1 werden in vorliegendem Text erwähnt; kleinere Änderungen werden direkt in den Kap. 3.3 und 4.4 zusammen mit der Durchführung der qualitativen Bewertung der Wirtgesteine und Lagerperimeter aufgeführt.

Zur Berücksichtigung des Kritikpunkts der Behörden in ihren Gutachten und Stellungnahmen zu Etappe 1, wird die Abstufung der Bewertungen im oberen Bereich der Bewertungsskala verbessert; neu reicht die Werteskala von 0 bis 5 (statt von 0 bis 4 wie in Etappe 1). Von 0 bis 3 bleibt die Werteskala unverändert. Ab 3 wird die Bewertungsskala wie unten aufgeführt transformiert, um ausgewogenere Wertebereiche zu erhalten:

Bewertungsstufe	Farbcode ¹⁾	Wertebereich in Etappe 1	Wertebereich in Etappe 2
Sehr günstig	dunkelgrün	$3.5 \leq x \leq 4$	$4 \leq x \leq 5$
Günstig	hellgrün	$3 \leq x < 3.5$	$3 \leq x < 4$
Bedingt günstig	gelb	$2 \leq x < 3$	$2 \leq x < 3$
Ungünstig	rosa	$1 \leq x < 2$	$1 \leq x < 2$
Ungenügend ²⁾	rot	$0 \leq x < 1$	$0 \leq x < 1$

¹⁾ mit verfeinerter Abstufung der Farben (vgl. Fig. 2.3-1)

²⁾ kommt in Etappe 2 nicht mehr zur Anwendung

Um differenziertere Ergebnisse zu erhalten, wird in Etappe 2 gegenüber Etappe 1 eine verfeinert abgestufte Bewertung durchgeführt, soweit dies zweckmässig und machbar ist (vgl. Fig. 2.3-1). Dabei stehen grundsätzlich zwei Varianten zur Verfügung:

1. Bei Indikatoren, die auf GIS-mässig erfassten quantitativen Angaben basieren, wird im Prinzip zwischen den in den Bewertungsskalen definierten Stufen linear interpoliert. Dies bedeutet, dass neben den ganzzahligen Bewertungen gemäss Bewertungsskala auch beliebige Zwischenbewertungen zulässig sind, die anschliessend auf Stufen von 0.2 Werteeinheiten gerundet werden.
2. Bei den qualitativen Indikatoren bietet sich an, eine sogenannte vergleichende Bewertung vorzunehmen. Dies bedeutet, dass für die Wirtgesteine bzw. Lagerperimeter, die bei standardmässiger Anwendung der Bewertungsskala der gleichen Bewertungsstufe zugeordnet werden, ein relativer Vergleich durchgeführt wird. In diesem Vergleich wird beurteilt, ob das jeweilige Wirtgestein bzw. der jeweilige Lagerperimeter eine günstigere oder ungünstigere Bewertung verdient als die anderen Wirtgesteine bzw. Lagerperimeter in der gleichen Bewertungsstufe. Basierend darauf wird ein Zuschlag oder Abschlag gegenüber der mittleren Bewertung in der betreffenden Bewertungsstufe vergeben (also z.B. ein Zuschlag von 0.2 gegenüber der mittleren Bewertung 3.5 in der Bewertungsstufe *günstig*, was zur Bewertung 3.7 führt)²⁸. Für die Zu- und Abschläge werden die Werte 0.2 und 0.4 bzw. -0.2 und -0.4 verwendet. Die Festlegung der Werte erfolgt in der Regel argumentativ durch Experteneinschätzung (Relativ-Bewertung).

²⁸ In einigen Fällen wird bei der differenzierteren Bewertung auch ein Quervergleich mit der Bewertung anderer Indikatoren gemacht.

Weiter ist zu beachten, dass sich in Etappe 2 die Bewertung bei einigen Indikatoren nicht mehr auf das gesamte Wirtgestein bzw. den gesamten Lagerperimeter bezieht, sondern auf Teile davon. So wird bei der qualitativen Bewertung der Wirtgesteine für gewisse Indikatoren derjenige Wirtgesteinsteil bewertet, welcher bei der Radionuklidfreisetzung den dominierenden Beitrag zur Barrierenwirkung beisteuert (vgl. Tab. 2.3-3). Dabei handelt es sich jeweils um eine tonmineralreiche Gesteinsabfolge mit genügender Mächtigkeit, innerhalb derer die Lagerkammern platziert werden. Bei der qualitativen Bewertung der Lagerperimeter bezieht sich die Bewertung bei folgenden Indikatoren nicht auf die Gesamtfläche, sondern auf jenen Teilbereich, der die ungünstigste Bewertung ergibt:

- 'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteins-Dekompaktion'
- 'Tiefenlage unter lokaler Erosionsbasis im Hinblick auf die Bildung neuer Rinnen'
- 'Tiefenlage unter Fels im Hinblick auf glaziale Tiefenerosion'
- 'Tiefenlage im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit (u.B. Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften)²⁹

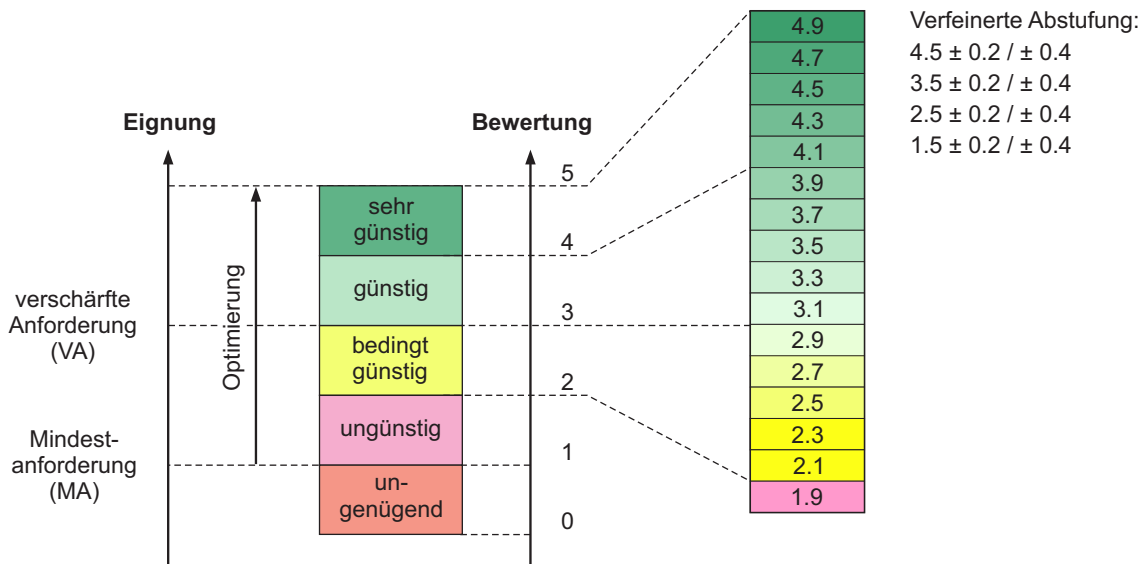


Fig. 2.3-1: In Etappe 2 verwendete Bewertungsstufen (inkl. verfeinerte Abstufung) für die qualitative Bewertung.

Die qualitative Bewertung der Indikatoren erfolgt gemäss SGT anhand einer vierstufigen Bewertungsskala mit den Bewertungsstufen *sehr günstig*, *günstig*, *bedingt günstig* und *ungünstig*. Die Bewertungsstufen orientieren sich an den Mindest- und verschärften Anforderungen aus Etappe 1. Bei der Optimierung der Lagerperimeter wird grundsätzlich eine Verbesserung der qualitativen Bewertung angestrebt (meist im Bereich der Bewertungsstufen *sehr günstig* und *günstig*; wo dies nicht möglich ist auch im Bereich der Bewertungsstufen *bedingt günstig* und *ungünstig*). Um differenziertere Ergebnisse zu erhalten, wird in Etappe 2 gegenüber Etappe 1 eine verfeinert abgestufte Bewertung durchgeführt (Abstufung 0.2 Punkte, mit zugehöriger verfeinerter Abstufung der Farben).

²⁹ Die Abkürzung "u.B." im Indikator 'Tiefenlage im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit (u.B. Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften)' steht für "... unter Berücksichtigung ...".

Umgang mit Variabilität und Ungewissheiten

Gemäss den Vorgaben des ENSI (2010a) müssen die bei der Auswahl von geologischen Standortgebieten in Etappe 2 verwendeten Unterlagen belastbar sein, d.h. die entscheidenden Aussagen müssen auch unter Berücksichtigung der bestehenden Variabilität und Ungewissheiten gültig sein (vgl. Tab. 2.1-1).

Relevante räumliche *Variabilität* (geometrische Verhältnisse) werden soweit möglich erfasst und fliessen in die Parameterwerte für die Beschreibung der Wirtgesteine und in die Abgrenzung und Optimierung der Lagerperimeter ein. Weiter werden sie bei der Prüfung der sicherheitstechnischen Eignung und Gleichwertigkeit der geologischen Standortgebiete und bei deren qualitativen Bewertung berücksichtigt und fliessen so in den sicherheitstechnischen Vergleich der geologischen Standortgebiete ein.

Die relevanten *Ungewissheiten* (inkl. räumliche Variabilität von Gesteinseigenschaften) werden auf zwei Ebenen erfasst:

- Zur Berücksichtigung von *konzeptuellen Ungewissheiten* wird ein Spektrum von Konzeptualisierungen betrachtet, welches wie folgt definiert ist:
 - *Referenz-Konzeptualisierung*, d.h. die aufgrund der Erfahrungsbasis plausibelste Konzeptualisierung,
 - *ungünstige Konzeptualisierung*, d.h. eine Konzeptualisierung mit ungünstiger Wirkung auf das Barrierensystem,
 - *günstige Konzeptualisierung*, d.h. eine Konzeptualisierung mit günstiger Wirkung auf das Barrierensystem³⁰.

Die für die Barrierenwirkung der Wirtgesteine massgebende konzeptuelle Ungewissheit besteht bezüglich der hydrogeologischen Eigenschaften der lithofaziellen Einheiten mit durchschnittlichem Tonmineralgehalt < 20 Gew.-% ("harte Bänke") und deren Einfluss auf die Barrierenwirkung der Wirt- und Rahmengesteine.

Die für die Lagerperimeter massgebende konzeptuelle Ungewissheit betrifft insbesondere die Modellvorstellungen zur Erosion (speziell die Bildung von Durchbruchrinnen als Folge von Flussumlenkungen in Zusammenhang mit zukünftigen Vergletscherungen).

Die Positionierung dieser Konzeptualisierungen beim sicherheitstechnischen Vergleich der geologischen Standortgebiete berücksichtigt die Möglichkeiten zur zuverlässigen Abklärung der betreffenden Ungewissheiten durch Untersuchungen für Etappe 3 (betrifft insbesondere die Explorierbarkeit von tektonischen Elementen (Existenz, Lokation) und die Charakterisierbarkeit der Eigenschaften lithofazieller Einheiten mit reduziertem Tonmineralgehalt und die Prognostizierbarkeit der zukünftigen geologischen Entwicklung). Konzeptuelle Ungewissheiten mit potenziell ungünstiger Wirkung auf das Barrierensystem, welche durch weitere Untersuchungen entscheidend verringert werden können, werden berücksichtigt, indem auch eine alternative Konzeptualisierung für die Einengung herangezogen wird, bei welcher angenommen wird, dass sich die angenommenen ungünstigen Wirkungen auf das Barrierensystem im Rahmen zukünftiger Untersuchungen als gegenstandslos herausstellen. Umgekehrt werden nicht-reduzierbare konzeptuelle Ungewissheiten berücksichtigt, indem die alternative Konzeptualisierung mit einer ungünstigen Wirkung auf das Barrierensystem als massgebende Konzeptualisierung für die Einengung herangezogen wird. Mit diesem Vorgehen wird gewährleistet, dass der Entscheid bezüglich der Einengung der geologischen

³⁰ Wird nur in ausgewählten Fällen verwendet.

Standortgebiete in Etappe 2 belastbar ist; d.h., es wird insbesondere sichergestellt, dass keine Standortgebiete zurückgestellt werden, die sich bei weiteren Untersuchungen als gleich oder besser geeignet herausstellen, als die weiter verfolgten Standortgebiete.

- Zur Berücksichtigung von *Parameter-Ungewissheiten* werden für die verschiedenen Konzeptualisierungen bei Bedarf Variationen der Parameter zur Untersuchung der Sensitivität der Entscheide bezüglich der Ungewissheiten verwendet, welche die relevanten Bandbreiten der Parameterwerte wie folgt abdecken:
 - *Referenzwert*, d.h. der aufgrund der Erfahrungsbasis plausibelste Wert
 - *günstiger Eckwert*, d.h. ein günstiger Wert, der aufgrund der Evidenzen auch auftreten kann³⁰
 - *ungünstiger Eckwert*, d.h. ein ungünstiger Wert, der aufgrund der Evidenzen nicht ausgeschlossen werden kann

Wichtige parametrische Ungewissheiten betreffen die Eigenschaften der massgebenden Freisetzungspfade (insbesondere Längen, hydraulische Durchlässigkeiten, Transmissivitäten, Diffusionskoeffizienten und Sorptionskoeffizienten).

Für die Einengung wird für die Werte der massgebenden Parameter wiederum berücksichtigt, ob sich deren Ungewissheiten mit zukünftigen Untersuchungen zuverlässig reduzieren lassen. Falls nicht, werden vorsichtige, die Ungewissheiten berücksichtigende Werte verwendet.

Die für die Einengung massgebende Konzeptualisierung, kombiniert mit den massgebenden Werten für ausgewählte Parameter und Referenzwerten für alle anderen Parameter, wird im vorliegenden Bericht als *massgebender Fall für die Einengung (mFE)* bezeichnet, häufig auch abgekürzt als "massgebender Fall". In den folgenden Kapiteln wird das detaillierte Vorgehen bei der Festlegung des massgebenden Falls im Kontext der jeweils durchzuführenden Bewertungs- und Einengungsschritte präzisiert.

Wegen der grossen Tragweite der Wahl des *massgebenden Falls für die Einengung* und der dazu gehörenden Parameterwerte wird die Sensitivität dieser Festlegung untersucht, indem für die verschiedenen Wirtgesteine (inkl. Rahmengesteine) der Einfluss alternativer Konzeptualisierungen auf die Entscheide untersucht wird; d.h. es wird geprüft, ob sich die Bewertung selber bzw. die Reihenfolge der Bewertungen ändert, wenn für die Wirtgesteine bzw. Rahmengesteine eine andere Annahme zum Einfluss der "harten Bänke"³¹ auf die Barrierenwirkung des gesamten einschlusswirksamen Gebirgsbereichs getroffen wird. Ebenso wird bei den Lagerperimetern vorgegangen, wo die Sensitivität der Entscheide bezüglich alternativer Annahmen zur zukünftigen Entwicklung untersucht wird, soweit dies gerechtfertigt ist.

2.3.2 Vorgehen bei der Prüfung der sicherheitstechnischen Eignung und Gleichwertigkeit sowie bei der Bewertung und Priorisierung der Wirtgesteine

In diesem Schritt wird bezüglich der Barrierenwirkung der Wirtgesteine eine erste sicherheitstechnische Optimierung vorgenommen. Das übergeordnete Ziel besteht darin, in geologischen Standortgebieten mit mehr als einem Wirtgestein diejenigen Wirtgesteine zu identifizieren, welche eine optimale Barrierenwirkung gewährleisten und welche im Vergleich mit den ande-

³¹ "Harte Bänke": sedimentäre Schichten mit einem Tonmineralgehalt < ca. 20 Gew.-%, was zu einer schlechten Selbstabdichtung und somit schon bei kleinen Versätzen zu einer stark erhöhten hydraulischen Durchlässigkeit führt.

ren Wirtgesteinen keine eindeutigen Nachteile aufweisen. Diese Wirtgesteine werden als prioritäre Wirtgesteine bezeichnet. Für das HAA-Lager entfällt dieser Priorisierungsschritt, da der Entscheid bezüglich der Wahl des Opalinustons als Wirtgestein für das HAA-Lager bereits in Etappe 1 gefällt wurde und der Opalinuston das einzige Wirtgestein in allen HAA-Standortgebieten ist.

Ausgangspunkt sind die in Etappe 1 gewählten Standortgebiete mit den zugehörigen Wirtgesteinen. Für das SMA-Lager stellt sich die Frage des prioritären Wirtgesteins, wo neben dem Opalinuston für die Standortgebiete Zürich Nordost und Nördlich Lägern auch die Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger' und für das Standortgebiet Jura-Südfuss auch die Effinger Schichten als weitere mögliche Wirtgesteine identifiziert wurden, vgl. Tab. 2.2-1. Für diese Standortgebiete werden für die Wirtgesteine geologische Konzeptbilder der Gesteinsprofile im einschlusswirksamen Gebirgsbereich erstellt, wo die konzeptuellen Ungewissheiten bezüglich Wasserführung in lithofaziellen Einheiten mit durchschnittlichem Tonmineralgehalt < 20 Gew.-% ("harte Bänke") durch verschiedene alternative Konzeptualisierungen erfasst werden. Durch eine Beurteilung der Möglichkeiten zur Reduktion dieser Ungewissheiten durch weitere Untersuchungen für Etappe 3 (insbesondere Explorierbarkeit und Charakterisierbarkeit dieser lithofaziellen Einheiten und der Nachweis der Absenz bzw. der Existenz von tektonisch-strukturellen Elementen sowie ihr Einfluss auf die Wasserführung) wird aus den alternativen Konzeptualisierungen und Parameterwerten derjenige Fall ausgewählt, welcher einen belastbaren Entscheid bei der Auswahl der prioritären Wirtgesteine gewährleistet (d.h. der für die Einengung massgebende Fall). Anhand der anderen Konzeptualisierungen und Parameterwerte wird der Einfluss der bestehenden Ungewissheiten auf die Barrierenwirkung aufgezeigt und bei Bedarf werden die Befunde auch in die Entscheidungsfindung einbezogen.

Anhand von Dosisberechnungen wird zunächst geprüft, ob die verschiedenen Wirtgesteine für das SMA-Lager sicherheitstechnisch geeignet und gleichwertig sind. Ausgangspunkt für die Dosisberechnungen ist der Referenzfall (d.h. die aufgrund der Erfahrungsbasis plausibelste Konzeptualisierung mit den plausibelsten Parameterwerten)³². Die Berechnung der *wirtgesteinspezifischen* Dosisintervalle erfolgt unter Berücksichtigung der vom ENSI (ENSI 2010a) bezeichneten Rechenfälle (vgl. Tab. 2.1-4) sowie weiterer Varianten, insbesondere auch des für die Einengung massgebenden Falls (mFE)³³. Dabei wird angenommen, dass das SMA-Inventar vollumfänglich im jeweils betrachteten Wirtgestein eingelagert wird³⁴. Für die Erfassung der Beiträge der oberen und unteren Rahmengesteine zur Barrierenwirkung des Gesamtsystems werden je nach Situation unterschiedliche Konzeptualisierungen bezüglich ihrer Barrierenwirkung berücksichtigt.

Basierend auf diesen Dosisberechnungen gilt ein Wirtgestein als sicherheitstechnisch ungeeignet und wird deshalb ausgeschlossen, falls der obere Rand seines Dosisintervalls über dem Schutzkriterium von 0.1 mSv/a gemäss Richtlinie ENSI-G03 liegt. Die Prüfung der sicherheitstechnischen Gleichwertigkeit erfolgt anhand des Vergleichs der Dosisintervalle mit der Schwelle zur Optimierung gemäss Strahlenschutzverordnung (0.01 mSv/a); demnach wird ein

³² Der Referenzfall kann vom massgebenden Fall für die Einengung (mFE) abweichen.

³³ Der "für die Einengung massgebende Fall" für die Dosisberechnungen berücksichtigt denjenigen Teil des Wirtgesteins, welcher bei der Radionuklidfreisetzung den dominierenden Beitrag zur Barrierenwirkung beisteuert. Auch die qualitative Bewertung fokussiert bzgl. Barrieren beim "für die Einengung massgebenden Fall" auf diesen Teil des Wirtgesteins, berücksichtigt jedoch für die Beurteilung der Mächtigkeit zusätzlich auch die barriierenwirksamen Anteile der Rahmengesteine.

³⁴ Diese Annahme gilt für die Festlegung des prioritären Wirtgesteins; für die spätere Realisierung bleibt die Einlagerung von SMA mit reduzierten Anforderungen an die Barrierenwirkung in den "weiteren" Wirtgesteinen grundsätzlich vorbehalten.

Wirtgestein zurückgestellt, falls der obere Rand seines Dosisintervalls über dieser Schwelle liegt und sein Dosisintervall nicht mit dem niedrigsten Dosisintervall der anderen Wirtgesteine überlappt.

Als nächstes erfolgt eine Charakterisierung und qualitative Bewertung der Wirtgesteine bezüglich der 4 Kriteriengruppen und 13 Kriterien gemäss SGT Tab. 1 (BFE 2008) anhand der zugehörigen wirtgesteinsspezifischen Indikatoren (vgl. Tab. 2.3-2 und Tab. 2.3-3). Für gewisse Indikatoren bezieht sich die Bewertung auf denjenigen Teil des Wirtgesteins, welcher bei der Radionuklidfreisetzung den dominierenden Beitrag zur Barrierenwirkung beisteuert. Dabei handelt es sich jeweils um eine tonmineralreiche Gesteinsabfolge von genügender Mächtigkeit, innerhalb derer die Lagerkammern platziert werden (in Tab. 2.3-3 mit Wirtgestein *sensu stricto* / WG-ss bezeichnet). Die Charakterisierung und Bewertung erfolgen primär für den für die Einengung massgebenden Fall, die Belastbarkeit der Ergebnisse wird aber jeweils anhand der alternativen Konzeptualisierungen und Parameter-Bandbreiten überprüft.

Bei der qualitativen Bewertung einiger Indikatoren (in Tab. 2.3-3 mit + markiert) werden auch die Resultate von Dosisberechnungen zur Barrierenwirksamkeit der Wirtgesteine berücksichtigt. Dabei handelt es sich je nach Wirtgestein um die Indikatoren 'Mächtigkeit', 'Hydraulische Durchlässigkeit', 'Art der Transportpfade und Ausbildung des Porenraums', 'Transmissivität präferenzieller Freisetzungspfade' und 'Länge der massgebenden Freisetzungspfade'.

Diese Bewertungen werden dann schrittweise auf den Stufen der Kriterien, der Kriteriengruppen und der Gesamtbewertung aggregiert, basierend auf einer gleichgewichteten arithmetischen Mittelung (analog wie in Etappe 1). Daraus ergibt sich für jedes Wirtgestein eine hierarchisch strukturierte Liste von qualitativen Bewertungen (vgl. Fig. 2.3-2). Wirtgesteine, welche in der Gesamtbewertung unter Berücksichtigung aller Kriterien nicht mindestens das Prädikat "geeignet" erzielen, werden entsprechend den behördlichen Vorgaben (BFE 2008, ENSI 2010a) zurückgestellt.

Die Resultate der Bewertung werden auch verwendet zur Identifikation eindeutiger Nachteile, welche anhand der vom ENSI (ENSI 2013a) vorgegebenen entscheiderelevanten Merkmale (vgl. Kap. 2.3.1 und Tab. 2.3-4) erfolgt und dazu ausgewählte, sogenannt entscheiderelevante Indikatoren benutzt. Die Bewertung der entscheiderelevanten Merkmale der Wirtgesteine geschieht durch Aggregation der Bewertungen der zugehörigen wirtgesteinsspezifischen entscheiderelevanten Indikatoren, wobei die Bewertungen unverändert aus der qualitativen Bewertung übernommen werden. Der Unterschied zur qualitativen Bewertung der Wirtgesteine besteht darin, dass einerseits bei der Bewertung nicht der umfangreiche Satz von 24 wirtgesteinsspezifischen Indikatoren berücksichtigt wird, sondern lediglich eine Teilmenge von 11 entscheiderelevanten Indikatoren, und dass andererseits die Bewertungen für diese Indikatoren auf Stufe der entscheiderelevanten Merkmale aggregiert werden (vgl. Fig. 2.3-2). Dabei gelangen zwei unterschiedliche Aggregationsmethoden zum Einsatz (vgl. Tab. 2.3-4 und Anhang D)³⁵. Die Zuordnung dieser Indikatoren zu den entscheiderelevanten Merkmalen ist aus Tab. 2.3-1 und 2.3-4 ersichtlich. Aufgrund seiner grossen Bedeutung für die Barrierenwirksamkeit und für die Langzeitstabilität wird der Indikator 'Selbstabdichtungsvermögen' bei zwei Merkmalen als entscheiderelevant zugeordnet. Dadurch erhält dieser Indikator ein grösseres Gewicht.

³⁵ i) Arithmetische Mittelung mit Gleichgewichtung der Indikatoren pro Merkmal: Damit wird innerhalb eines Merkmals eine Kompensation zugelassen, d.h. eine schlechte Bewertung kann durch eine gute Bewertung innerhalb des gleichen Merkmals kompensiert werden. ii) Minimum der Bewertungen aller Indikatoren pro Merkmal: Damit wird innerhalb eines Merkmals keinerlei Kompensation zugelassen, d.h. eine schlechte Bewertung kann nicht durch eine gute Bewertung innerhalb des gleichen Merkmals kompensiert werden. Damit wird der unterschiedlichen Bedeutung der Indikatoren bzgl. der entscheiderelevanten Merkmale differenziert Rechnung getragen.

Für den Vergleich der Wirtgesteine pro Standortgebiet bezüglich der entscheidrelevanten Merkmale bzw. Indikatoren werden drei verschiedene Verfahren verwendet, welche die eindeutigen Nachteile der jeweiligen Wirtgesteine quantitativ erfassen und welche sich im Vergleich mit der qualitativen Bewertung durch einen geringeren Kompensationsgrad bei der Aggregation der Bewertungen auszeichnen (direkter Vergleich der Bewertung der entscheidrelevanten Merkmale und Indikatoren; 'Outranking' – paarweiser Vergleich der Wirtgesteine; 'Malus-Bilanzierung' – Vergleich der Wirtgesteinsbewertungen mit Schwellenwerten, vgl. Anhang D)³⁶. Aus diesem Vergleich und unter Berücksichtigung einer zusammenfassenden Auswertung aller Ergebnisse werden die eindeutigen Nachteile der Wirtgesteine für das SMA-Lager identifiziert und das bezüglich Barrierenwirksamkeit günstigste Wirtgestein pro geologisches Standortgebiet ausgewählt (prioritäres Wirtgestein). Die Begründung enthält auch eine multiple Argumentationslinie, bei welcher der plausiblen und nachvollziehbaren Darstellung der geologischen Argumente für die Vor- bzw. Nachteile ein hoher Stellenwert gegeben wird. Dabei werden auch die von der KNS und der AG SiKa/KES aufgebracht und auch in ENSI (2013b) aufgeführten Fragen und Hinweise berücksichtigt.

Die Umsetzung dieses Schritts erfolgt in Kap. 3. Im nachfolgenden Kapitel wird das Vorgehen bei der Abgrenzung von untertägigen Lagerperimetern für das prioritäre Wirtgestein innerhalb eines jeden geologischen Standortgebiets beschrieben.

³⁶ Bei der Festlegung der eindeutigen Nachteile wird dem 'direkten Vergleich der Bewertungen' die höchste Bedeutung gegeben; das 'Outranking' und die 'Malus-Bilanzierung' werden verwendet, um allenfalls vorhandene zusätzliche Hinweise auf eindeutige Nachteile zu identifizieren (Hinweise auf zu prüfende Nachteile).

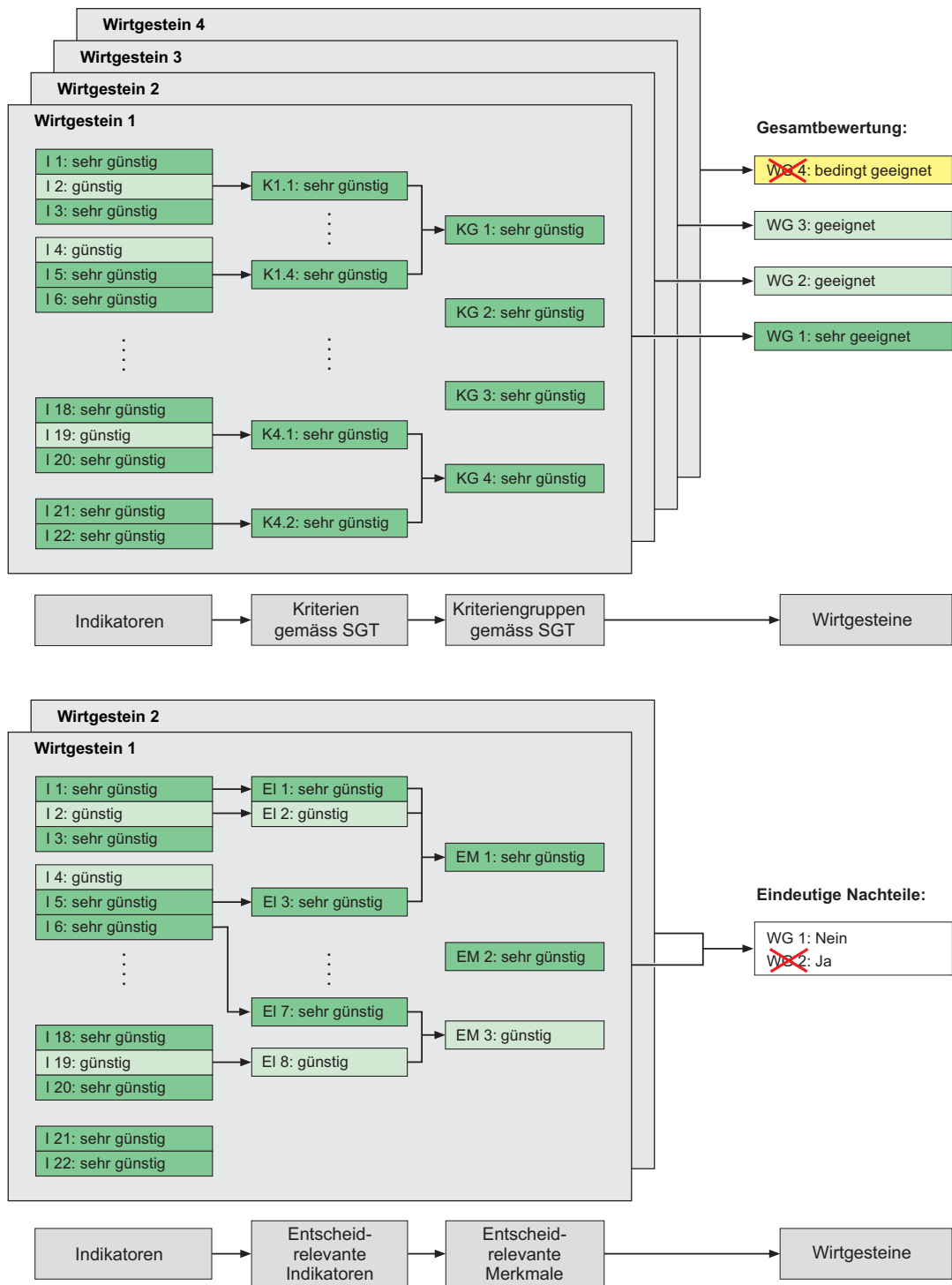


Fig. 2.3-2: Vorgehen bei der Aggregation der qualitativen Bewertungen aller wirtgesteins-spezifischen Indikatoren (oben) bzw. der entscheidrelevanten Indikatoren im Hinblick auf die Identifikation eindeutiger Nachteile der Wirtgesteine (unten).

Wirtgesteine, welche bei der qualitativen Bewertung unter Berücksichtigung aller wirtgesteins-spezifischen Kriterien und Indikatoren gesamthaft nicht mindestens die Bewertung "geeignet" erhalten, und solche, welche eindeutige Nachteile aufweisen, werden zurückgestellt.

Tab. 2.3-3: Verwendete Indikatoren für die qualitative Bewertung der Wirtgesteine in Etappe 2.

In der letzten Spalte wird aufgezeigt, welche der für die qualitative Bewertung verwendeten Indikatoren (I) als entscheidungsrelevante Indikatoren (EI) eingestuft werden. Anhand dieser Indikatoren werden im direkten Vergleich eindeutige Nachteile der Wirtgesteine identifiziert (vgl. auch Tab. 2.3-2).

¹⁾ In dieser Spalte wird präzisiert, auf welchen Teil des Wirtgesteins (WG) bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (EG) sich die Bewertung bezieht. Als Wirtgestein *sensu stricto* (WG-ss) wird die tonreiche Gesteinsabfolge mit genügender Mächtigkeit innerhalb des Wirtgesteins bezeichnet, in der die Lagerkammern angeordnet werden.

²⁾ Vorgehen analog wie in SGT-E1, jedoch unter Verwendung allfälliger neuer Daten und Erkenntnisse für SGT-E2.

³⁾ Entscheidungsrelevante Indikatoren zur Identifikation eindeutiger Nachteile der Wirtgesteine.

(×) Bewertung nur für HAA-Lager.

+ Hier werden auch die Resultate von Dosisberechnungen berücksichtigt.

Nr.	Kriteriengruppe / Kriterium / Indikator (Nr. gemäss Tabelle 2.5-3 in Nagra 2008b)	Präzisierung Bewertungs- objekt ¹⁾	Bewertung Wirtgesteine	
			I ²⁾	EI ³⁾
1	Kriteriengruppe 'Eigenschaften des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs'			
1.1	Kriterium 'Räumliche Ausdehnung'			
5	Mächtigkeit ⁺	EG	×	×
1.2	Kriterium 'Hydraulische Barrierenwirkung'			
9	Hydraulische Durchlässigkeit ⁺	WG-ss	×	×
1.3	Kriterium 'Geochemische Bedingungen'			
11	Mineralogie	WG-ss	×	
12	pH	WG-ss	×	
13	Redox-Bedingungen	WG-ss	×	
14	Salinität	WG-ss	×	
15	Mikrobielle Prozesse	WG-ss	×	
16	Kolloide	WG-ss	×	×
1.4	Kriterium 'Freisetzungspfade'			
17	Art der Transportpfade und Ausbildung des Porenraums ⁺	WG-ss	×	×
20	Transmissivität präferenzialer Freisetzungspfade ⁺	WG-ss	×	×
22	Selbstabdichtungsvermögen	WG-ss	×	×
18	Homogenität des Gesteinsaufbaus	WG	×	×
19	Länge der massgebenden Freisetzungspfade ⁺	WG-ss	×	×

Tab. 2.3-3: (Fortsetzung)

Nr.	Kriteriengruppe / Kriterium / Indikator (Nr. gemäss Tabelle 2.5-3 in Nagra 2008b)	Präzisierung Bewertungs- objekt ¹⁾	Bewertung Wirtgesteine	
			I ²⁾	EI ³⁾
2	Kriteriengruppe 'Langzeitstabilität'			
2.1	Kriterium 'Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften'			
27	Potenzial zur Bildung neuer Wasserwegsamkeiten (Verkarstung)	WG	×	×
2.3	Kriterium 'Lagerbedingte Einflüsse'			
29	Auflockerungszone im Nahbereich der Untertagebauten	WG-ss	×	
30	Chemische Wechselwirkungen	WG-ss	×	
31	Verhalten des Wirtgesteins bezüglich Gas	WG-ss	×	
32	Verhalten des Wirtgesteins bezüglich Temperatur	WG-ss	(×)	
2.4	Kriterium 'Nutzungskonflikte'			
33	Rohstoffvorkommen innerhalb des Wirtgesteins	WG	×	
3	Kriteriengruppe 'Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen'			
3.1	Kriterium 'Charakterisierbarkeit der Gesteine'			
39	Variabilität der Gesteinseigenschaften im Hinblick auf ihre Charakterisierbarkeit	WG-ss	×	×
40	Erfahrungen	WG	×	
3.2	Kriterium 'Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse'			
43	Explorationsverhältnisse im geologischen Untergrund	WG	×	×
3.3	Kriterium 'Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen'			
46	Unabhängige Evidenzen der Langzeitisolation	WG	×	
4	Kriteriengruppe 'Bautechnische Eignung'			
4.1	Kriterium 'Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen'			
47	Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften	WG-ss	×	

Tab. 2.3-4: Entscheidrelevante Merkmale und Indikatoren für die Identifikation eindeutiger Nachteile der Wirtgesteine.

Erläuterungen zur Aggregationsmethode (Mittelwert bzw. Minimum) finden sich im Text.

Nr.	Entscheidrelevante Merkmale (EM) (gemäss Vorgabe des ENSI, vgl. Tab. 2.1-5) Entscheidrelevante Indikatoren (EI) (gemäss Tab. 2.3-2)	Aggregations methode
a)	EM 'Wirksamkeit der geologischen Barriere'	Mittelwert
5	Mächtigkeit	
9	Hydraulische Durchlässigkeit	
20	Transmissivität präferenzieller Freisetzungspfade	
22	Selbstabdichtungsvermögen	
18	Homogenität des Gesteinsaufbaus	
17	Art der Transportpfade und Ausbildung des Porenraums	
19	Länge der massgebenden Freisetzungspfade	
16	Kolloide	
b)	EM 'Langzeitstabilität der geologischen Barriere'	Minimum
27	Potenzial zur Bildung neuer Wasserwegsamkeiten (Verkarstung)	
22	Selbstabdichtungsvermögen	
c)	EM 'Explorier- und Charakterisierbarkeit der geologischen Barriere im Standortgebiet'	Mittelwert
39	Variabilität der Gesteinseigenschaften im Hinblick auf ihre Charakterisierbarkeit	
43	Explorationsverhältnisse im geologischen Untergrund	

2.3.3 Vorgehen bei der Abgrenzung von untertägigen Lagerperimetern in den geologischen Standortgebieten

Die Abgrenzung der Lagerperimeter erfolgt in zwei Teilschritten: Im ersten Teilschritt werden innerhalb der geologischen Standortgebiete Lagerperimeter abgegrenzt, bei denen unter Verwendung der neuen Daten und Erkenntnisse die Mindestanforderungen (MA) und verschärften Anforderungen (VA) gemäss Etappe 1 berücksichtigt werden.³⁷ Anschliessend wird für die so abgegrenzten Lagerperimeter eine Grobcharakterisierung durchgeführt, welche mögliche Schwachpunkte aufzeigt und damit die Grundlage für die Festlegung der Optimierungsstrategie bildet. Bei der Evaluation der Schwachpunkte werden auch die Variabilität und Ungewissheiten berücksichtigt. Falls es das Platzangebot zulässt, wird anschliessend im zweiten Teilschritt eine entsprechende Optimierung der Lagerperimeter durchgeführt. Diese hat zum Ziel, die Schwächen abzubauen und dadurch besonders günstige Konfigurationen der prioritären Wirtgesteine innerhalb der geologischen Standortgebiete zu identifizieren.³⁸

Die Abgrenzung der Lagerperimeter berücksichtigt die Indikatoren, die für die Sicherheit und technische Machbarkeit des geologischen Tiefenlagers besonders wichtig sind und einen ausgeprägt flächenwirksamen Bezug aufweisen. Die in Etappe 1 für diese Indikatoren verwendeten Anforderungen (MA und VA) werden bei der Optimierung teilweise weiter verschärft und angepasst (Optimierungsanforderungen, abgekürzt OA). Zudem werden einige Indikatoren modifiziert, um gegenüber Etappe 1 eine kleinräumigere und differenziertere Betrachtung zu ermöglichen. Tab. 2.3-5 zeigt auf, wie die Indikatoren grundsätzlich angewendet werden^{39, 40}.

³⁷ Auf diese Weise wird die Forderung des ENSI umgesetzt, dass für die in Etappe 2 vorgeschlagenen Lagerperimeter die Mindest- und verschärften Anforderungen aus Etappe 1 immer noch erfüllt sein müssen (ENSI 2013a, Kap. 2.2).

³⁸ Eine Optimierung im streng mathematischen Sinn wird dabei nicht angestrebt.

³⁹ Die folgenden Ausführungen gelten für die geologischen Standortgebiete in der Nordschweiz. Sinngemäss übertragen, ist das Vorgehen auch im Standortgebiet Wellenberg anwendbar.

⁴⁰ Im Unterschied zu Etappe 1 kommt in dieser Liste der Indikator 'Diffus gestörte Zonen' nicht vor. Der Grund dafür ist der verbesserte Kenntnisstand und die differenziertere Betrachtung: Die Ergebnisse der 2D-Seismik ermöglichen es, in den Teilgebieten, die früher als diffus gestört klassifiziert wurden, zwischen ungestörten Zonen, regionalen Störungszonen und zu meidenden tektonischen Zonen zu differenzieren. Letztere werden mit dem Indikator 'Regionale tektonische Elemente' berücksichtigt, welcher neu neben "regionalen Störungszonen" auch "zu meidende tektonische Zonen" umfasst, die aus konzeptionellen Gründen gemieden werden (vgl. Nagra 2014b, Dossier II). Somit wird der Indikator 'Diffus gestörte Zonen' nicht mehr benötigt.

Auch der Indikator 'Tektonisches Regime (konzeptionell zu meidende Zonen)' ist in der Liste nicht enthalten. In Etappe 1 wurde mit der betreffenden verschärften Anforderung die Randzone des Hegau-Bodensee-Grabens eliminiert. Weil somit die resultierenden geologischen Standortgebiete ausserhalb dieser Randzone liegen, ist der Indikator in Etappe 2 hinfällig.

Ferner wurde der Indikator 'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf flächenhafte Erosion' durch den Indikator 'Tiefenlage unter lokaler Erosionsbasis im Hinblick auf die Bildung neuer Rinnen' ersetzt, um die lokalen Erosionsverhältnisse (insbesondere Bildung neuer Durchbruchsrinnen) differenzierter zu berücksichtigen. Der Aspekt der flächenhaften Erosion wird durch den Indikator 'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteins-Dekompression' abgedeckt (vgl. Kap. 4.1).

Tab. 2.3-5: Indikatoren für die Abgrenzung der Lagerperimeter für das SMA- und HAA-Lager.

Legende: MA – Mindestanforderung, VA – verschärfte Anforderung, OA – Optimierungsanforderung, GIS – Berücksichtigung bei GIS-Schneideprozess.

¹⁾ Vorgehen grundsätzlich wie in SGT-E1.

²⁾ Vorgehen abweichend von SGT-E1 und Anforderungen über Anforderungen in Etappe 1 hinausgehend.

K-Nr.	I-Nr.	Indikator	Abgrenzung Lagerperimeter			GIS
			MA ¹⁾	VA ¹⁾	OA ²⁾	
1. Abgrenzung untertägige Lagerperimeter (Teilschritt 1)						
1.1	2	Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteins-Dekompaktion	×	×		ja
1.1	1	Tiefenlage im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit (u.B. Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften)	×	×		ja
1.1	5	Mächtigkeit	×	×		ja
1.1	6	Regionale tektonische Elemente: Abstand zu regionalen Störungszonen	×			ja
1.1	4	Tiefenlage unter Fels im Hinblick auf glaziale Tiefenerosion	×	×		ja
1.3	13	Redox-Bedingungen	×			nein
2.1	27	Potenzial zur Bildung neuer Wasserwegsamkeiten (Verkarstung)	×			nein
2.4	34	Rohstoffvorkommen unterhalb des Wirtgesteins	×			nein
2.4	36	Mineral- und Thermalwassernutzungen	×			nein
3.2	44	Explorationsbedingungen an Oberfläche	×			nein
4.2	49	Natürliche Gasführung (im Wirtgestein)	×			nein
1.1	8	Platzangebot untertags		×		ja
2. Optimierung untertägige Lagerperimeter (Teilschritt 2)						
1.1	3	Tiefenlage unter lokaler Erosionsbasis im Hinblick auf die Bildung neuer Rinnen			×	ja
1.1	2	Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteins-Dekompaktion			×	ja
1.1	4	Tiefenlage unter Fels im Hinblick auf glaziale Tiefenerosion			×	ja
1.1	1	Tiefenlage im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit (u.B. Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften)			×	ja
3.2	6	Regionale tektonische Elemente: Zu meidende tektonische Zonen			×	ja
1.1	8	Platzangebot untertags			×	ja

Nach Durchführung des GIS-Schneideprozesses in Teilschritt 1 wird geprüft, ob die resultierenden Gebiete die Anforderung bezüglich des Platzangebots und die Mindestanforderungen für eine Gruppe von sechs Indikatoren erfüllen⁴¹ (vgl. Tab. 2.3-5). Wenn ein Gebiet alle diese Anforderungen erfüllt, qualifiziert es sich als Lagerperimeter für die nachfolgende Optimierung.

Als Vorbereitung für die Optimierung in Teilschritt 2 wird anschliessend eine Grobcharakterisierung der Lagerperimeter aus Teilschritt 1 durchgeführt. Grundsätzlich gibt es vier mögliche Schwachpunkte, die in Zusammenhang mit der Optimierung relevant sein können.

Der erste Schwachpunkt ist die Anwesenheit von geologischen Elementen, welche klare Anzeichen einer erheblichen tektonischen Überprägung aufzeigen und die für die Neotektonik bzw. die Langzeitentwicklung relevant sind (z.B. Deformationsbereiche / Flexuren). Diese werden als *zu meidende tektonische Zonen* bezeichnet. Die Optimierungsstrategie besteht darin, die betreffenden Zonen zu meiden.

Der zweite Schwachpunkt ist eine relativ geringe Tiefenlage des Wirtgesteins, weil diese entweder die Nutzung des gesamten einschlusswirksamen Gebirgsbereichs verunmöglichen (Gesteins-Dekompaktion) oder/und zu einer Gefährdung der Barrierenwirkung durch Erosion führen könnte. Bei der Beurteilung der Erosion sind auch die lokalen Erosionsverhältnisse (z.B. die Möglichkeit der Bildung von Durchbruchsrinnen) und die glaziale Tiefenerosion zu betrachten. Wenn dieser Schwachpunkt vorliegt, besteht die Optimierungsstrategie in einer *Maximierung der minimalen Tiefenlage*.

Der dritte Schwachpunkt ist eine grosse Tiefenlage des Wirtgesteins, weil diese zu geotechnisch ungünstigen Bedingungen und damit zu einer Schädigung des Wirtgesteins im Bereich der Lagerkammern sowie zu einer Beeinträchtigung der technischen Barrieren führen kann. Die Optimierungsstrategie besteht hier in einer *Minimierung der maximalen Tiefenlage der Lagerebene*.

Der vierte Schwachpunkt ist eine relativ hohe Dichte an anordnungs- und einlagerungsbestimmenden geologischen Elementen (insbesondere Störungszonen), weil diese bei der Anordnung der Lagerkammern des SMA- und HAA-Lagers bzw. bei der Einlagerung der BE/HAA-Endlagerbehälter gemieden werden. Weiter ist hier bei grosser Tiefenlage auch die lokale tektonische Überprägung zu berücksichtigen, da diese in gewissen Lagerkammern lokal evtl. zu grösseren Konvergenzen und/oder zu vermehrten Ausbrüchen führen kann, und diese Lagerkammern dann zumindest teilweise nicht zur Einlagerung verwendet werden können. In diesem Fall besteht die Optimierungsstrategie in der Gewährleistung von ausreichenden Reserven beim Platzangebot, damit den genannten Elementen ausgewichen werden kann und gewisse Lagerkammern bei Bedarf aufgegeben werden können. Die betreffende Optimierung geschieht indirekt, indem die Anforderungen bei den anderen Indikatoren nicht zu stark erhöht werden, sodass ein *Platzangebot mit genügenden Reserven* verbleibt.

Im zweiten Teilschritt wird die geschilderte Optimierungsstrategie umgesetzt. Dabei werden in jedem geologischen Standortgebiet bei Bedarf verschiedene Konzeptualisierungen betrachtet (getrennt für das SMA-Lager und das HAA-Lager), nämlich eine Referenz-Konzeptualisierung und alternative (ungünstige und/oder günstige) Konzeptualisierungen. Bei der Festlegung der Konzeptualisierungen werden u.a. die konzeptuellen Ungewissheiten bezüglich der Bildung von Durchbruchsrinnen berücksichtigt. Weitere zu untersuchende Alternativen betreffen die Fest-

⁴¹ Die Prüfung dieser sechs Indikatoren ist einfach und erfolgt deshalb summarisch und wird in diesem Bericht nicht weiter erwähnt.

legung der Anforderungen für die Optimierung der Lagerperimeter, beispielsweise die Anforderung zur maximalen Tiefenlage der Lagerebene. Der Umgang mit den Ungewissheiten hängt davon ab, ob es sich um inhärente Ungewissheiten handelt oder um Ungewissheiten, die durch Untersuchungen für Etappe 3 vermindert werden können.

Konkret erfolgt die Optimierung der Lagerperimeter, indem – ausgehend von den Ergebnissen des ersten Teilschritts – im GIS-Schneideprozess die Anforderungen je nach Bedarf für eine oder mehrere Konzeptualisierungen für die folgenden fünf Indikatoren soweit nötig und sinnvoll erhöht werden:

- 'Regionale tektonische Elemente: Zu meidende tektonische Zonen'
- 'Tiefenlage unter lokaler Erosionsbasis im Hinblick auf die Bildung neuer Rinnen'
- 'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteins-Dekompaktion'
- 'Tiefenlage unter Fels im Hinblick auf glaziale Tiefenerosion'
- 'Tiefenlage im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit (u.B. Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften)'

Beim ersten Indikator wird die Optimierungsanforderung gestellt, den zu meidenden tektonischen Zonen immer auszuweichen.

Die nächsten drei Indikatoren beziehen sich auf die minimale Tiefenlage und die letzte auf die maximale Tiefenlage. Tab. 2.3-6 liefert nähere Angaben zu diesen Indikatoren und ihre funktionale Bedeutung bei der Optimierung der Lagerperimeter. Bei allen vier Indikatoren zur Tiefenlage verläuft die Optimierung schrittweise mit dem Ziel, eine ausgewogene Bewertung zu erreichen. Die Optimierung wird standortspezifisch durchgeführt. Das detaillierte Vorgehen wird bei der Umsetzung in Kap. 4.2 beschrieben. In jedem Fall muss die Optimierungsanforderung an den Indikator 'Platzangebot untertags' unter Berücksichtigung der erforderlichen Platz-Reserven erfüllt sein. Diese ist standortspezifisch, um auch in den geologischen Standortgebieten mit einer höheren Dichte an Störungszonen und bei ungünstigen gebirgsmechanischen Bedingungen ausreichende Reserven im Platzangebot zu gewährleisten. Für die Optimierung ist deshalb das Platzangebot im bevorzugten Tiefenbereich von grosser Bedeutung, was dementsprechend in der Bewertung berücksichtigt wird.

Zur Untersuchung der Sensitivität der Entscheide bezüglich der verschiedenen Optimierungsmöglichkeiten werden für jedes geologische Standortgebiet mehrere Lagerperimeter (getrennt für das SMA-Lager und das HAA-Lager) abgegrenzt, wobei der als "massgebender Lagerperimeter für die Einengung" (abgekürzt: mLE) bezeichnete Lagerperimeter den Ausgangspunkt für die Bewertung bildet. Die anderen zur Berücksichtigung alternativer Konzeptualisierungen und/oder alternativer Optimierungsanforderungen abgegrenzten Lagerperimeter werden für die Untersuchung der Sensitivität und Robustheit verwendet und werden bei Bedarf punktuell auch bei der Entscheidungsfindung berücksichtigt.

Weiter wird auch die Ungewissheit in der Tiefenlage der Wirtgesteine untersucht, indem Lagerperimeter für eine tiefere und eine untiefere Lage des Wirtgesteins abgegrenzt und die Änderungen in der Bewertung untersucht werden.

Die Lage, Geometrie und Grösse der abgegrenzten Lagerperimeter zeigen auch, ob ein Kombilager in Frage kommt. Falls die Optimierung der Lagerperimeter für das SMA- und das HAA-Lager zu einer Situation führt, wo ohne wesentliche Kompromisse bei der Abgrenzung für beide Lagertypen geeignete Lagerperimeter angeordnet werden können, dann kann das Standortgebiet für ein Kombilager vorgemerkt werden.

Tab. 2.3-6: Indikatoren zur Tiefenlage und ihre funktionale Bedeutung bei der Optimierung der Lagerperimeter für das Beispiel des Opalinustons.

- 1) In Etappe 2 wird neu die in Klammern aufgeführte Definition des Bezugshorizonts verwendet.
- 2) In Etappe 1 wurde die flächenhafte Erosion mit dem Indikator 'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf flächenhafte Erosion' erfasst; dieser Indikator wird in Etappe 2 nicht mehr verwendet. Stattdessen wird die flächenhafte Erosion in Etappe 2 neu beim Indikator 'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteins-Dekompaktion' berücksichtigt.
- 3) Übertiefte Felsrinnen sind in Etappe 2 neu definiert: Eine übertiefte Felsrinne besteht dann, wenn die Felsoberfläche mehr als 50 m unter der lokalen Erosionsbasis liegt. Zur so abgegrenzten Fläche wird lateral ein 200 m breiter Randstreifen hinzugefügt.

Indikator	Bezugshorizont	Einheit	Funktionale Bedeutung
'Tiefenlage unter lokaler Erosionsbasis im Hinblick auf die Bildung neuer Rinnen'	Top Opalinuston (100 m über Basis OPA) ¹⁾	[m unter lokaler Erosionsbasis]	Berücksichtigung der Bildung von Durchbruchrinnen und deren Übertiefung durch glaziale Tiefenerosion
'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteins-Dekompaktion'		[m unter Terrain]	Berücksichtigung der Gesteins-Dekompaktion und flächenhaften Erosion ²⁾
'Tiefenlage unter Fels im Hinblick auf glaziale Tiefenerosion'		[m unter lokaler Erosionsbasis]	Berücksichtigung der glazialen Tiefenerosion in bestehenden übertieften Felsrinnen ³⁾
'Tiefenlage im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit (u.B. Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften)'	Lagerebene (50 m über Basis OPA) ¹⁾	[m unter Terrain]	Berücksichtigung der bautechnischen Machbarkeit

2.3.4 Vorgehen bei der Prüfung der sicherheitstechnischen Eignung und Gleichwertigkeit der geologischen Standortgebiete

Das vorliegende Kapitel erläutert das Vorgehen bei der Prüfung mittels Dosisberechnungen, ob die geologischen Standortgebiete bzw. ihre zugehörigen Lagerperimeter sicherheitstechnisch geeignet und gleichwertig sind. Ausgangspunkt für diesen Schritt sind die geologischen Standortgebiete mit ihren prioritären Wirtgesteinen und die zugehörigen optimierten untertägigen Lagerperimeter, die gemäss den vorhergehenden Schritten je für das SMA-, HAA- und das Kombilager festgelegt wurden. Das Vorgehen bei dieser Prüfung umfasst die nachfolgend beschriebenen Arbeitsschritte.

Festlegung der für die provisorischen Sicherheitsanalysen relevanten Prozesse und Parameter

In Nagra (2010) wurde dargelegt, welche Prozesse und Parameter für die Sicherheit und technische Machbarkeit in Etappe 2 relevant sind. Dazu wurde auf die in Etappe 1 in Zusammenhang mit der Ableitung der Anforderungen an die Geologie gemachten Arbeiten zurückgegriffen, insbesondere die generelle Beschreibung des Barrieren- und Sicherheitskonzepts und die für die Gewährleistung der Sicherheit und technischen Machbarkeit relevanten Sicherheitsfunktionen und übergeordneten Prinzipien (Nagra 2008d). Diese bildeten in Etappe 1 den Ausgangspunkt für die Ableitung der Indikatoren, die bei der schrittweisen Festlegung und Bewertung der geologischen Standortgebiete verwendet wurden. Die Ableitung in Nagra (2008d) erfolgte über verschiedene Schritte; die dabei erarbeiteten Zwischenresultate (insbesondere Tabelle 5.3-1 in Nagra 2008d) sowie die Beschreibung des Barrieren- und Sicherheitskonzepts bildeten auch eine geeignete Basis für die Ableitung der relevanten Prozesse und Parameter in Nagra (2010).

In seiner Stellungnahme zu Nagra (2010) hat das ENSI dieses Vorgehen als geeignet eingestuft, um die Vergleichbarkeit der Aussagen in den weiteren Etappen des SGT zu ermöglichen (ENSI 2011). Das ENSI kommt zum Schluss, "... dass die Nagra die relevanten Prozesse und Parameter nachvollziehbar und stufengerecht abgeleitet hat" und dass die Auswahl "... konzeptuell ausreichend [ist], um die für Etappe 2 SGT vorgesehenen provisorischen Sicherheitsanalysen durchführen zu können und zu belastbaren Aussagen zu kommen".

Die relevanten Prozesse und Parameter und die dazu gehörenden Ungewissheiten bzw. der vorhandene Kenntnisstand werden bei der Ableitung der Rechenfälle im Hinblick auf die Berechnung der charakteristischen Dosisintervalle für die verschiedenen geologischen Standortgebiete berücksichtigt.

Darlegung des Kenntnisstands zu den relevanten Prozessen und Parametern

Anhand der relevanten Prozesse und Parameter wird auch in Etappe 2 dargelegt, welche Kenntnisse über die technischen und geologischen Barrieren vorliegen. Nagra (2014a, b) enthalten eine zusammenfassende Darlegung des Kenntnisstands, einschliesslich der vorhandenen Variabilitäten und Ungewissheiten in den Daten. Eine Beschreibung der standortspezifischen Kenntnisse über die geologischen Barrieren ist in Nagra (2014b) zu finden.

Festlegung von Rechenfällen für die Dosisberechnungen

Die sicherheitstechnische Eignung der geologischen Tiefenlager wird anhand von Dosisberechnungen quantitativ untersucht. Gemäss den Vorgaben in ENSI (2010a) umfasst dies standortspezifische Dosisberechnungen für einen Referenzfall und für spezifische weitere Rechenfälle. Die Konzeptualisierung und Parametrisierung der Rechenfälle erfolgt so, dass die standortspezifischen Bedingungen bezüglich der geologischen Barrierenwirkung (inkl. bestehende Variabilität und Ungewissheiten) adäquat abgebildet werden.

Zur Erfassung der konzeptuellen Ungewissheiten werden für jedes Standortgebiet geologische Konzeptbilder der Gesteinsprofile im einschlusswirksamen Gebirgsbereich erstellt zur Ableitung einer Referenz-Konzeptualisierung und alternativer Konzeptualisierungen (analoges Vorgehen wie bei der Auswahl von prioritären Wirtgesteinen in Kap. 2.3.2). Diese unterscheiden sich primär in den konzeptuellen Annahmen zu den hydrogeologischen Eigenschaften von lithofaziellen Einheiten mit durchschnittlichem Tonmineralgehalt < 20 Gew.-% ("harte Bänke"), bei denen nicht ausgeschlossen werden kann, dass sie eine erhöhte Wasserführung aufweisen

und deshalb als laterale Transportpfade zu einer verringerten Barrierenwirkung der Wirt- bzw. Rahmengesteine führen können. Teilweise werden auch alternative Annahmen generell zur Barrierenwirkung der Rahmengesteine verwendet. Relevante Parameter-Ungewissheiten werden zusätzlich mit Parametervariationen erfasst (Referenzwerte, ungünstige/günstige Eckwerte).

Ermittlung der charakteristischen Dosisintervalle

Auf der Grundlage der obigen Punkte wird für jedes geologische Standortgebiet ein charakteristisches Dosisintervall zur Prüfung der sicherheitstechnischen Eignung und Gleichwertigkeit ermittelt. Ein geologisches Standortgebiet gilt als sicherheitstechnisch ungeeignet und wird ausgeschlossen, falls der obere Rand seines charakteristischen Dosisintervalls über dem Schutzkriterium von 0.1 mSv/a gemäss Richtlinie ENSI-G03 (ENSI 2009) liegt. Die Prüfung der sicherheitstechnischen Gleichwertigkeit erfolgt anhand des Vergleichs der charakteristischen Dosisintervalle mit der Schwelle zur Optimierung gemäss Strahlenschutzverordnung (0.01 mSv/a); demnach wird ein Standortgebiet zurückgestellt, falls der obere Rand seines Dosisintervalls über dieser Schwelle liegt und sein Dosisintervall nicht mit dem niedrigsten Dosisintervall der anderen Standortgebiete überlappt.

Das Vorgehen und die Umsetzung dieser Arbeitsschritte werden in Nagra (2014a) detailliert erläutert. In Kap. 4.3 des vorliegenden Berichts werden die Resultate der Dosisberechnungen (charakteristische Dosisintervalle und deren Bewertung) zusammengefasst.

2.3.5 Vorgehen bei der qualitativen Bewertung der geologischen Standortgebiete

Die Charakterisierung und die qualitative Bewertung der geologischen Standortgebiete und der zugehörigen Lagerperimeter erfolgen primär für den für die Einengung massgebenden Fall, die Belastbarkeit bzw. die Sensitivität der Abgrenzung der Lagerperimeter und die Ergebnisse der Bewertung wird anhand der alternativen Konzeptualisierungen und Parameter-Bandbreiten überprüft und die alternativen Bewertungen fliessen bei Bedarf in den Einengungsentscheid ein.

Dazu werden zunächst die Lagerperimeter bezüglich der 4 Kriteriengruppen und 13 Kriterien gemäss SGT Tab. 1 (BFE 2008) unter Verwendung der zugehörigen Indikatoren charakterisiert und danach bewertet. Die folgenden fünf Indikatoren werden im Unterschied zu Etappe 1 nicht mehr verwendet:

- 'Laterale Ausdehnung': Dieser Indikator wurde in Etappe 1 nur bei der Bewertung der geologisch-tektonischen Grossräume benutzt; bei der Bewertung der bevorzugten Bereiche und geologischen Standortgebiete wurde er durch den Indikator 'Platzangebot untertags' ersetzt unter Berücksichtigung der minimal erforderlichen Breite des Lagerperimeters. In Etappe 2 wird nur der Indikator 'Platzangebot untertags' verwendet.
- 'Modellvorstellungen zu geochemischen Vorgängen': Dieser Indikator wurde in Etappe 1 nur für die Beschreibung der geologisch-tektonischen Grossräume verwendet. In Etappe 2 gelangt er nicht mehr zur Anwendung.

- 'Seltene geologische Ereignisse (Vulkanismus)': Dieser Indikator ist für die Bewertung der in Etappe 1 bezeichneten geologischen Standortgebiete nicht relevant und wird deswegen in Etappe 2 nicht mehr verwendet⁴². Damit wird einem Hinweis des ENSI Rechnung getragen (ENSI 2010b).
- 'Regionales Störungsmuster und Lagerungsverhältnisse': Dieser Indikator wurde in Etappe 1 nur bei der Evaluation der geologisch-tektonischen Grossräume benutzt. Er gelangt in Etappe 2 nicht mehr zur Anwendung.
- 'Kontinuität der interessierenden Schichten': Weil die Explorierbarkeit in Etappe 2 anhand der vorhandenen Seismik detaillierter untersucht wird als in Etappe 1, verliert der Indikator seine Bedeutung und wird in Etappe 2 nicht mehr verwendet.

Somit werden in Etappe 2 für die Bewertung noch 40 Indikatoren berücksichtigt (vgl. Tab. 2.3-2 und Tab. 2.3-7).

Die qualitativen Bewertungen werden auf Stufe der Indikatoren vorgenommen und dann schrittweise auf die Stufen der Kriterien, der Kriteriengruppen und der Gesamtbewertung aggregiert. Daraus ergibt sich für jedes geologische Standortgebiet eine hierarchisch strukturierte Liste von qualitativen Bewertungen (vgl. Fig. 2.3-3). Geologische Standortgebiete, bei welchen die Gesamtbewertung des zugehörigen Lagerperimeters unter Berücksichtigung aller Kriterien nicht mindestens die Bewertung "geeignet" erzielt, werden zurückgestellt.

⁴² Der Indikator ist als solcher relevant, trägt aber zur Differenzierung zwischen den in Etappe 1 festgelegten Standortgebieten und damit zum Einengungsentscheid in Etappe 2 nicht bei.

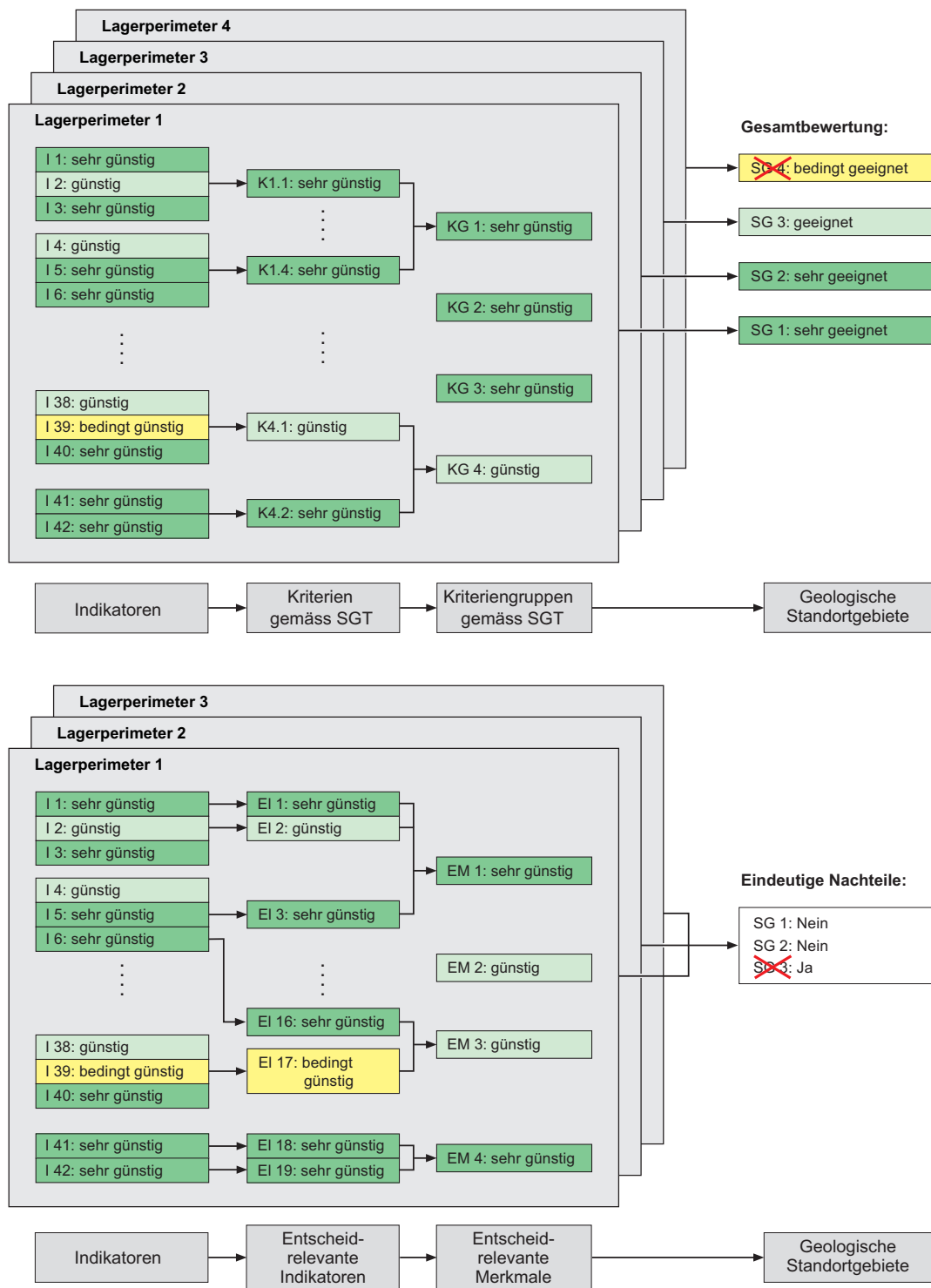


Fig. 2.3-3: Vorgehen bei der Aggregation der qualitativen Bewertungen aller Indikatoren zur Gesamtbewertung (oben) bzw. der entscheidrelevanten Indikatoren zu den entscheidrelevanten Merkmale zur Identifikation eindeutiger Nachteile der geologischen Standortgebiete bzw. der zugehörigen Lagerperimeter (unten).

Geologische Standortgebiete, welche bei der qualitativen Bewertung unter Berücksichtigung aller Kriterien und Indikatoren gesamthhaft nicht mindestens die Bewertung "geeignet" erhalten, und solche, welche eindeutige Nachteile aufweisen, werden zurückgestellt.

Tab. 2.3-7: Verwendete Indikatoren für die qualitative Bewertung der geologischen Standortgebiete bzw. der zugehörigen Lagerperimeter in Etappe 2.

In der letzten Spalte wird aufgezeigt, welche der für die qualitative Bewertung verwendeten Indikatoren (I) als entscheidrelevante Indikatoren (EI) eingestuft werden. Anhand dieser Indikatoren werden im direkten Vergleich eindeutige Nachteile der einzelnen geologischen Standortgebiete identifiziert (vgl. auch Tab. 2.3-2).

- ¹⁾ In dieser Spalte wird präzisiert, auf welchen Teil des Wirtgesteins (WG) bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (EG) sowie des Lagerperimeters (LP) sich die Bewertung bezieht. Als Wirtgestein *sensu stricto* (WG-ss) wird eine tonmineralreiche Gesteinsabfolge mit genügender Mächtigkeit innerhalb des Wirtgesteins bezeichnet, in der die Lagerkammern angeordnet werden. Bei den mit LPmin/LPmax gekennzeichneten Indikatoren bezieht sich die Bewertung auf den ungünstigsten Punkt innerhalb des Lagerperimeters.
- ²⁾ Vorgehen analog wie in SGT-E1, jedoch unter Verwendung neuer Daten und Erkenntnisse aus SGT-E2.
- ³⁾ Entscheidrelevante Indikatoren zur Identifikation eindeutiger Nachteile der Standortgebiete bzw. der zugehörigen Lagerperimeter.
- (×) Bewertung nur für HAA-Lager.
- * Gegenüber der Wirtgesteinsbewertung (Tab. 2.3-3) werden hier auch konfigurationsspezifische Aspekte mitberücksichtigt.
- + Hier werden auch die Resultate der Dosisberechnungen berücksichtigt.
- o Hier werden auch die Resultate der bautechnischen Risikoanalyse berücksichtigt.

Nr.	Kriteriengruppe / Kriterium / Indikator (Nr. gemäss Tabelle 2.5-3 in Nagra 2008b)	Präzisierung Bewertungs- objekt ¹⁾	Bewertung Standortgebiet bzw. Lagerperimeter	
			I ²⁾	EI ³⁾
1	Kriteriengruppe 'Eigenschaften des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs'			
1.1	Kriterium 'Räumliche Ausdehnung'			
5	Mächtigkeit ⁺	EG/LPmin	×	×
8	Platzangebot untertags	LP	×	×
1.2	Kriterium 'Hydraulische Barrierenwirkung'			
9	Hydraulische Durchlässigkeit ⁺⁺	WG-ss/LP	×	×
2	Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteins-Dekompaktion	EG/LPmin	×	×
10	Grundwasserstockwerke	EG/LP	×	
1.3	Kriterium 'Geochemische Bedingungen'			
11	Mineralogie	WG-ss/LP	×	
12	pH	WG-ss/LP	×	
13	Redox-Bedingungen	WG-ss/LP	×	
14	Salinität	WG-ss/LP	×	
15	Mikrobielle Prozesse	WG-ss/LP	×	
16	Kolloide	WG-ss/LP	×	×
1.4	Kriterium 'Freisetzungspfade'			
17	Art der Transportpfade und Ausbildung des Porenraums ⁺	WG-ss/LP	×	×
20	Transmissivität präferenzialer Freisetzungspfade ⁺	WG-ss/LP	×	×
22	Selbstabdichtungsvermögen	WG-ss/LP	×	×
18	Homogenität des Gesteinsaufbaus	WG/LP	×	×
19	Länge der massgebenden Freisetzungspfade ⁺	WG-ss/LP	×	×

Tab. 2.3-7: (Fortsetzung)

Nr.	Kriteriengruppe / Kriterium / Indikator (Nr. gemäss Tabelle 2.5-3 in Nagra 2008b)	Präzisierung Bewertungs- objekt ¹⁾	Bewertung Standortgebiet bzw. Lagerperimeter	
			I ²⁾	EI ³⁾
2	Kriteriengruppe 'Langzeitstabilität'			
2.1	Kriterium 'Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften'			
23	Modellvorstellungen zur Langzeitentwicklung (Geodynamik und Neotektonik; weitere Prozesse)	EG/LP	×	×
24	Seismizität	EG/LP	×	×
27	Potenzial zur Bildung neuer Wasserwegsamkeiten (Verkarstung) *	WG/LP	×	×
2.2	Kriterium 'Erosion'			
28	Erosion im Betrachtungszeitraum	EG/LP	×	×
3	Tiefenlage unter lokaler Erosionsbasis im Hinblick auf die Bildung neuer Rinnen	EG/LPmin	×	×
4	Tiefenlage unter Fels im Hinblick auf glaziale Tiefenerosion	EG/LPmin	×	×
2.3	Kriterium 'Lagerbedingte Einflüsse'			
29	Auflockerungszone im Nahbereich der Untertagebauten	WG-ss/LP	×	
30	Chemische Wechselwirkungen	WG-ss/LP	×	
31	Verhalten des Wirtgesteins bezüglich Gas	WG-ss/LP	×	
32	Verhalten des Wirtgesteins bezüglich Temperatur	WG-ss/LP	(×)	
2.4	Kriterium 'Nutzungskonflikte'			
33	Rohstoffvorkommen innerhalb des Wirtgesteins	WG/LP	×	
34	Rohstoffvorkommen unterhalb des Wirtgesteins	EG/LP	×	
35	Rohstoffvorkommen oberhalb des Wirtgesteins	EG/LP	×	
36	Mineral- und Thermalwassernutzungen	EG/LP	×	
37	Geothermie und weitere energiebezogene Nutzungen des Untergrunds	EG/LP	×	
3	Kriteriengruppe 'Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen'			
3.1	Kriterium 'Charakterisierbarkeit der Gesteine'			
39	Variabilität der Gesteinseigenschaften im Hinblick auf ihre Charakterisierbarkeit	WG-ss/LP	×	×
40	Erfahrungen	WG/LP	×	
3.2	Kriterium 'Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse'			
43	Explorationsverhältnisse im geologischen Untergrund *	WG/LP	×	×
44	Explorationsbedingungen an Oberfläche	LP	×	
3.3	Kriterium 'Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen'			
23	Modellvorstellungen zur Langzeitentwicklung (Geodynamik und Neotektonik; weitere Prozesse)	EG/LP	×	×
46	Unabhängige Evidenzen der Langzeitisolation	WG/LP	×	

Tab. 2.3-7: (Fortsetzung)

Nr.	Kriteriengruppe / Kriterium / Indikator (Nr. gemäss Tabelle 2.5-3 in Nagra 2008b)	Präzisierung Bewertungs- objekt ¹⁾	Bewertung Standortgebiet bzw. Lagerperimeter	
			I ²⁾	EI ³⁾
4	Kriteriengruppe 'Bautechnische Eignung'			
4.1	Kriterium 'Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen'			
47	Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften *	WG-ss/LP	×	
1	Tiefenlage im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit (u.B. Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften)	WG-ss/ LPmax	×	×
4.2	Kriterium 'Untertägige Erschliessung und Wasserhaltung'			
48	Geotechnische und hydrogeologische Verhältnisse in überlagernden Gesteinsformationen °	EG/LP	×	×
49	Natürliche Gasführung (im Wirtgestein)	WG/LP	×	

2.3.6 Vorgehen bei der vergleichenden Gesamtbewertung und beim sicherheitstechnischen Vergleich

Im fünften und letzten Schritt des Verfahrens erfolgt eine Einengung der geologischen Standortgebiete, d.h. Standortgebiete werden als Ganzes für die weiteren Untersuchungen für Etappe 3 ausgewählt oder zurückgestellt. Dieser Schritt umfasst zwei Teile: 1) die Identifikation eindeutiger Nachteile der geologischen Standortgebiete, und 2) die vergleichende Gesamtbewertung unter Berücksichtigung aller Informationen⁴³ und den sicherheitstechnischen Vergleich der geologischen Standortgebiete, verstanden als Synthese, in welcher die verschiedenen Teilergebnisse zusammenfliessen und zu einer Entscheidung verdichtet werden. Diese Auswertungen erfolgen primär für den für die Einengung massgebenden Fall. Die Bedeutung der Ungewissheiten für die Belastbarkeit bzw. die Sensitivität der Abgrenzung der Lagerperimeter und der Ergebnisse der Bewertung wird anhand der alternativen Konzeptualisierungen und Parametervariationen untersucht; diese alternativen Bewertungen können in begründeten Fällen in den Einengungsentscheid einfließen.

Ausgangspunkt sind die geologischen Standortgebiete bzw. die zugehörigen Lagerperimeter für das SMA- und das HAA-Lager, welche alle Anforderungen gemäss Kap. 2.3.4 (Dosisintervalle) und Kap. 2.3.5 (Gesamtbewertung unter Berücksichtigung aller Kriterien) erfüllen.

Die Identifikation eindeutiger Nachteile erfolgt anhand der vom ENSI (2013a) vorgegebenen entscheiderelevanten Merkmale und der zugehörigen entscheiderelevanten Indikatoren (vgl. Kap. 2.3.1 und Tab. 2.3-8). Dazu wird für die entscheiderelevanten Merkmale eine Bewertung der geologischen Standortgebiete bzw. der zugehörigen Lagerperimeter durchgeführt. Das geschieht durch Aggregation der Bewertungen der zugehörigen entscheiderelevanten Indikatoren, wobei diese Bewertungen unverändert aus der qualitativen Bewertung übernommen werden. Der Unterschied zur qualitativen Bewertung der Lagerperimeter besteht darin, dass einerseits bei der Bewertung nicht der umfangreiche Satz von 40 Indikatoren berücksichtigt wird, sondern lediglich eine Teilmenge von 20 entscheiderelevanten Indikatoren von übergeordneter Bedeutung, und dass andererseits die Bewertungen für diese Indikatoren zu entscheidere-

⁴³ Diese vergleichende Gesamtbewertung ist zu unterscheiden von der Gesamtbewertung unter Berücksichtigung aller Kriterien gemäss Kap. 2.3.2 und 2.3.5, welche sich ausschliesslich auf die qualitative Bewertung bezieht.

vanten Merkmalen aggregiert werden (vgl. Fig. 2.3-3). Dabei gelangen zwei unterschiedliche Aggregationsmethoden zum Einsatz (vgl. Tab. 2.3-8 und Anhang D)⁴⁴. Die Zuordnung dieser Indikatoren zu den entscheiderelevanten Merkmalen ist aus Tab. 2.3-1 und 2.3-8 ersichtlich. Aufgrund seiner grossen Bedeutung für die Barrierenwirksamkeit und für die Langzeitstabilität wird der Indikator 'Selbstabdichtungsvermögen' bei zwei Merkmalen als entscheiderelevant zugeordnet. Dadurch erhält dieser Indikator ein grösseres Gewicht.

Für den Vergleich der geologischen Standortgebiete bezüglich der entscheiderelevanten Merkmale bzw. Indikatoren werden drei verschiedene Verfahren verwendet, welche die eindeutigen Nachteile der jeweiligen Lagerperimeter quantitativ erfassen und welche sich im Vergleich mit der qualitativen Bewertung durch einen geringeren Kompensationsgrad bei der Aggregation der Bewertungen auszeichnen (direkter Vergleich der Bewertung der entscheiderelevanten Merkmale und Indikatoren; 'Outranking' – paarweiser Vergleich der Lagerperimeter; 'Malus-Bilanzierung' – Vergleich der Lagerperimeter-Bewertungen mit Schwellenwerten, vgl. Anhang D)⁴⁵. Dieser Vergleich wird verwendet, um eindeutige Nachteile der geologischen Standortgebiete je für das SMA- und das HAA-Lager zu identifizieren.

Im zweiten Teil von Schritt 5, der vergleichenden Gesamtbewertung und dem sicherheitstechnischen Vergleich der geologischen Standortgebiete, handelt es sich um eine Zusammenstellung und zusammenfassende Auswertung aller Ergebnisse, mit dem Ziel, die geologischen Standortgebiete zu identifizieren, die für die weiteren Untersuchungen für Etappe 3 vorzusehen sind. Zu diesem Zweck werden zuerst alle bisherigen Ergebnisse zusammengezogen. Anschliessend wird die vergleichende Gesamtbewertung durchgeführt, d.h. die Ergebnisse aller Bewertungsschritte werden hinsichtlich der Frage ausgewertet, welche geologischen Standortgebiete in der Gesamtschau gegenüber den geeignetsten Standortgebieten eindeutige Nachteile aufweisen und deshalb zurückgestellt werden. Der Informationsfluss unter Berücksichtigung der Bewertungsschritte ist in Fig. 2.3-4 schematisch dargestellt.

Die vergleichende Gesamtbewertung beinhaltet neben der quantitativen auch eine stark argumentative Komponente, denn es wird vom Grundsatz ausgegangen, dass ein weitreichender Entscheid wie im vorliegenden Fall durch eine Argumentationslinie abzustützen ist, wo der plausiblen und nachvollziehbaren Darstellung der geologischen Argumente für die Vor- bzw. Nachteile ein hoher Stellenwert zukommt. Dabei werden auch die von der KNS und AG SiKa/KES aufgebrachten und auch in ENSI (2013b) aufgeführten Fragen und Hinweise berücksichtigt.

Das Resultat der Arbeiten ist eine Liste der geologischen Standortgebiete für das SMA- und das HAA-Lager, die für die weiteren Untersuchungen für Etappe 3 vorgeschlagen werden. Die Umsetzung dieses Schritts erfolgt in Kap. 5. Falls in einem Standortgebiet die Lagerperimeter für das SMA- und das HAA-Lager ohne signifikante Abstriche bei der Optimierung angeordnet werden können, kann das Standortgebiet auch für ein Kombilager vorgemerkt werden.

⁴⁴ i) Arithmetische Mittelung mit Gleichgewichtung der Indikatoren pro Merkmal: Damit wird innerhalb eines Merkmals eine Kompensation zugelassen, d.h. eine schlechte Bewertung kann durch eine gute Bewertung innerhalb des gleichen Merkmals kompensiert werden. ii) Minimum der Bewertungen aller Indikatoren pro Merkmal: Damit wird innerhalb eines Merkmals keinerlei Kompensation zugelassen, d.h. eine schlechte Bewertung kann nicht durch eine gute Bewertung innerhalb des gleichen Merkmals kompensiert werden. Damit wird der unterschiedlichen Bedeutung der Indikatoren bzgl. der entscheiderelevanten Merkmale differenziert Rechnung getragen.

⁴⁵ Bei der Festlegung der eindeutigen Nachteile wird dem 'direkten Vergleich der Bewertungen' die höchste Bedeutung gegeben; das 'Outranking' und die 'Malus-Bilanzierung' werden verwendet, um allenfalls vorhandene zusätzliche Hinweise auf eindeutige Nachteile zu identifizieren (Hinweise auf zu prüfende Nachteile).

Tab. 2.3-8: Entscheidrelevante Merkmale und Indikatoren für die Identifikation eindeutiger Nachteile der geologischen Standortgebiete bzw. der zugehörigen Lagerperimeter.

Erläuterungen zur Aggregationsmethode (Mittelwert bzw. Minimum) finden sich im Text.

Nr.	Entscheidrelevante Merkmale (EM) (gemäss Vorgabe des ENSI, vgl. Tab. 2.1-5) Entscheidrelevante Indikatoren (EI) (gemäss Tab. 2.3-2)	Aggregationsmethode
a)	EM 'Wirksamkeit der geologischen Barriere'	Mittelwert
9	Hydraulische Durchlässigkeit	
20	Transmissivität präferenzieller Freisetzungspfade	
22	Selbstabdichtungsvermögen	
18	Homogenität des Gesteinsaufbaus	
17	Art der Transportpfade und Ausbildung des Porenraums	
5	Mächtigkeit	
19	Länge der massgebenden Freisetzungspfade	
16	Kolloide	
b)	EM 'Langzeitstabilität der geologischen Barriere'	Minimum
23	Modellvorstellungen zur Langzeitentwicklung (Geodynamik und Neotektonik; weitere Prozesse)	
22	Selbstabdichtungsvermögen	
27	Potenzial zur Bildung neuer Wasserwegsamkeiten (Verkarstung)	
28	Erosion im Betrachtungszeitraum	
2	Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteins-Dekompaktion	
3	Tiefenlage unter lokaler Erosionsbasis im Hinblick auf die Bildung neuer Rinnen	
4	Tiefenlage unter Fels im Hinblick auf glaziale Tiefenerosion	
24	Seismizität	
c)	EM 'Explorier- und Charakterisierbarkeit der geologischen Barriere im Standortgebiet'	Mittelwert
39	Variabilität der Gesteinseigenschaften im Hinblick auf ihre Charakterisierbarkeit	
43	Explorationsverhältnisse im geologischen Untergrund	
d)	EM 'Bautechnische Machbarkeit eines Tiefenlagers unter Berücksichtigung der vorgeschlagenen Standortareale'	Minimum
1	Tiefenlage im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit (u.B. Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften)	
48	Geotechnische und hydrogeologische Verhältnisse in überlagernden Gesteinsformationen	
8	Platzangebot untertags	

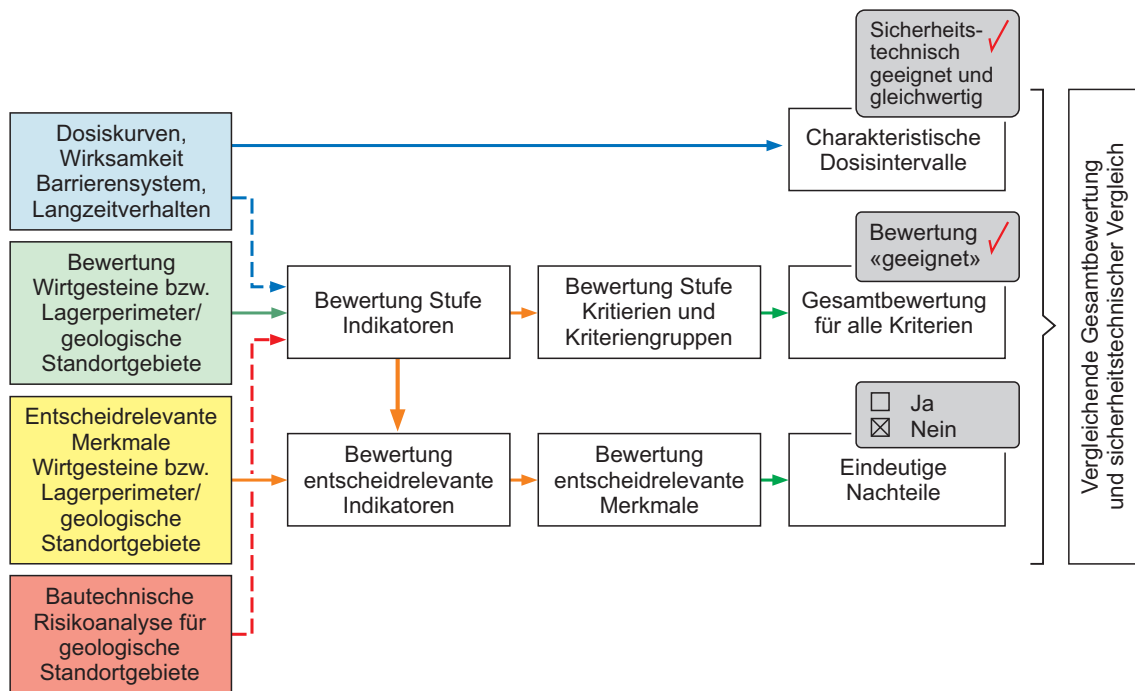


Fig. 2.3-4: Schematische Darstellung des Vorgehens bei der vergleichenden Gesamtbewertung unter Berücksichtigung aller Informationen.

2.3.7 Zusammenfassende Darstellung des Verfahrens

Eine zusammenfassende Darstellung des Verfahrens für den sicherheitstechnischen Vergleich findet sich in Fig. 2.3-5. Die Erarbeitung der Vorschläge erfolgt in fünf Schritten:

- Im *ersten Schritt* wird die in Etappe 1 verwendete Methodik (A) an die veränderten Rahmenbedingungen angepasst. Dazu werden die Vorgaben des Sachplans und des ENSI und Behördenkommentare zu Etappe 1 und die Erkenntnisse der Nagra aus Etappe 1 berücksichtigt (B). Weiter werden die spezifischen Eigenschaften der in Etappe 1 festgelegten Wirtgesteine und geologischen Standortgebiete (C) bei der in Etappe 2 zu verwendenden Methodik berücksichtigt (D). Daraus resultieren die in Etappe 2 zu verwendende Methodik sowie deren Parametrisierung (E).

Wichtiges Element der Methodik für Etappe 2 ist der Optimierungsgedanke: Um die Vorschläge gemäss Etappe 1 möglichst gut zu nutzen, erfolgt eine dreistufige Optimierung: Festlegung der prioritären Wirtgesteine in Standortgebieten mit mehr als einem Wirtgestein (H), Abgrenzung von optimierten Lagerperimetern innerhalb der geologischen Standortgebiete (I), Zurückstellen von geologischen Standortgebieten mit eindeutigen Nachteilen (K). Weiter wird der Berücksichtigung von Ungewissheiten ein grosses Gewicht gegeben, indem diese systematisch anhand von Alternativen untersucht werden.

- Im *zweiten Schritt* wird in den Standortgebieten für das SMA-Lager mit mehr als einem Wirtgestein das prioritäre Wirtgestein festgelegt, welches für die weiteren Schritte verwendet wird. Für das HAA-Lager entfällt dieser Schritt; in Etappe 1 wurde bereits der Opalinuston als Wirtgestein festgelegt.

Ausgangspunkt bilden die in Etappe 1 festgelegten Wirtgesteine (C), für welche seit Abschluss von Etappe 1 systematisch weitere Informationen beschafft wurden (G). Die Festlegung der prioritären Wirtgesteine erfolgt anhand von Dosisberechnungen, einer qualitativen Bewertung und der Identifikation eindeutiger Nachteile beim sicherheitstechnischen Vergleich (H). Bei der Festlegung der prioritären Wirtgesteine wird auch der Einfluss möglicher Ungewissheiten berücksichtigt.

- Im *dritten Schritt* wird innerhalb der in Etappe 1 festgelegten Standortgebiete eine optimierte räumliche Konfiguration der prioritären Wirtgesteine ausgewählt (Abgrenzung von optimierten Lagerperimetern).

Ausgangspunkt bilden die in Etappe 1 festgelegten Standortgebiete (C), für welche seit Abschluss von Etappe 1 systematisch weitere Informationen beschafft wurden (G). Die Abgrenzung erfolgt so, dass die resultierenden Lagerperimeter bezüglich ihrer sicherheitstechnischen Eigenschaften möglichst günstig sind und genügend Platz bieten (I). Zur Berücksichtigung von Ungewissheiten und alternativen Optimierungsmöglichkeiten werden neben dem für die Einengung massgebenden Lagerperimeter (mLE) alternative Lagerperimeter abgegrenzt.

- Im *vierten Schritt* erfolgt eine Prüfung der sicherheitstechnischen Eignung der geologischen Standortgebiete bzw. der zugehörigen Lagerperimeter, einerseits anhand von Dosisberechnungen (charakteristische Dosisintervalle) und andererseits durch eine qualitative Bewertung anhand der Kriterien zur Sicherheit und technischen Machbarkeit gemäss SGT (J).

Die Prüfung berücksichtigt die vorhandenen Ungewissheiten und betrachtet dazu entsprechende Alternativen bei den Dosisberechnungen und der qualitativen Bewertung.

- Im *fünften Schritt* erfolgt der sicherheitstechnische Vergleich und die vergleichende Gesamtbewertung der geologischen Standortgebiete bzw. der zugehörigen Lagerperimeter und berücksichtigt zusätzlich zu den Resultaten der Dosisberechnungen und der qualitativen Bewertung auch die vom ENSI festgelegten entscheiderelevanten Merkmale zur Identifikation der geologischen Standortgebiete mit eindeutigen Nachteilen. Daraus resultiert der Vorschlag für die in Etappe 3 weiter zu betrachtenden Standortgebiete (K).

Auch in diesem Schritt werden die Ungewissheiten durch Betrachtungen von Alternativen berücksichtigt.

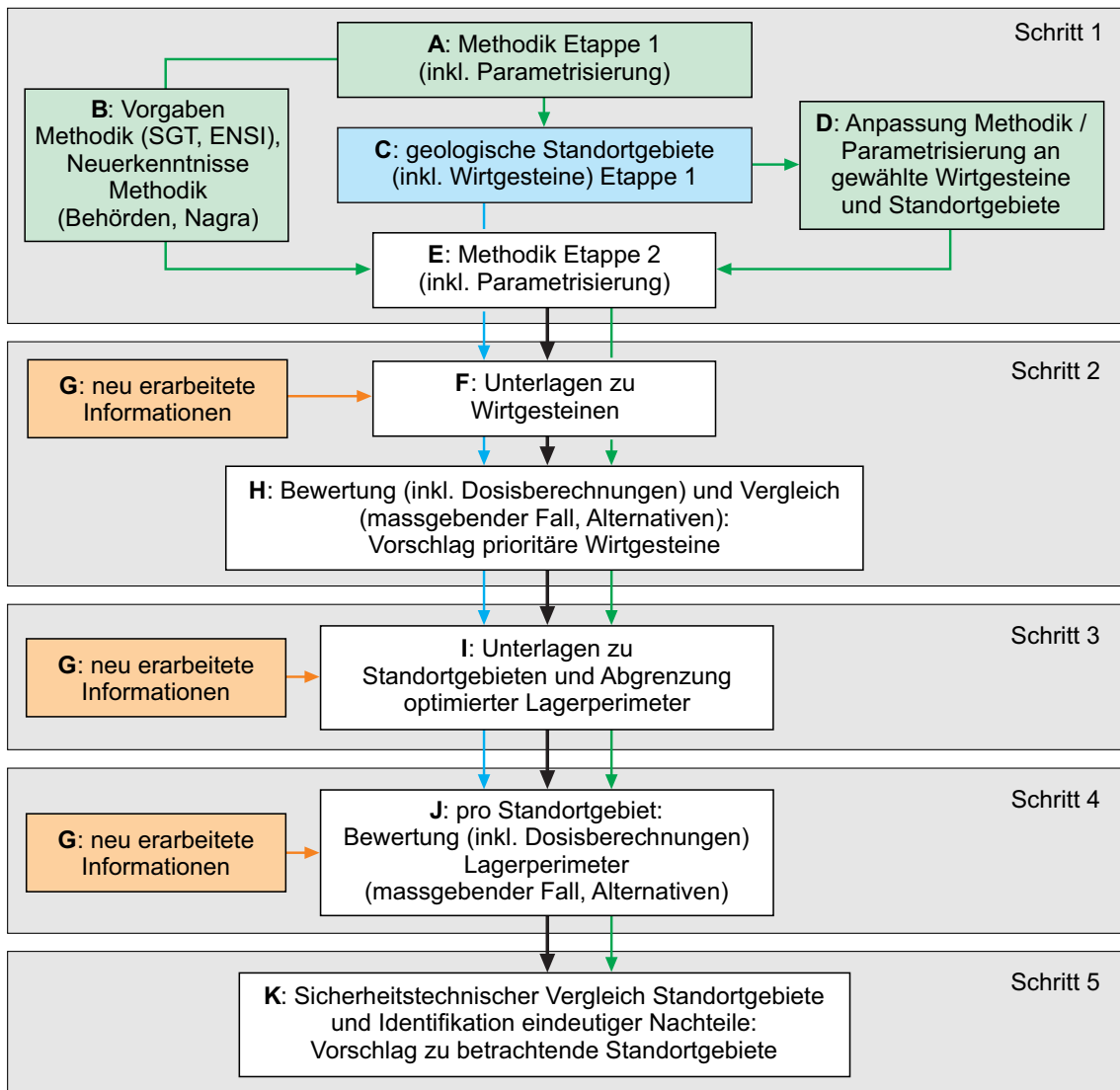


Fig. 2.3-5: Schematische Darstellung des gesamten Verfahrens in 5 Schritten.

Vergleiche dazu die Beschreibung im vorangehenden Text.

3 Bewertung der Wirtgesteine und Auswahl der prioritären Wirtgesteine

3.1 Vorgehen und verwendete Grundlagen

3.1.1 Ausgangslage

Das Ziel dieses Kapitels besteht darin, die Wirtgesteine für das SMA-Lager zu charakterisieren und zu bewerten und in geologischen Standortgebieten mit mehr als einem Wirtgestein diejenigen Wirtgesteine zu identifizieren, welche eine optimale Barrierenwirkung gewährleisten und welche im Vergleich mit den anderen Wirtgesteinen keine eindeutigen Nachteile aufweisen. Die so identifizierten Wirtgesteine werden als prioritäre Wirtgesteine bezeichnet. Für das HAA-Lager entfällt dieser Priorisierungsschritt, da der Entscheid bezüglich der Wahl des Opalinuston als Wirtgestein für das HAA-Lager bereits in Etappe 1 gefällt wurde. Trotzdem wird in diesem Kapitel auch das Wirtgestein für das HAA-Lager charakterisiert und bewertet. Damit stehen für die Bewertung der Lagerperimeter in Kap. 4.4 die wirtgesteinsbezogenen Bewertungen sowohl für das SMA- als auch für das HAA-Lager zur Verfügung.

Dazu wird das in Kap. 2.3.2 beschriebene Vorgehen umgesetzt, welches auf den Vorgaben des Sachplans (BFE 2008) und des ENSI (ENSI 2010a und ENSI 2013a) basiert. Ausgangspunkt sind die in Etappe 1 gewählten Wirtgesteine. Im Falle des SMA-Lagers sind dies der Opalinuston (alle Standortgebiete ausser Wellenberg), die Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger' (Standortgebiete Zürich Nordost und Nördlich Lägern), die Effinger Schichten (Standortgebiet Jura-Südfuss) und die Mergel-Formationen des Helvetikums (Standortgebiet Wellenberg); für das HAA-Lager ist für alle Standortgebiete der Opalinuston das Wirtgestein.

In Anlehnung an die Vorgaben des ENSI (ENSI 2010a) wird zunächst anhand von Dosisberechnungen geprüft, ob die verschiedenen Wirtgesteine in denjenigen Standortgebieten für das SMA-Lager, in denen mehr als ein Wirtgestein vorkommt, sicherheitstechnisch geeignet und gleichwertig sind. Für diese Prüfung werden wirtgesteinspezifische Dosisintervalle berechnet, wobei die relevanten konzeptuellen Ungewissheiten und Parameter-Ungewissheiten mit den alternativen Fällen zur Dosisberechnung berücksichtigt werden (Kap. 3.2). Dabei werden auch Hinweise aus den Dosisberechnungen für die qualitative Bewertung ausgewählter Indikatoren abgeleitet. Als nächstes erfolgen eine Charakterisierung und qualitative Bewertung der Wirtgesteine für das SMA-Lager und HAA-Lager, und es wird geprüft, ob die gesamthafte Bewertung zumindest *geeignet* ausfällt (Kap. 3.3). Die Charakterisierung und qualitative Bewertung erfolgen primär für den sogenannten "massgebenden Fall für die Einengung", die Belastbarkeit der Ergebnisse wird aber zur Berücksichtigung von vorhandenen Ungewissheiten anhand von alternativen Konzeptualisierungen (teilweise auch als alternative Fälle bezeichnet) überprüft. Die qualitative Bewertung der Indikatoren wird auch verwendet, um die Bewertung der entscheidungsrelevanten Merkmale vorzunehmen. Auf dieser Basis werden in Standortgebieten mit mehr als einem Wirtgestein schliesslich diejenigen Wirtgesteine für das SMA-Lager identifiziert, welche im Vergleich mit den anderen Wirtgesteinen keine eindeutigen Nachteile aufweisen (Kap. 3.4). Schliesslich erfolgt eine vergleichende Gesamtbewertung der Wirtgesteine für das SMA-Lager, welche alle erzielten Ergebnisse berücksichtigt und auf deren Basis die Auswahl der prioritären Wirtgesteine für die entsprechenden Standortgebiete vorgenommen wird (Kap. 3.5).

Die wichtigste Grundlage für diese Arbeitsschritte sind die geologischen Unterlagen, die in Nagra (2014b) dokumentiert sind und die neben den schon für Etappe 1 verfügbaren geologischen Unterlagen auch die in der Zwischenzeit neu erarbeiteten Unterlagen berücksichtigen.

Für die Charakterisierung und Bewertung der Wirtgesteine sind die geologischen Konzeptprofile für den einschlusswirksamen Gebirgsbereich und die zugehörigen geologischen Datensätze massgebend, die ebenfalls in Nagra (2014b, Dossiers II, IV und VI) dokumentiert sind. Neben den Unterlagen für Etappe 1 (Nagra 2008b,c,d) stehen zusätzlich die für die Beurteilung des Kenntnisstands (Nagra 2010) und die anschliessend neu erarbeiteten Unterlagen zur Verfügung. Ein Teil der seit Nagra (2010) erarbeiteten Unterlagen wurde bei den Zwischenhalt-Fachsitzungen frühzeitig dem ENSI, weiteren Behörden und Experten vorgestellt und diskutiert (ENSI 2014). Gegenüber Etappe 1 sind bezüglich der Unterlagen zu den Wirtgesteinen zusätzliche Informationen vorhanden aus Bohrungen Dritter (Erdwärmesonden, Bohrung Schlattingen I und II, Tiefbohrung Gösgen SB4), vertiefte Analysen (inkl. Laboruntersuchungen an Kernmaterial) sowie Informationen aus der Seismik (inkl. Faziesanalyse) und aus ergänzenden Kartierungen. Diese Informationen erlauben es, für die Wirtgesteine Konzepte und zugehörige Datensätze abzuleiten, die Ungewissheiten in Konzepten und Parameterwerten anzugeben sowie die Möglichkeit der Reduktion der Ungewissheiten zu beurteilen. Aus Sicht der Nagra ist deshalb der Kenntnisstand geeignet, um eine zuverlässige Bewertung der Wirtgesteine durchzuführen und eine Priorisierung vorzunehmen.

Fig. 3.1-1 enthält eine stratigraphische Übersichtskorrelation wichtiger Bohrungen und Aufschlüsse für die Standortgebiete in der Nordschweiz. Fig. 3.1-3 zeigt die geologischen Konzeptprofile für die Standortgebiete in der Nordschweiz, wie sie für die Dosisberechnungen und für die qualitative Bewertung verwendet werden. Die geologischen Konzeptprofile sind durch die standortspezifische Abfolge der lithofaziellen Einheiten charakterisiert⁴⁶. Die lithofaziellen Einheiten in den Konzeptprofilen werden unter Berücksichtigung des Schemas in Fig. 3.1-2 für die Dosisberechnungen und für die qualitative Bewertung bezüglich ihres Tonmineralgehalts wie folgt kategorisiert⁴⁷:

- Kategorie 1: mittlerer Tonmineralgehalt > 40 Gew.-% (hohes Selbstabdichtungsvermögen): der Opalinuston und die tonreichen Abfolgen im 'Braunen Dogger', Lias, Keuper und der Gipskeuper.
- Kategorie 2: mittlerer Tonmineralgehalt 20 – 40 Gew.-% (mässig gutes Selbstabdichtungsvermögen): die Kalkmergelabfolgen in den Effinger Schichten, die sandig-tonigen Abfolgen im 'Braunen Dogger', die Mergel-Formationen des Helvetikums (ohne Kalkbankabfolgen).
- Kategorie 3: mittlerer Tonmineralgehalt < 20 Gew.-% ("harte Bänke" mit geringem Selbstabdichtungsvermögen): die Kalkbankabfolgen in den Effinger Schichten, die Sandkalkabfolgen im 'Braunen Dogger', der Kalkige Lias, der Arietenkalk und der Keuper Aquifer sowie die Kalkbankabfolgen in den Mergel-Formationen des Helvetikums.

Die Wasserführung (hydraulische Durchlässigkeit und Transmissivität) in den lithofaziellen Einheiten wird anhand von Messwerten aus den Standortgebieten und von Erfahrungswerten aus der Schweiz beurteilt. Diese hydrogeologischen Werte werden ergänzt durch weltweite Erfahrungswerte für Gesteine mit vergleichbarem Tonmineralgehalt sowie mit generellen Erfahrungen insbesondere zum erwarteten Selbstabdichtungsvermögen. Mit zunehmendem Tonmineralgehalt nehmen die mittlere hydraulische Durchlässigkeit und die Streuung der Durchlässigkeitswerte stark ab (Fig. 3.1-4). Insbesondere zeigt sich, dass bei einem Tonmineralgehalt von weniger als 20 Gew.-% die Durchlässigkeit stark erhöht sein kann; bei einem Tonmineralgehalt von mehr als 40 Gew.-% hingegen ist die Durchlässigkeit immer klein. Für jede Katego-

⁴⁶ Ein vereinfachtes Schema mit den für die Barrierenwirkung relevanten lithofaziellen Einheiten für das Standortgebiet Wellenberg findet sich in Fig. 3.1-5.

⁴⁷ Die Abgrenzung der lithofaziellen Einheiten anhand ihres Tongehalts erfolgt in Nagra (2014b, Dossier II und VI). Dort werden auch die diesbezüglich relevanten methodischen Aspekte behandelt.

rie des Tonmineralgehalts lassen sich die drei folgenden charakteristischen Werte für die hydraulische Durchlässigkeit (bzw. bei geklüfteten Medien: Transmissivität und Klufthäufigkeit) festlegen:

- Referenzwert, d.h. der aufgrund der Erfahrungsbasis plausibelste Wert.
- ungünstiger Eckwert, d.h. ein Wert mit ungünstiger Wirkung auf das Barrierensystem.
- günstiger Eckwert, d.h. ein Wert mit günstiger Wirkung auf das Barrierensystem.

Auf dieser Grundlage wird die Wasserführung in den verschiedenen lithologischen Einheiten der Gesteinsprofile innerhalb der Wirtgesteine und der Rahmengesteine beurteilt, was eine direkte Beurteilung der gesamtheitlichen Barrierenwirkung der Gesteinsprofile zulässt. Die Barrierenwirkung der Gesteinsprofile unterscheidet sich primär als Folge der Annahmen zu den hydrogeologischen Eigenschaften der lithofaziellen Einheiten mit durchschnittlichem Tonmineralgehalt < 20 Gew.-% ("harte Bänke"), bei denen nicht ausgeschlossen werden kann, dass sie als Folge der tektonischen Beanspruchung (Versätze von unterschiedlicher Grösse) eine erhöhte Wasserführung auch in lateraler Richtung aufweisen und deshalb als laterale Transportpfade zu einer verringerten Barrierenwirkung der Wirt- und Rahmengesteine führen können (Fig. 3.1-2 und 3.1-3). Zur Beurteilung der Wasserführung werden deshalb für jedes Gesteinsprofil die folgenden Fragen beantwortet:

1. Enthält das Gesteinsprofil lithofazielle Einheiten, die eine stark erhöhte Wasserführung aufweisen können (schnelle Fliesspfade)? Das Augenmerk liegt hier auf lithofaziellen Einheiten mit einem mittleren Tonmineralgehalt < 20 Gew.-% ("harte Bänke" mit geringem Selbstabdichtungsvermögen), welche schon bei kleinen Versätzen stark wasserführend sein können.
2. Sind diese lithofaziellen Einheiten lateral über grössere Distanzen hydraulisch verbunden (laterale hydraulische Kontinuität)? Vor allem bei lithofaziellen Einheiten mit einer Mächtigkeit von einigen Metern und mehr ist in den ruhig gelagerten Lagerperimetern eine laterale Kontinuität zu erwarten; jedoch auch weniger mächtige Einheiten können eine grösserräumige laterale Kontinuität aufweisen.
3. Können allenfalls bestehende Ungewissheiten zur möglichen Wasserführung in diesen lithofaziellen Einheiten mit zusätzlichen Untersuchungen (z.B. für Etappe 3) zuverlässig abgeklärt werden (Reduzierbarkeit der Ungewissheiten)? Dabei geht es einerseits um die Lokalisierung von "harten Bänken" und die Bestimmung (bzw. den Nachweis der Abwesenheit) ihrer lateralen Kontinuität sowie um den Nachweis der Abwesenheit auch von kleinen Versätzen bzw. der Abwesenheit einer lateralen Wasserführung.

Die Fragen 1 und 2 betreffen die Kenntnisse (inkl. Ungewissheiten) über die Wasserführung in den "harten Bänken" in den Wirt- und Rahmengesteinen. Frage 3 ist wichtig für die Festlegung des Umgangs mit den Ungewissheiten zur Wasserführung in den "harten Bänken" und wird für die Festlegung des "massgebenden Falls" im Hinblick auf die Beurteilung der Barrierenwirkung der Wirtgesteine verwendet.

Werden die Fragen 1 und 2 mit *ja* beantwortet, so wird davon ausgegangen, dass die betreffenden lithofaziellen Einheiten wasserführend sind und so die Barrierenwirkung der Wirtgesteine, aber auch der Rahmengesteine in signifikantem Masse beeinträchtigen. Bestehen bei der Beantwortung der Fragen 1 und 2 Ungewissheiten im Hinblick auf die Wasserführung der lithofaziellen Einheiten (insbesondere bezüglich hydraulischer Kontinuität der "harten Bänke"), so werden deren Auswirkungen auf die Barrierenwirkung der Wirt- und Rahmengesteine mit alternativen Konzeptualisierungen und teilweise mit Parameterbandbreiten eingegabelt.

Anhand der Frage 3 wird danach beurteilt, ob die bestehenden Ungewissheiten bezüglich Wasserführung in den lithofaziellen Einheiten im Zuge der Untersuchungen für Etappe 3 reduziert werden können:

- Lautet die Antwort *ja*, so werden die Ungewissheiten bezüglich der Wasserführung in den lithofaziellen Einheiten berücksichtigt, indem die alternative Konzeptualisierung und zugehörige hydrogeologische Eckwerte⁴⁸ mit der *günstigsten* Wirkung auf das Barrierensystem für die Einengung berücksichtigt werden⁴⁹.
- Lautet die Antwort *nein*, so werden die Ungewissheiten bezüglich der Wasserführung in den lithofaziellen Einheiten berücksichtigt, indem die alternative Konzeptualisierung und zugehörige hydrogeologische Eckwerte⁴⁸ mit der *ungünstigsten* Wirkung auf das Barrierensystem für die Einengung berücksichtigt werden⁵⁰.

Mit diesem Vorgehen bei der Konzeptualisierung der Barrierenwirkung des Wirtgesteins und der Rahmengesteine für die Dosisberechnungen und die qualitative Bewertung wird gewährleistet, dass der Entscheid bezüglich Einengung der geologischen Standortgebiete in Etappe 2 vorsichtig und belastbar ist.

Die Analysen zur Explorierbarkeit und Charakterisierbarkeit (Nagra 2014b, Dossier VIII) zeigen, dass der Nachweis (Lokalisierung) auch von kleinen Versätzen in den "harten Bänken" nicht machbar ist. Auch der belastbare Nachweis der Abwesenheit einer lateralen hydraulischen Kontinuität der "harten Bänke" ohne eine grössere Anzahl Bohrungen (verbunden mit einer Verletzung der geologischen Barriere) erweist sich als sehr schwierig und als kaum machbar.

3.1.2 Vorgehen bei den Dosisberechnungen

Basierend auf diesen Überlegungen und Grundlagen werden für jedes geologische Standortgebiet und für jedes darin vorkommende Wirtgestein für die Dosisberechnungen je eine Referenz-Konzeptualisierung sowie alternative Konzeptualisierungen⁵¹ definiert. Aus der Referenz-Konzeptualisierung und den alternativen Konzeptualisierungen sowie aus den zugehörigen Referenz- und Eckwerten werden für die Dosisberechnungen je ein Referenzfall, ein für die Einengung massgebender Fall und bei Bedarf weitere Fälle zur Prüfung der Sensitivität festgelegt.

Dies ergibt für die Dosisberechnungen folgende Systematik:

- Der *Referenzfall* entspricht bezüglich der Wasserführung in den "harten Bänken" im Wirtgestein und in den Rahmengesteinen dem aufgrund der Erfahrungsbasis plausibelsten Fall, gebildet durch die Referenz-Konzeptualisierung und die Referenz-Parameterwerte; er bildet den Referenzfall bei der Ermittlung der charakteristischen Dosisintervalle (vgl. ausgezogene grüne Doppelpfeile in Fig. 3.1-3). Bei Vorliegen von mehr als einer plausiblen Konzeptualisierung werden auch Varianten für die Referenz-Konzeptualisierung betrachtet. Dies gilt

⁴⁸ Für alle anderen Parameter werden Referenzwerte verwendet.

⁴⁹ Damit wird verhindert, dass ein möglicherweise geeignetes Wirtgestein bzw. Standortgebiet aufgrund von (reduzierbaren) Ungewissheiten fälschlicherweise zurückgestellt wird.

⁵⁰ Damit wird verhindert, dass ein Wirtgestein fälschlicherweise als prioritäres Wirtgestein ausgewählt wird, das in späteren Phasen der Lagerrealisierung (beim Bau des Felslabors oder bei der Erhebung der Daten Untertage) als nicht belastbar charakterisiert und deshalb nicht verwendet werden kann.

⁵¹ In Nagra (2014a) werden im Rahmen der Modellierung häufig auch die Begriffe Referenz-Situation bzw. alternative Situation verwendet.

fallweise für die Beurteilung der Barrierenwirkung der oberen Rahmengesteine des Opalinustons und des unteren Teils des 'Braunen Doggers' im Standortgebiet Nördlich Lägern⁵² und die oberen Rahmengesteine in den Standortgebieten Jura Ost und Jura-Südfuss, wo unabhängig von der detaillierten Beurteilung der einzelnen "harten Bänke" alternative Annahmen getroffen werden (vgl. gestrichelte grüne Doppelpfeile in Fig. 3.1-3).

- Der *massgebende Fall* für die Dosisberechnungen⁵³ berücksichtigt, inwieweit die vorhandenen Ungewissheiten im erforderlichen Ausmass mit grosser Zuverlässigkeit reduziert werden können. Bei Vorhandensein von "harten Bänken" im Wirtgestein bzw. direkt an das Wirtgestein angrenzend wird für die Dosisberechnungen als "massgebender Fall" eine Konzeptualisierung mit hydrogeologischen Parametern gewählt, bei der die "harten Bänke" wegen ihrer erhöhten lateralen Wasserführung einen ungünstigen Einfluss auf die Barrierenwirkung des Wirtgesteins und die Rahmengesteine haben und verhindern, dass das ganze Wirtgestein bzw. die Rahmengesteine barrierenwirksam sind (vgl. orange Doppelpfeile in Fig. 3.1-3). Diese Konzeptualisierung wird gewählt, da die Ungewissheiten bezüglich hydrogeologischer Eigenschaften der "harten Bänke" auch mit zusätzlichen Untersuchungen nicht absolut zuverlässig reduzierbar sind, und deshalb die Bedeutung dieser Situation für die Sicherheit erfasst werden soll.
- Bei Bedarf werden ausgehend vom Referenzfall bzw. vom massgebenden Fall weitere Fälle abgeleitet zur Prüfung der Sensitivität der charakteristischen Dosisintervalle und der qualitativen Bewertung. Dazu gehört auch eine Dosisberechnung zur Illustration einer optimalen Barrierenwirkung, wo der ganze potenziell einschlusswirksame Gebirgsbereich zur Barrierenwirkung beiträgt (vgl. schwarze Doppelpfeile in Fig. 3.1-3).

Wie Fig. 3.1-3 zeigt, unterscheiden sich die Referenz-Konzeptualisierung (welche zum Referenzfall führt) und die ungünstige Konzeptualisierung (welche zum "massgebenden Fall für die Einengung" führt) beim Opalinuston und beim 'Braunen Dogger' bezüglich der Annahmen zur Wirksamkeit ihrer Rahmengesteine (grüne ausgezogene bzw. gestrichelte Doppelpfeile in Fig. 3.1-3) und zur Wirksamkeit des Wirtgesteins; beim 'Braunen Dogger' werden für den "massgebenden Fall" zusätzlich auch alternative Varianten zur Wirksamkeit der "harten Bänke" innerhalb des Wirtgesteins betrachtet (orange ausgezogene bzw. gestrichelte Doppelpfeile in Fig. 3.1-3). Im Falle der Effinger Schichten fehlen die Rahmengesteine. Wegen der hydraulischen Wirkung der Kalkbankabfolgen ist der barrierenwirksame Teil des Wirtgesteins in den Effinger Schichten für den Referenzfall und für den "massgebenden Fall" identisch, denn die ungünstige Konzeptualisierung bezüglich "harter Bänke" wird als plausibelste Konzeptualisierung betrachtet. Auch bei den Mergel-Formationen des Helvetikums fehlen die Rahmengesteine; bezüglich Barrierenwirkung des Wirtgesteins werden dort unter Berücksichtigung der boudinierten Kalkbankabfolgen drei Varianten (vgl. Fig. 3.1-5)⁵⁴ betrachtet. In Fig. 3.1-3 sind für die Standortgebiete Nördlich Lägern, Jura Ost und Jura-Südfuss je zwei plausible Referenz-Konzeptualisierungen bezüglich Barrierenwirkung der oberen Rahmengesteine des Opalinustons dargestellt, im Standortgebiet Nördlich Lägern zusätzlich auch bezüglich Barrierenwirkung des untersten Bereichs des 'Braunen Doggers' (vgl. durchgezogene und gestrichelte grüne Doppelpfeile in Fig. 3.1-3).

⁵² Dies betrifft die Sandkalkabfolge SKA-1, vgl. Fig. 3.1-3.

⁵³ Der massgebende Fall für die Dosisberechnungen unterscheidet sich vom "massgebenden Fall für die Einengung" bei der Bewertung (vgl. Kap. 3.1.3) darin, dass bei den Dosisberechnungen nur das Wirtgestein betrachtet wird. Beim "massgebenden Fall für die Einengung" liegt bei der Bewertung der Fokus bzgl. Barrierenwirkung auch auf dem Wirtgestein, für die Beurteilung der Mächtigkeit werden aber zusätzlich auch immer die Rahmengesteine mit einbezogen.

⁵⁴ Der Transportpfad durch die boudinierten Kalkbankabfolgen kommt nur in Kombination mit einer Störungszone vor.

3.1.3 Vorgehen bei der qualitativen Bewertung

Bei der qualitativen Bewertung und der dazu notwendigen Charakterisierung sowie bei der Identifikation eindeutiger Nachteile wird wie bei den Dosisberechnungen die Wirkung der "harten Bänke" berücksichtigt. Für die Bewertung wird auf der Grundlage von Fig. 3.1-3 für jedes geologische Standortgebiet und für jedes darin vorkommende Wirtgestein zwischen dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich (abgekürzt: EG⁵⁵), dem Wirtgestein als Ganzes (abgekürzt: WG) und dem Wirtgestein *sensu stricto* (abgekürzt: WG-ss) unterschieden.

- Als Wirtgestein *sensu stricto* wird derjenige Teil des Wirtgesteins bezeichnet, welcher bei der Radionuklidfreisetzung den dominierenden Beitrag zur Barrierenwirkung beisteuert. Falls innerhalb des Wirtgesteins "harte Bänke" und in ihnen eine Wasserführung unterstellt wird, handelt es sich beim Wirtgestein *sensu stricto* um die mächtigste tonreiche Gesteinsabfolge, innerhalb derer die Lagerkammern platziert werden. In Fig. 3.1-3 ist das Wirtgestein *sensu stricto* durch Doppelpfeile in oranger Farbe dargestellt; dabei handelt es sich um den gesamten Opalinuston (ohne Lias), die Tonige Abfolge TA-1 innerhalb des 'Braunen Doggers', die Kalkmergelabfolge KMA-5 innerhalb der Effinger Schichten und die Kalkmergel in den Mergel-Formationen des Helvetikums. Beim 'Braunen Dogger' und bei den Mergel-Formationen des Helvetikums wird bei der Bewertung des Wirtgesteins *sensu stricto* zusätzlich je eine alternative Konzeptualisierung verwendet: Beim 'Braunen Dogger' wird angenommen, dass die "harten Bänke" innerhalb des Wirtgesteins nicht wasserführend sind (gestrichelter oranger Doppelpfeil in Fig. 3.1-3); bei den Mergel-Formationen des Helvetikums wird angenommen, dass ein Teil des Radionuklid-Transportpfads in Verbindung mit Störungszonen in den Kalkbankabfolgen verläuft und dass dort keine Barrierenwirkung vorhanden ist (gestrichelter oranger Doppelpfeil in Fig. 3.1-5).
- Das Wirtgestein als Ganzes enthält neben dem Wirtgestein *sensu stricto* auch die weiteren lithofaziellen Einheiten des Wirtgesteins. Beim Opalinuston sind das Wirtgestein als Ganzes und das Wirtgestein *sensu stricto* identisch. Das Wirtgestein als Ganzes wird vor allem verwendet für die Beurteilung der Homogenität des Wirtgesteins, der Verkarstungsfähigkeit, der Rohstoffkonflikte und für ausgewählte Aspekte der Explorierbarkeit und Charakterisierbarkeit. Diese Informationen dienen auch dazu, das Wirtgestein *sensu stricto* abzugrenzen und zu begründen.
- Für die Beurteilung der Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs werden neben dem Wirtgestein zusätzlich auch die barrierenwirksamen oberen und unteren Rahmengesteine berücksichtigt⁵⁶. Bei den Effinger Schichten und den Mergel-Formationen des Helvetikums sind keine Rahmengesteine vorhanden bzw. ihr Beitrag zur Barrierenwirkung ist vernachlässigbar; der einschlusswirksame Gebirgsbereich besteht dort nur aus dem Wirtgestein. Bei den anderen Wirtgesteinen ist die Mächtigkeit bzw. Barrierenwirkung der Rahmengesteine unterschiedlich (vgl. ausgezogene grüne Doppelpfeile in Fig. 3.1-3). In den Standortgebieten Nördlich Lägern, Jura Ost und Jura-Südfuss sind zusätzlich unterschiedliche Interpretationen bezüglich der Barrierenwirkung der Rahmengesteine zu berücksichtigen. Die alternativen Interpretationen der Rahmengesteine können wiederum Fig. 3.1-3 entnommen werden (gestrichelte grüne Doppelpfeile).

⁵⁵ Die Abkürzungen werden in den Bewertungstabellen Tab. 3.3-1 und 3.3-2 in Kap. 3.3 verwendet.

⁵⁶ Dabei wird nur die unter Berücksichtigung einer allfälligen Dekompaktion nutzbare Mächtigkeit der Rahmengesteine berücksichtigt.

3.1.4 Unterlagen

Die für die Dosisberechnungen und die qualitative Bewertung notwendigen Unterlagen umfassen geometrische Daten (Mächtigkeiten, Überdeckungen zur Berücksichtigung einer möglichen Dekompaktion) sowie Angaben zur Beschreibung und zu den Eigenschaften der verschiedenen lithofaziellen Einheiten (konzeptuellen Modelle und Parameter für den Stofftransport, geochemische Bedingungen, Beständigkeit der Gesteinseigenschaften, felsmechanische Eigenschaften, Unterlagen zur Beurteilung der lagerbedingten Einflüsse und von allfälligen Nutzungskonflikten) sowie Unterlagen zur Beurteilung der Explorierbarkeit und Charakterisierbarkeit. Diese Unterlagen sind detailliert in Nagra (2014b, Dossier II, IV, V, VI, VII und VIII) beschrieben; weiter werden für die Beurteilung der Dekompaktion die Angaben zur Tiefenlage pro Standortgebiet aus Kap. 4.2 bzw. Anhang B verwendet. Nachfolgend werden nur ausgewählte Informationen kurz erwähnt; für den detaillierten Nachvollzug sind die verschiedenen Dossiers von Nagra (2014b) zu konsultieren.

Die Mächtigkeiten der lithofaziellen Einheiten sind in Tab. 3.1-1 bis 3.1-5 für die verschiedenen Wirtgesteine und Standortgebiete der Nordschweiz zusammengestellt. In der Legende wird jeweils darauf hingewiesen, welche oberen Rahmengesteine eine ausreichende Gesteins-Überdeckung aufweisen und deshalb zur nutzbaren Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs beitragen.

Da es in den Standortgebieten Nördlich Lägern, Jura Ost und Jura-Südfuss beim Opalinuston Ungewissheiten bezüglich der Qualität der oberen Rahmengesteine gibt, werden in diesen Standortgebieten neben dem im Referenzfall angenommenen Beitrag der oberen Rahmengesteine zur Barrierenwirkung auch alternative Konzeptualisierungen betrachtet. Das gleiche gilt im Standortgebiet Nördlich Lägern dementsprechend auch für die Barrierenwirkung des untersten Teils des 'Braunen Doggers'.

Die Ausdehnung der Wirtgesteinsakkumulation im Standortgebiet Wellenberg beträgt ca. 2 km in Nord-Süd-Richtung, mehr als 3 km in West-Ost-Richtung und bis zu 1.7 km in der Vertikalen. Die Mergel-Formationen des Helvetikums weisen hier keine Rahmengesteine mit nennenswerten Beiträgen zur Barrierenwirkung auf. Fig. 3.1-5 zeigt die relevanten Transportpfade in den Mergel-Formationen des Helvetikums für das Standortgebiet Wellenberg und Tab. 3.1-6 enthält die in den Dosisberechnungen je nach Konzeptualisierung verwendeten Transportpfadlängen.

Tab. 3.1-7 fasst die hydrogeologischen Parameterwerte zusammen (hydraulische Durchlässigkeiten, Transmissivitäten, hydraulische Gradienten).

3.1.5 Einhaltung der Mindest- und verschärften Anforderungen gemäss Etappe 1

In Etappe 1 wurden die Wirtgesteine für das SMA- und HAA-Lager anhand von Mindest- und verschärften Anforderungen für eine Auswahl von wirtgesteinsspezifischen Indikatoren festgelegt (vgl. Tabelle 2.5-2 in Nagra 2008b). Auch unter Berücksichtigung der in Kap. 3.1.4 aufgeführten Wirtgesteinseigenschaften – welche die seit Etappe 1 neu erhobenen Grundlagen berücksichtigen – lässt sich festhalten, dass die Mindest- und verschärften Anforderungen aus Etappe 1 weiterhin eingehalten werden.

Es hat sich auch gezeigt, dass die Mindest- und verschärften Anforderungen an die nutzbare Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs weiterhin erfüllt sind (vgl. Angaben in nachfolgenden Tabellen). Dies gilt auch für das Standortgebiet Jura-Südfuss, wo die geforderte nutzbare Mächtigkeit von 100 m unter Einbezug der nutzbaren Mächtigkeit der Rahmengesteine formal erfüllt wird, obschon der Opalinuston dort eine Mächtigkeit von lediglich ca. 90 m (Referenzwert aus Tab. 3.1-5) aufweist.

Auch bezüglich der grossräumigen hydraulischen Durchlässigkeit werden die Mindest- und verschärften Anforderungen aus Etappe 1 weiterhin durch alle Wirtgesteine in allen Standortgebieten erfüllt. Auch die Mindestanforderung bezüglich der Transmissivität präferenzierter Freisetzungspfade wird in lithofaziellen Einheiten mit einem mittleren Tonmineralgehalt von > 20 Gew.-% von allen Wirtgesteinen erfüllt. Bei den Sandkalkabfolgen im 'Braunen Dogger' und den Kalkbankabfolgen in den Effinger Schichten mit einer Mächtigkeit von einigen Metern und mehr wird für die Dosisberechnungen zwar unterstellt, dass sie wasserführend sind und erhöhte Werte für die Transmissivität präferenzierter Freisetzungspfade aufweisen und so einen hydraulischen "Kurzschluss" bilden können. Dies wird jedoch bezüglich Erfüllung der Mindestanforderungen und der verschärften Anforderungen nicht als kritisch eingestuft, weil die Lagerkammern in den tonreicheren lithofaziellen Einheiten (d.h. im Wirtgestein *sensu stricto*) platziert werden und somit den wasserführenden lithofaziellen Einheiten vertikal ausgewichen wird.

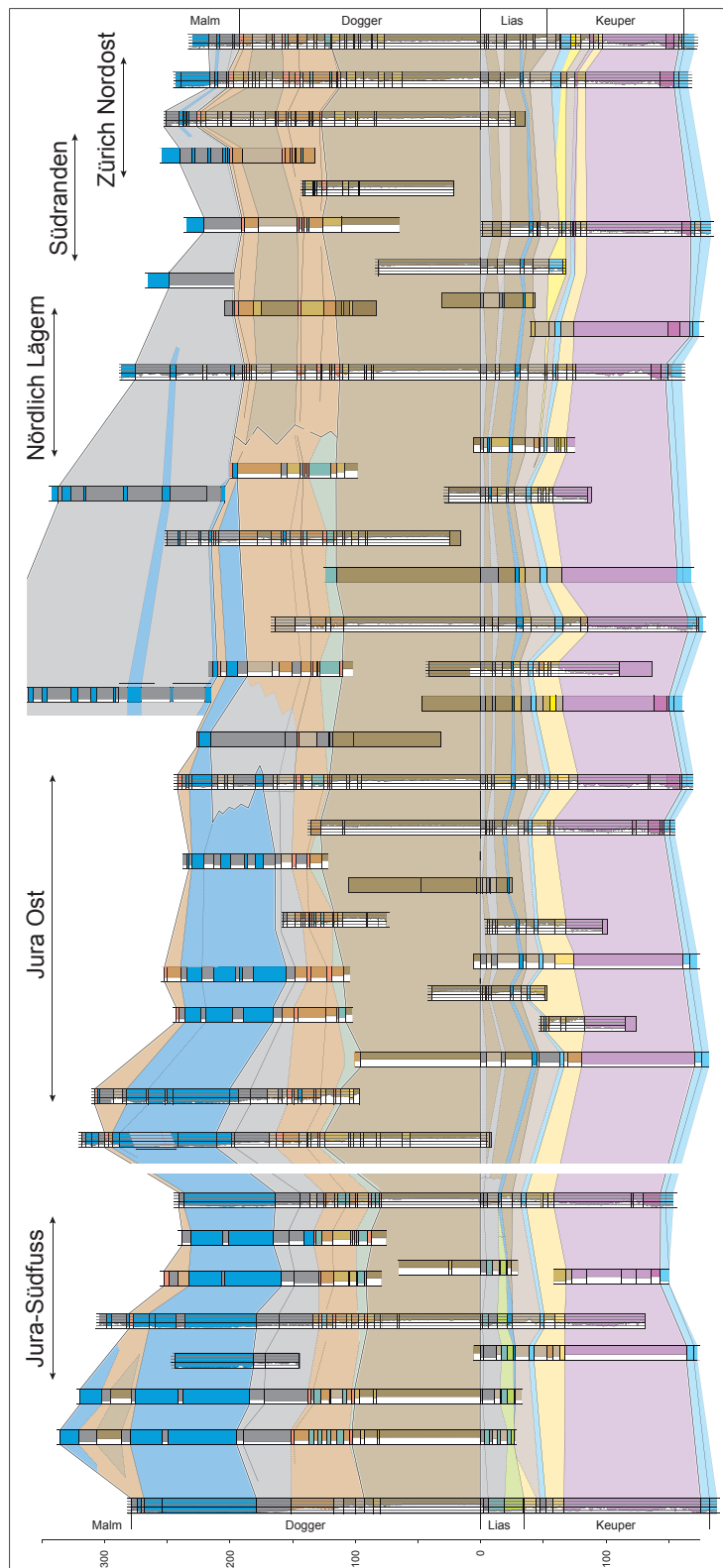
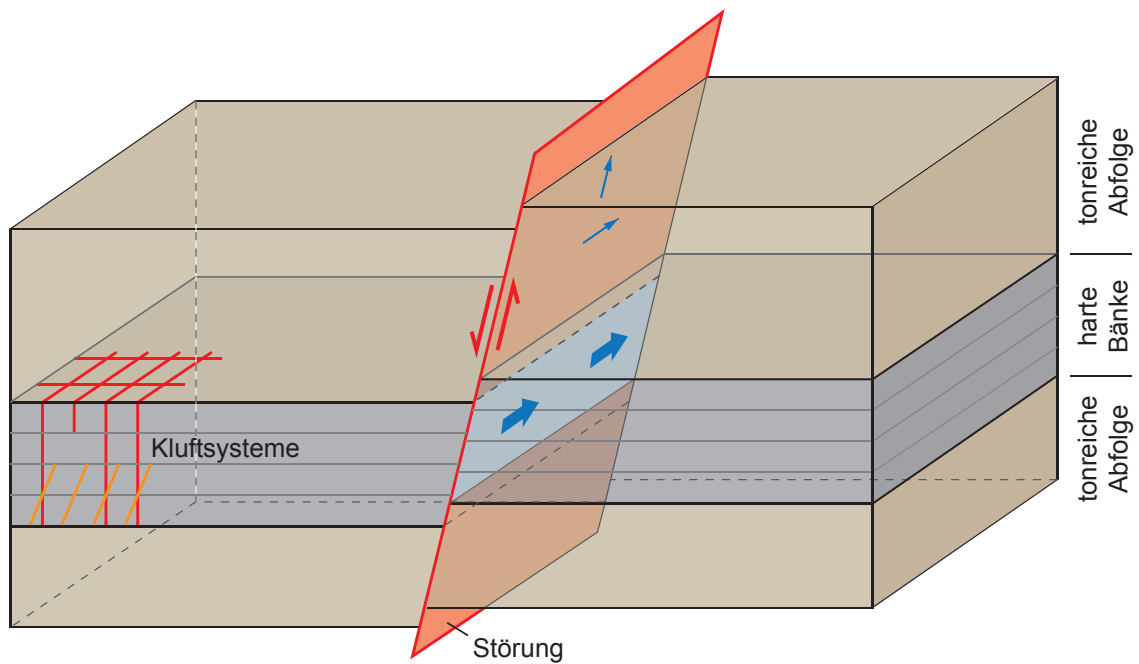


Fig. 3.1-1: Stratigraphische Übersichtskorrelation wichtiger Bohrungen und Aufschlüsse für die Standortgebiete in der Nordschweiz (aus Nagra 2014b, Dossier VI).

Diese Korrelation findet sich in Originalgrösse mit Legende in Nagra (2014b, Dossier II, Beilage 3-1).



- ➔ Bereich mit Potenzial für stark erhöhten Wasserfluss (harte Bänke mit Tonmineralgehalt < 20 Gew.-%)
- ➔ Bereich mit Potenzial für mässig erhöhten Wasserfluss (tonreiche Abfolge mit Tonmineralgehalt 20 - 40 Gew.-%) oder kein erhöhter Wasserfluss (tonreiche Abfolge mit Tonmineralgehalt > 40 Gew.-%)

Fig. 3.1-2: Schematische Darstellung der Wirkung von Versätzen und Diskontinuitäten auf den Wasserfluss in den "harten Bänken" und in den tonreichen Abfolgen, vgl. Nagra (2014b, Dossier VI).

Schon kleinere Diskontinuitäten können in lithofaziellen Einheiten mit einem Tonmineralgehalt < 20 Gew.-% ("harte Bänke") zu einem erhöhten Wasserfluss führen. Lithofazielle Einheiten mit einem Tonmineralgehalt > 40 Gew.-% haben ein gutes Selbstabdichtungsvermögen, sodass trotz Versätzen kein erhöhter Wasserfluss zu erwarten ist.

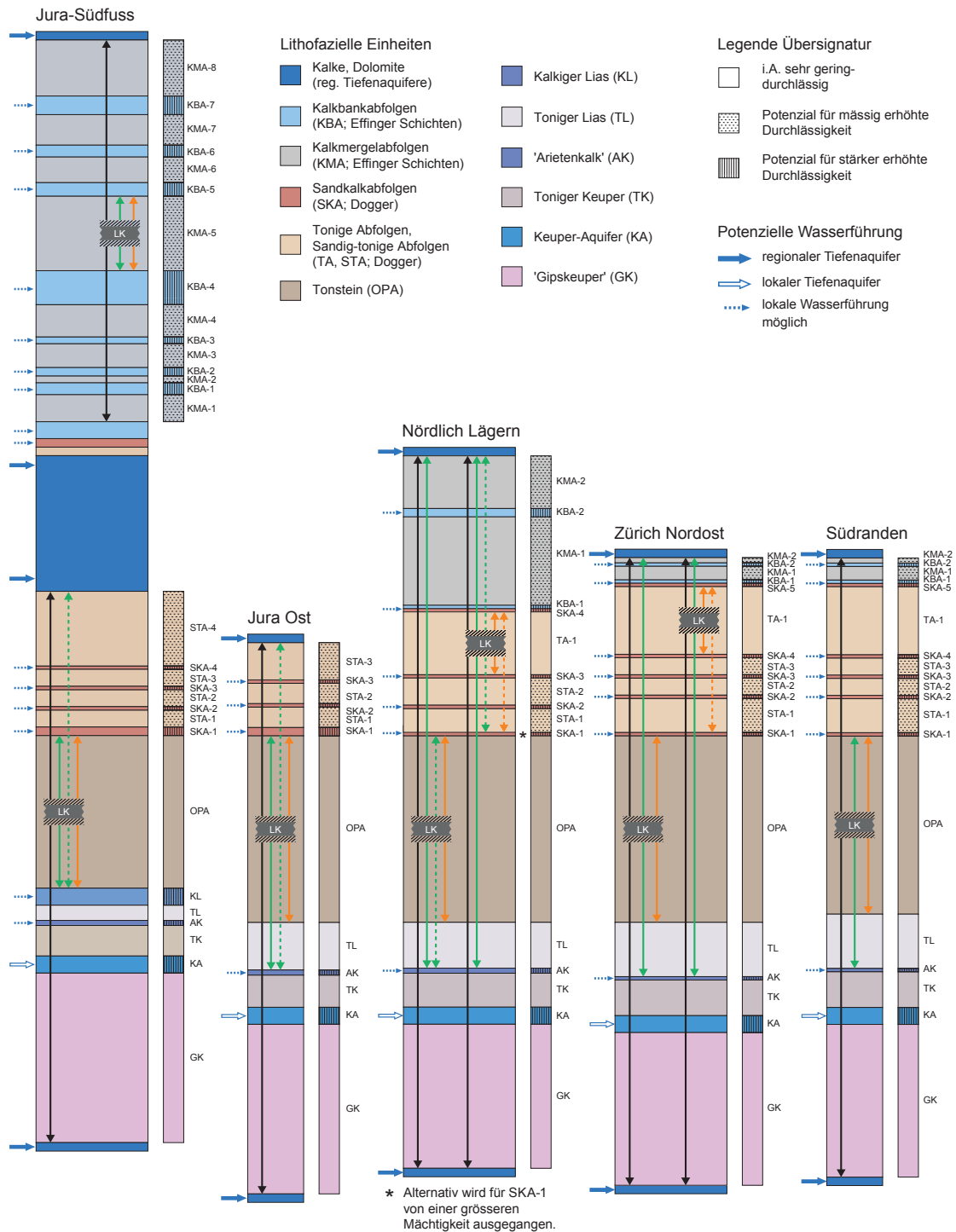


Fig. 3.1-3: Geologische Konzeptbilder der Gesteinsprofile für die Standortgebiete in der Nordschweiz mit den die Barrierenwirkung potenziell beeinflussenden "harten Bänken", vgl. Nagra (2014b, Dossier VI).

LK: symbolisiert die Lagerkammern auf der Lagerebene. Grüne Doppelpfeile: Wirtgestein mit barrierenwirksamen Rahmengesteinen (gestrichelt: Variante bezüglich Barrierenwirkung der Rahmengesteine); orange Doppelpfeile: Wirtgestein *sensu stricto* (gestrichelt: Variante bezüglich Einfluss der "harten Bänke" innerhalb des Wirtgesteins auf dessen Barrierenwirkung); schwarze Doppelpfeile: potenziell nutzbarer einschlusswirksamer Gebirgsbereich (nutzbar, falls günstige Situation vorherrscht).

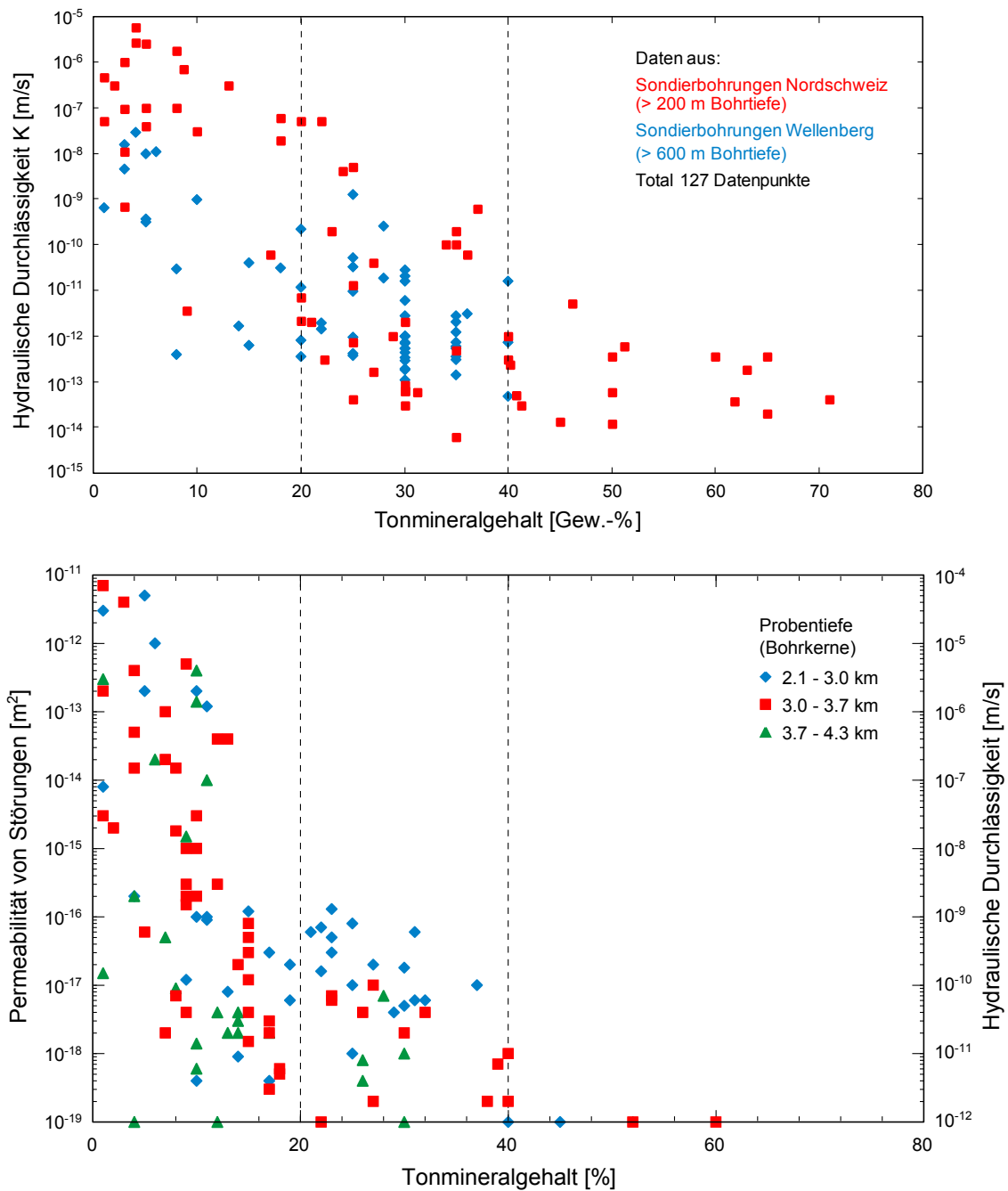


Fig. 3.1-4: Zusammenhang zwischen mittlerem Tonmineralgehalt und grossräumiger hydraulischer Durchlässigkeit, vgl. Nagra (2014b, Dossier VI).

Obere Teilfigur: Erfahrungswerte aus Tiefbohrungen in der Nordschweiz und im Standortgebiet Wellenberg (Bock et al. 2010 bzw. Nagra 2009).

Für Tonmineralgehalte > Gew.- 40 % ist $K < 1 \times 10^{-11}$ m/s.

Untere Teilfigur: weltweite Erfahrungswerte (Jolley et al. 2007, Bock et al. 2010 bzw. Nagra 2009). In der Figur von Jolley et al. (2007) handelt es sich um volumetrische Anteile von Tonmineralen. Angesichts der ähnlichen Dichte von Tonmineralen und den anderen Hauptgemengteilen von Tonsteinen (Quarz, Calcit) sind diese Angaben nur unwesentlich verschieden von denjenigen in Gew.-%.

Tab. 3.1-1: Mächtigkeiten der lithofaziellen Einheiten für das geologische Standortgebiet Südranden.

Abkürzungen und Numerierung der lithofaziellen Einheiten gemäss Fig. 3.1-3. Wegen ungenügender Überdeckung sind die oberen Rahmengesteine des Opalinustons im Standortgebiet Südranden nicht nutzbar. Tabelle aus Nagra (2014b, Dossier VI).

Lithofazielle Einheit	Referenzwert [m]	Unterer Eckwert [m]	Oberer Eckwert [m]		
Obere Rahmengesteine	15	5	50		
KMA-2	3				
KBA-2	2				
KMA-1	8				
KBA-1	2				
'Brauner Dogger'	90	60	120		
SKA-5	2				
TA-1	40			30	60
SKA-4	2				
STA-3	10				
SKA-3	2				
STA-2	10				
SKA-2	2				
STA-1	20				
SKA-1	2				
Opalinuston OPA	105			70	130
Untere Rahmengesteine	155			140	180
TL	32				
AK	2				
TK	21				
KA	10				
GK	90				

Tab. 3.1-2: Mächtigkeiten der lithofaziellen Einheiten für das geologische Standortgebiet Zürich Nordost.

Abkürzungen und Numerierung der lithofaziellen Einheiten gemäss Fig. 3.1-3. Die nutzbare Mächtigkeit der oberen Rahmengesteine des Opalinustons beträgt im Standortgebiet Zürich Nordost mindestens ca. 90 m; im Falle des 'Braunen Doggers' sind die oberen Rahmengesteine in einem Teil des Standortgebiets nicht nutzbar, da sie nicht genügend überdeckt sind. Tabelle aus Nagra (2014b, Dossier VI).

Lithofazielle Einheit	Referenzwert [m]	Unterer Eckwert [m]	Oberer Eckwert [m]		
Obere Rahmengesteine	15	5	40		
KMA-2	3				
KBA-2	2				
KMA-1	8				
KBA-1	2				
'Brauner Dogger'	90	60	120		
SKA-5	2				
TA-1	40			30	60
SKA-4	2				
STA-3	10				
SKA-3	2				
STA-2	10				
SKA-2	2				
STA-1	20				
SKA-1	2				
Opalinuston OPA	110			80	130
Untere Rahmengesteine	155			140	180
TL	32				
AK	2				
TK	21				
KA	10				
GK	90				

Tab. 3.1-3: Mächtigkeiten der lithofaziellen Einheiten für das geologische Standortgebiet Nördlich Lägern.

Abkürzungen und Numerierung der lithofaziellen Einheiten gemäss Fig. 3.1-3. Dank ausreichender Überdeckung sind die oberen Rahmengesteine des Opalinustons und des 'Braunen Doggers' im Standortgebiet Nördlich Lägern in vollem Umfang nutzbar. Tabelle aus Nagra (2014b, Dossier VI).

Die mit einem * gekennzeichneten Werte stehen für eine alternative Interpretation mit grösserer Mächtigkeit der lithofaziellen Einheit SKA-1 und kleinerer Mächtigkeit von SKA-2 und STA-1 (vgl. dazu auch Text).

Lithofazielle Einheit	Referenzwert [m]	Unterer Eckwert [m]	Oberer Eckwert [m]
Obere Rahmengesteine	90	40	130
KMA-2	31		
KBA-2	5		
KMA-1	52		
KBA-1	2		
'Brauner Dogger'	75	60	120
SKA-4	2		
TA-1	37	25	60
SKA-3	2		
STA-2	16		
SKA-2	2/0 *		
STA-1	14/3 *		
SKA-1	2/15 *		
Opalinuston OPA	110	80	130
Untere Rahmengesteine	145	130	180
TL	27		
AK	3		
TK	20		
KA	10		
GK	85		

Tab. 3.1-4: Mächtigkeiten der lithofaziellen Einheiten für das geologische Standortgebiet Jura Ost.

Abkürzungen und Numerierung der lithofaziellen Einheiten gemäss Fig. 3.1-3. Dank ausreichender anfänglicher Überdeckung sind die oberen Rahmengesteine des Opalinustons im grössten Teil des Standortgebiets Jura Ost in vollem Umfang nutzbar. Tabelle aus Nagra (2014b, Dossier VI).

Lithofazielle Einheit	Referenzwert [m]	Unterer Eckwert [m]	Oberer Eckwert [m]
Obere Rahmengesteine	55	30	90
STA-3	22		
SKA-3	2		
STA-2	12		
SKA-2	2		
STA-1	12		
SKA-1	5		
Opalinuston OPA	110		
Untere Rahmengesteine	160	140	180
TL	28		
AK	3		
TK	19		
KA	10		
GK	100		

Tab. 3.1-5: Mächtigkeiten der lithofaziellen Einheiten für das geologische Standortgebiet Jura-Südfuss.

- a) Wirtgestein Opalinuston. Dank ausreichender Überdeckung sind die oberen Rahmengesteine in vollem Umfang nutzbar.

Abkürzungen und Numerierung der lithofaziellen Einheiten gemäss Fig. 3.1-3. Tabellen aus Nagra (2014b, Dossier VI).

Lithofazielle Einheit	Referenzwert [m]	Unterer Eckwert [m]	Oberer Eckwert [m]
Obere Rahmengesteine	85	50	110
STA-4	44		
SKA-4	2		
STA-3	10		
SKA-3	2		
STA-2	10		
SKA-2	2		
STA-1	10		
SKA-1	5		
Opalinuston OPA	90	65	130
Untere Rahmengesteine	150	120	180
KL	10		
TL	9		
AK	3		
TK	18		
KA	10		
GK	100		

Tab. 3.1-5: (Fortsetzung)

b) Wirtgestein Effinger Schichten. Hier sind keine Rahmengesteine vorhanden.

Abkürzungen und Numerierung der lithofaziellen Einheiten gemäss Fig. 3.1-3. Tabellen aus Nagra (2014b, Dossier VI).

Lithofazielle Einheit	Referenzwert [m]	Unterer Eckwert [m]	Oberer Eckwert [m]
Effinger Schichten	225	170	250
KMA-8	33		
KBA-7	11		
KMA-7	18		
KBA-6	7		
KMA-6	15		
KBA-5	8		
KMA-5	44	30	55
KBA-4	20		
KMA-4	19		
KBA-3	4		
KMA-3	14		
KBA-2	5		
KMA-2	4		
KBA-1	7		
KMA-1	16		

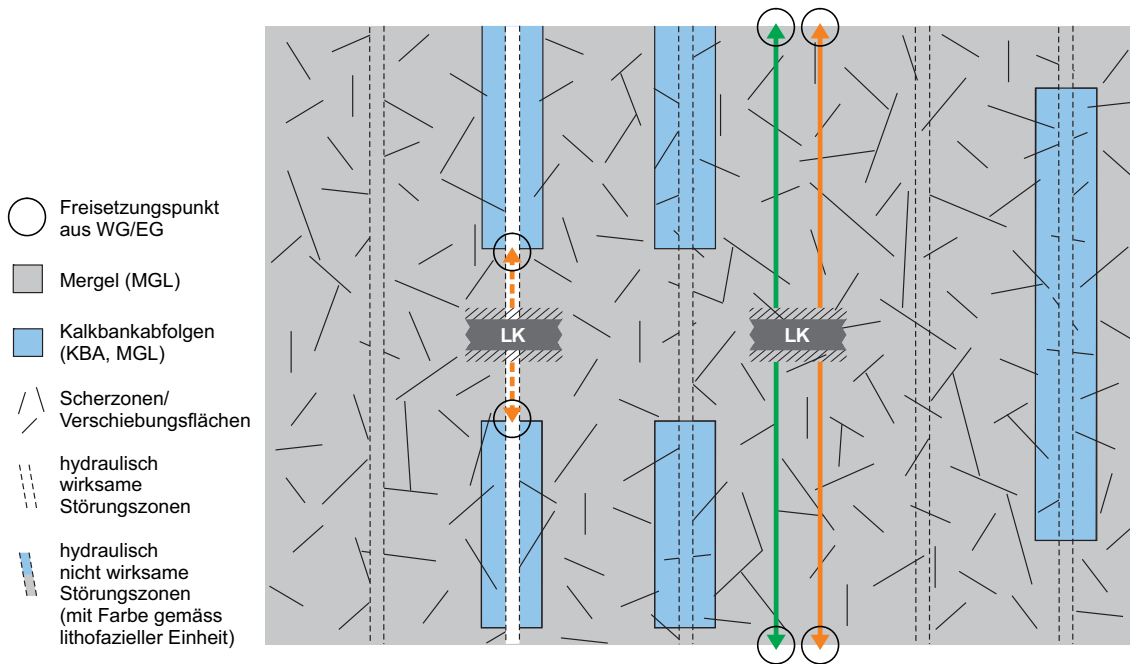


Fig. 3.1-5: Geologisches Konzeptbild und Radionuklidfreisetzungspfade für die Mergel-Formationen im geologischen Standortgebiet Wellenberg, vgl. dazu (Nagra 2014b, Dossier VI).

LK: symbolisiert die Lagerkammern auf der Lagerebene. Grüne Doppelpfeile: Referenz-Konzeptualisierung (führt zum Referenzfall); ausgezogene orange Doppelpfeile: Konzeptualisierung für "massgebenden Fall für die Einengung"; gestrichelte orange Doppelpfeile: Variante zum "massgebenden Fall" mit reduzierter Barrierenwirkung aufgrund von Kalkbankabfolgen innerhalb des Wirtgesteins (in Kombination mit einer hydraulisch wirksamen Störungszone).

Tab. 3.1-6: Relevante Transportpfadlängen in den Mergel-Formationen des Helvetikums für das geologische Standortgebiet Wellenberg, vgl. dazu Nagra (2014b, Dossier VI).

Definition der Transportpfade gemäss Fig. 3.1-5. Die Tabelle enthält die Gesamtlänge L der Transportpfade im Wirtgestein. Bei Transportpfaden, welche z.T. in Kalkbankabfolgen verlaufen, ist die Transportlänge im Mergel (d.h. ausserhalb von Kalkbankabfolgen) in Klammern angegeben. Die Mergel-Formationen im Standortgebiet Wellenberg weisen keine Rahmengesteine auf.

Kürzel	Rechenfall	L [m]
RF	Referenzfall	100
mFE	Massgebender Fall für die Einengung	100 (20)

Tab. 3.1-7: Zusammenfassung der (schichtquerenden) hydraulischen Parameter der lithofaziellen Einheiten in den Wirtgesteinsformationen, vgl. Nagra (2014b, Dossier VI).

Die lithofaziellen Einheiten mit einem Tonmineralgehalt von > 40 Gew.-% werden in allen Fällen als homogen-poröse Medien betrachtet. Zugehörige hydraulische Parameter parallel zur Schichtung sind um einen Faktor 5 erhöht.

Die lithofaziellen Einheiten des 'Braunen Doggers' und der Effinger Schichten mit einem Tonmineralgehalt im Bereich 20 Gew.-% – 40 Gew.-% werden im Referenzfall als homogen-poröse Medien, im Fall mit erhöhter Wasserführung als mit hydraulisch wirksamen Störungszonen durchsetzte Medien modelliert. Zugehörige hydraulische Parameter parallel zur Schichtung sind um einen Faktor 5 erhöht. Für die Mergel-Formationen des Helvetikums wird generell die hydraulische Wirksamkeit von kleinräumigen Trennflächen (Klüfte, kurz: Kl.), im Fall mit erhöhter Wasserführung zusätzlich auch die Wirksamkeit von Störungszonen (kurz: StZ.) betrachtet. Alle hydraulischen Parameter der Mergel-Formationen des Helvetikums korrespondieren mit isotropen Verhältnissen.

Die lithofaziellen Einheiten des 'Braunen Doggers' und der Effinger Schichten mit einem Tonmineralgehalt < 20 Gew.-% werden generell als mit hydraulisch wirksamen Störungen durchsetzte Medien modelliert, wobei im Referenzfall eine hydraulische Wirksamkeit nur für Einheiten mit einer Mächtigkeit von einigen Metern und mehr angenommen wird. Die zugehörigen hydraulischen Parameter korrespondieren mit isotropen Verhältnissen.

Lithofazielle Einheit	Kat ¹⁾	Referenzwert				Oberer Eckwert			
		K _v [m/s]	T [m ² /s]	1/f [m]	K _{v,eff} [m/s]	K _v [m/s]	T [m ² /s]	1/f [m]	K _{v,eff} [m/s]
OPA (mittel/tief)	1	2 × 10 ⁻¹⁴			2 × 10 ⁻¹⁴	10 ⁻¹³			10 ⁻¹³
OPA (untief)	1	10 ⁻¹³			10 ⁻¹³	3 × 10 ⁻¹³			3 × 10 ⁻¹³
TA	1	10 ⁻¹³			10 ⁻¹³	5 × 10 ⁻¹³			5 × 10 ⁻¹³
KMA	2	10 ⁻¹²	10 ⁻¹⁰	100	2 × 10 ⁻¹²	2)	10 ⁻⁹	100	10 ⁻¹¹
STA	2	10 ⁻¹²	10 ⁻¹⁰	100	2 × 10 ⁻¹²	2)	10 ⁻⁹	100	10 ⁻¹¹
MG ³⁾	2	3 × 10 ⁻¹³	10 ⁻¹⁰	100	10 ⁻¹²	10 ⁻¹¹	10 ⁻¹⁰	100	10 ⁻¹¹
SKA (Störung) ⁴⁾	3	10 ⁻¹²	10 ⁻⁷	100	10 ⁻⁹	2)	10 ⁻⁵	100	10 ⁻⁷
KBA (Störung) ⁴⁾	3	10 ⁻¹²	10 ⁻⁷	100	10 ⁻⁹	2)	10 ⁻⁵	100	10 ⁻⁷

¹⁾ gemäss Nagra (2014b), Dossier VI werden aufgrund der Erfahrungen betreffend Abhängigkeit der hydraulischen Eigenschaften der Gesteine vom Tonmineralgehalt die lithofaziellen Einheiten für die Modellkonzepte für die Beurteilung der Barrierenwirksamkeit in 3 Kategorien eingeteilt:

Kategorie 1: durchschnittlicher Tonmineralgehalt > 40 Gew.-%, hohes Selbstabdichtungsvermögen, allfällige Trennflächensysteme sind hydraulisch nicht wirksam

Kategorie 2: durchschnittlicher Tonmineralgehalt im Bereich 20 – 40 Gew.-%, mässig gutes Selbstabdichtungsvermögen, gewisse hydraulische Wirksamkeit von allfälligen Trennflächen kann nicht ausgeschlossen werden

Kategorie 3: durchschnittlicher Tonmineralgehalt < 20 Gew.-%, geringes Selbstabdichtungsvermögen, allfällige Trennflächensysteme haben Potenzial für stark erhöhte hydraulische Wirksamkeit

²⁾ erhöhte Wasserführung erfolgt entlang von Störungen

³⁾ Wasserführung erfolgt entlang von Trennflächen mit typischen Abständen von 1/f = 1 m und Transmissivitätswerten von 3 × 10⁻¹³ m²/s (Referenzwert) oder 10⁻¹¹ m²/s (oberer Eckwert) bzw. als alternative Konzeptualisierung mit typischen Abständen von 1/f = 10 m und Transmissivitätswerten von T = 3 × 10⁻¹² m²/s

⁴⁾ Transmissivitätswerte gelten für massive SKA und KBA (mehrere Meter Mächtigkeit); als alternative Konzeptualisierung erfolgt die Wasserführung in Klüften mit typischen Abständen von 1/f = 1 m und einem Transmissivitätswert von T = 10⁻⁹ m²/s

3.2 Wirtgesteinspezifische Dosisberechnungen für das SMA-Lager

Für die Wirtgesteine Opalinuston, Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger' und Effinger Schichten werden Dosisberechnungen durchgeführt, welche ausgehend vom Referenzfall die vom ENSI (ENSI 2010a) festgelegten Rechenfälle für das standardisierte Parametervariationsverfahren berücksichtigen (vgl. Tab. 2.1-4) und zusätzlich auch die Konzeptualisierung des "für die Einengung massgebenden Falls" einbeziehen. Dabei wird angenommen, dass das SMA-Inventar vollumfänglich im jeweils betrachteten Wirtgestein eingelagert wird. Die Dosisberechnungen berücksichtigen die standortspezifische Konfiguration der Wirt- und Rahmengesteine; dabei wird nur derjenige Anteil der oberen Rahmengesteine berücksichtigt, für welchen die tonärmeren Schichten mehr als 300 m Überdeckung und die tonreicheren Schichten mehr als 200 m Überdeckung aufweisen (ergibt die "nutzbare Mächtigkeit")⁵⁷.

Die Dosisberechnungen basieren auf der vereinfachenden Annahme, dass im Porenwasser gelöste Radionuklide vom geologischen Tiefenlager durch die Wirt- bzw. Rahmengesteine transportiert werden und von dort direkt (d.h. ohne weitere Rückhaltung) in die Biosphäre gelangen. Separat durchgeführte Systemanalysen zeigen, dass mit einer geeigneten Lagerauslegung alle lagerbedingten Einflüsse auf die Radionuklidfreisetzung klein gehalten werden können; diese werden deshalb in den Dosisberechnungen für die Festlegung der prioritären Wirtgesteine in Etappe 2 nicht explizit berücksichtigt. Ein weiteres wichtiges Resultat der Systemanalysen zeigt, dass der Radionuklidtransport entlang der Untertagebauwerke im Vergleich zu demjenigen durch die Wirt- bzw. Rahmengesteine vernachlässigbar ist, deshalb werden in den Dosisberechnungen nur Freisetzungspfade in den Wirt- bzw. Rahmengesteinen betrachtet.

Das für die Dosisberechnungen verwendete Modellsystem besteht aus den folgenden drei Teilsystemen:

- Das *Nahfeld* umfasst eine einzelne SMA- oder LMA-Lagerkammer, bzw. einen einzelnen BE- oder HAA-Behälter inkl. zugehöriger Lagerstollen mit Bentonitverfüllung sowie das unmittelbare geologische Umfeld.
- Die *Geosphäre* enthält jene Bereiche des Wirt- bzw. Rahmengesteins, welche gemäss den geologischen Konzeptvorstellungen für die Barrierenwirkung massgebend sind.
- Die *Biosphäre* wird nicht als Teil der Barrierensysteme der geologischen Tiefenlager betrachtet. Sie wird benötigt, um die Freisetzung von Radionukliden aus der Geosphäre in eine Dosis umzurechnen. Dabei wird die Strahlenexposition von Einzelpersonen als typischen Vertretern der potenziell am meisten betroffenen Bevölkerungsgruppe betrachtet.

Die detaillierten Unterlagen zu den Dosisberechnungen sowie die Resultate der durchgeführten Berechnungen sind in Nagra (2014a) dargestellt und werden dort auch diskutiert. Alle Resultate der Dosisberechnungen und die zugehörigen Inputparameter sind im elektronischen Daten- und Resultate-Ordner enthalten (Nagra 2014g).

Nachfolgend werden die für die Festlegung der prioritären Wirtgesteine relevanten Resultate der Dosisberechnungen diskutiert: Zunächst werden die Ergebnisse der Dosisberechnungen im Hinblick auf die Ermittlung der charakteristischen Dosisintervalle für diejenigen Standortgebiete für das SMA-Lager diskutiert, in denen mehr als ein Wirtgestein vorkommt. Danach werden aus den Dosisberechnungen Hinweise für die qualitative Bewertung ausgewählter Indikatoren abgeleitet.

⁵⁷ Die Vorgaben zur Überdeckung entsprechen den Anforderungen zur Gesteins-Dekompression aus Etappe 1 (vgl. Nagra 2008d), weitere Hinweise zur erforderlichen Überdeckung finden sich in Nagra (2014b, Dossier IV und VI).

3.2.1 Charakteristische Dosisintervalle

Die Resultate der Dosisberechnungen (Referenzfall, ENSI-Fälle, massgebender Fall für Eingung) sind in der Übersicht in Fig. 3.2-1 dargestellt; eine zusammenfassende Darstellung der wirtgesteinsspezifischen Dosisintervalle ist in Fig. 3.2-2 enthalten; die detaillierten Abbildungen der Dosiskurven für die einzelnen Wirtgesteine sind in Fig. 3.2-3 bis 3.2-8 abgebildet⁵⁸. Der berechnete Dosisverlauf wird in diesem Kapitel und in Kapitel 4.3 gemäss Vorgabe des ENSI (2010a) bis zum Zeitpunkt 10 Millionen Jahre (HAA-Lager und Kombilager) bzw. bis 1 Million Jahre (SMA-Lager) nach Lagerverschluss dargestellt, wobei das Zeitfenster nach Ablauf des jeweiligen Betrachtungszeitraums grau hinterlegt ist. In Übereinstimmung mit den Darstellungen in den bisherigen sicherheitstechnischen Berichten der Nagra sind Dosiswerte in den detaillierten Dosiskurven im Bereich zwischen 10^{-7} mSv/a und 10^{-9} mSv/a ebenfalls grau hinterlegt; die Teile der Dosiskurven unterhalb von 10^{-9} mSv/a sind bedeutungslos und werden deshalb nicht abgebildet⁵⁹.

Bei der folgenden Diskussion liegt der Fokus auf den geologischen Standortgebieten für das SMA-Lager, in denen mehr als ein Wirtgestein vorkommt (Zürich Nordost, Nördlich Lägern, Jura-Südfuss).

Die Resultate bestätigen, dass alle hier betrachteten Wirtgesteine für das SMA-Lager sicherheitstechnisch geeignet sind (d.h. alle Dosismaxima liegen unterhalb des Schutzkriteriums von 0.1 mSv/a). Darüber hinaus zeigen die Resultate auch, dass alle hier betrachteten Wirtgesteine sicherheitstechnisch gleichwertig sind (d.h. alle Dosismaxima liegen unterhalb der in der Strahlenschutzverordnung (StSV 1994) festgelegten Grenze von 0.01 mSv/a, unterhalb derer auf eine weitere Optimierung verzichtet werden darf). Bei einer Einlagerung des gesamten SMA-Inventars in den Effinger Schichten liegt allerdings der obere Rand des Dosisintervalls praktisch bei der StSV-Grenze von 0.01 mSv/a, d.h. die Sicherheitsmarge ist hier am kleinsten. Die charakteristischen Dosisintervalle für den 'Braunen Dogger' fallen um ca. eine halbe Grössenordnung tiefer aus als diejenigen für die Effinger Schichten. Die Dosisintervalle für den Opalinuston liegen nochmals tiefer, d.h. die Sicherheitsmarge fällt hier deutlich grösser aus als bei den Effinger Schichten und beim 'Braunen Dogger'. Auch hier gibt es allerdings klare Unterschiede; der Opalinuston als Wirtgestein führt in den Standortgebieten Zürich Nordost und Nördlich Lägern zu den tiefsten charakteristischen Dosisintervallen; für das Standortgebiet Jura-Südfuss liegt der obere Rand deutlich höher.

Die Analyse der Dosiskurven sowie der dazugehörigen Inputdaten (konzeptuelle Modelle, hydraulische Eigenschaften der lithofaziellen Einheiten) ergibt folgendes Bild:

Die Dosiskurven und -maxima für die Standortgebiete Zürich Nordost und Nördlich Lägern fallen für den Opalinuston ähnlich tief aus, vgl. Fig. 3.2-4 und 3.2-6. Sowohl beim Referenzfall als auch bei den alternativen Fällen wird die Radionuklidfreisetzung wesentlich durch die Länge der massgebenden Freisetzungspfade in tonmineralreichen lithofaziellen Einheiten geprägt (insbesondere Opalinuston und Toniger Lias; der Arietenkalk im Liegenden verhindert einen längeren Freisetzungspfad). Im Gegensatz dazu fallen die Dosismaxima für den Opalinuston im Standortgebiet Jura-Südfuss höher aus (Fig. 3.2-8), da der Kalkige Lias nicht zur Barrierenwirkung beiträgt und die Länge des massgebenden Freisetzungspfads daher sowohl im Referenzfall als auch in den darauf basierenden alternativen Rechenfällen deutlich kürzer ausfällt als in den Standortgebieten Zürich Nordost und Nördlich Lägern. Hingegen sind die Dosis-

⁵⁸ Die detaillierten Dosiskurven enthalten zur Illustration auch Rechenfälle, die nicht für die Bestimmung der charakteristischen Dosisintervalle verwendet werden (vgl. Nagra 2014a).

⁵⁹ Siehe zur Erläuterung die Diskussion in Nagra (2002a), Kapitel 7.2.

kurven für den "massgebenden Fall für die Einengung" für den Opalinuston in allen drei Standortgebieten identisch, da hier eine einheitliche Länge für den massgebenden Freisetzungspfad von 40 m angenommen wurde.

Für den 'Braunen Dogger' fallen die höchsten Dosismaxima in den Standortgebieten Zürich Nordost und Nördlich Lägern bedeutend höher aus als für den Opalinuston (vgl. Fig. 3.2-3 und 3.2-5). Dies ist ebenso auf die Länge der massgebenden Freisetzungspfade zurückzuführen, welche insbesondere im "massgebenden Fall für die Einengung" lediglich ca. 13 – 14 m beträgt, während diese für den Opalinuston 40 m beträgt. In den günstigeren Rechenfällen sind die Unterschiede zwischen Opalinuston und 'Braunem Dogger' jedoch kleiner. Für die Effinger Schichten fallen die Dosismaxima in allen Rechenfällen bedeutend höher aus als in den entsprechenden Rechenfällen für den Opalinuston (Fig. 3.2-7), was auch hier auf die kürzeren Längen der massgebenden Transportpfade, aber auch auf insgesamt deutlich ungünstigere Transporteigenschaften (insbesondere Art der Transportpfade sowie hydraulische Eigenschaften) zurückzuführen ist.

Im Falle des Opalinustons und der Tonigen Abfolgen innerhalb des 'Braunen Doggers' wird die Radionuklidfreisetzung durch Diffusion dominiert; dies zeigt sich daran, dass die höchsten Dosismaxima in den Rechenfällen mit ungünstigen Diffusionskoeffizienten in der Geosphäre und/oder in den Rechenfällen mit kurzen Transportpfadlängen innerhalb von tonmineralreichen lithofaziellen Einheiten auftreten. Zur letzteren Kategorie zählt der "massgebende Fall für die Einengung" (Vernachlässigung der Beiträge der Rahmengesteine zur Barrierenwirkung), aber auch die Rechenfälle mit geringeren Mächtigkeiten aller lithofaziellen Einheiten bzw. mit Freisetzungspunkt direkt angrenzend an den Opalinuston bzw. an die Tonige Abfolge innerhalb des 'Braunen Doggers', in der die Lagerkammern platziert werden.

Im Falle der Effinger Schichten erfolgt die Radionuklidfreisetzung teils diffusiv, teils advektiv; dies zeigt sich daran, dass die höchsten Dosismaxima einerseits für den Rechenfall mit erhöhtem Wasserfluss und andererseits für die Rechenfälle mit ungünstigen Diffusionskoeffizienten in der Geosphäre und/oder in den Rechenfällen mit kurzen Transportpfadlängen innerhalb von Kalkmergelabfolgen resultieren.

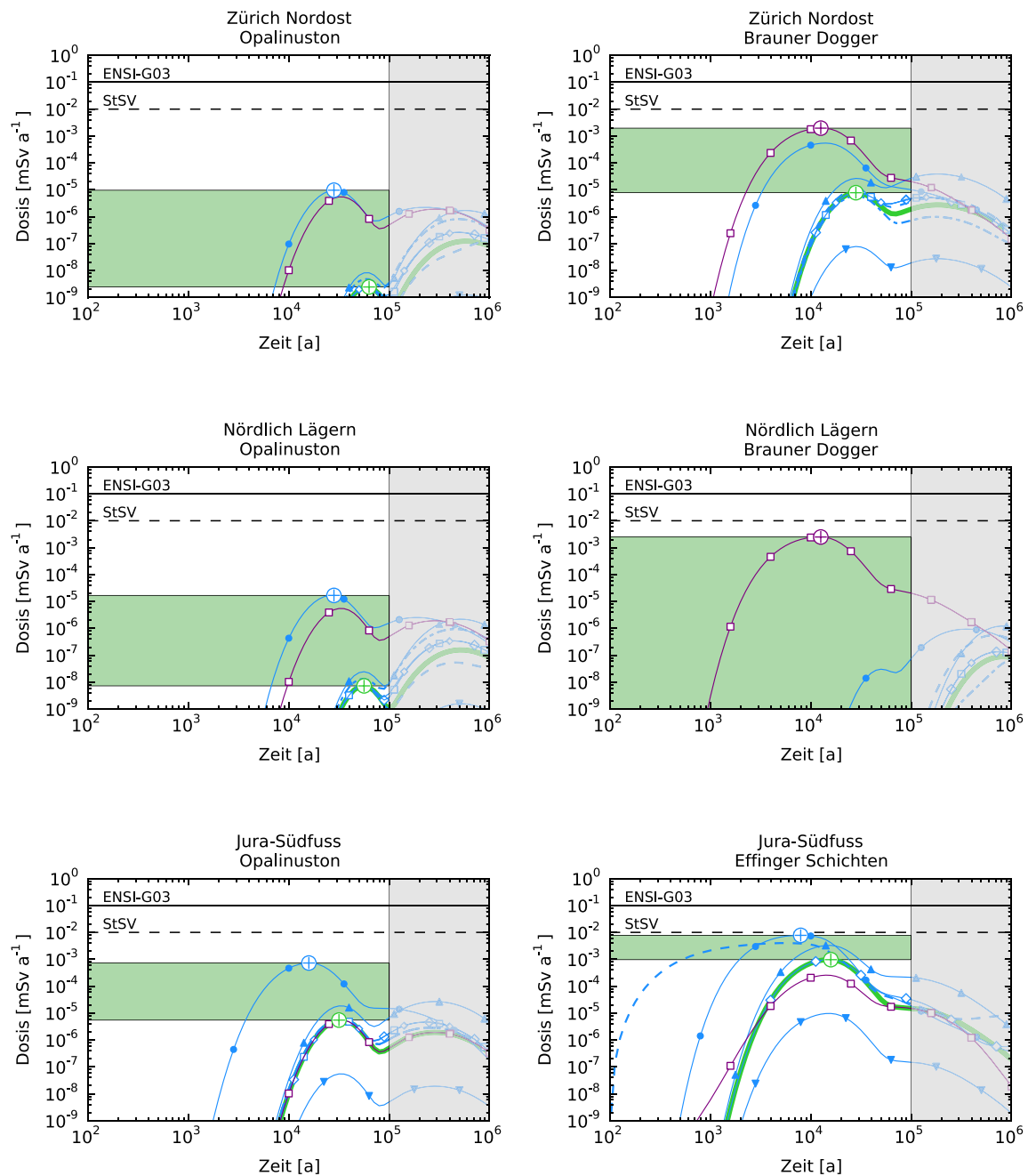


Fig. 3.2-1: Übersicht der wirtgesteinsspezifischen Dosiskurven für das SMA-Lager für die verschiedenen Standortgebiete, in denen mehr als ein Wirtgestein vorkommt, sowie die resultierenden charakteristischen Dosisintervalle, vgl. Nagra (2014a).

Darstellung der Dosiskurven für die Referenzfälle (grün) und die ENSI-Fälle (blau) gemäss den Vorgaben des ENSI (2010a) sowie die "massgebenden Fälle für die Einengung" (violett) pro Standortgebiet. Als "ENSI-Fälle" werden die in ENSI (2010a) für das standardisierte Parametervariationsverfahren definierten Rechenfälle bezeichnet. Der für die Dosisberechnungen verwendete "massgebende Fall für die Einengung" wurde in Kap. 3.1 definiert. Die resultierenden charakteristischen Dosisintervalle sind als horizontale grüne Balken dargestellt. Der grau markierte Bereich kennzeichnet den Zeitraum nach Ablauf des Betrachtungszeitraums.

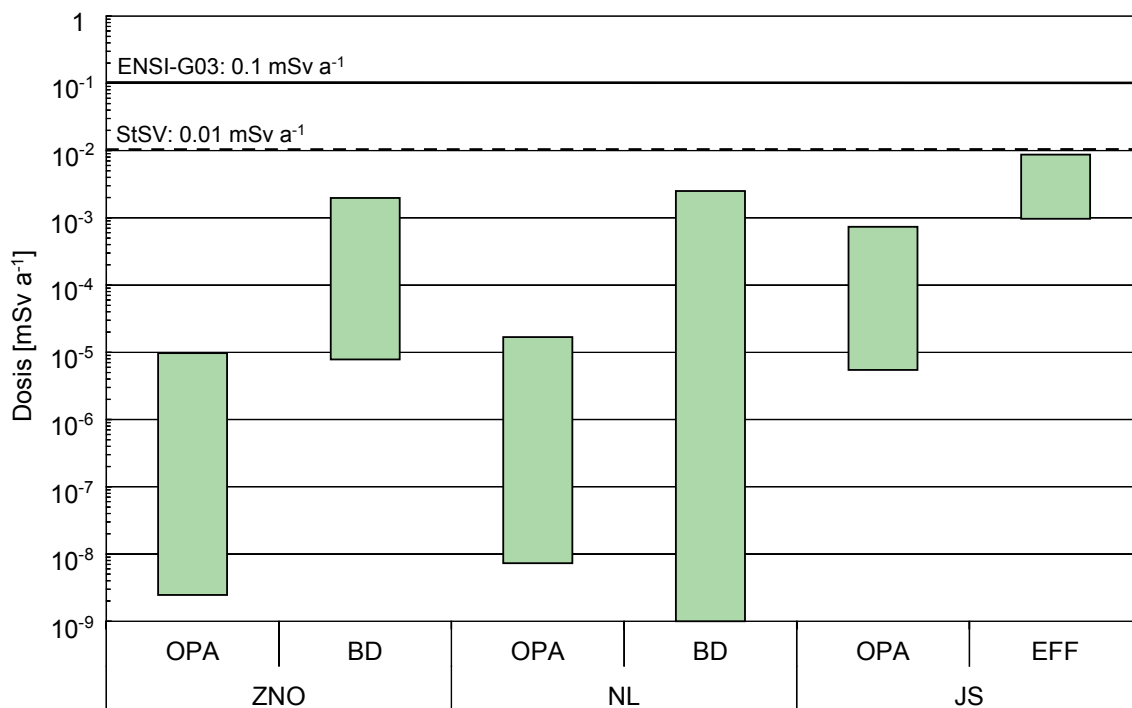


Fig. 3.2-2: Zusammenfassende Darstellung der charakteristischen Dosisintervalle für die Wirtgesteine für das SMA-Lager für diejenigen Standortgebiete, in denen mehr als ein Wirtgestein vorkommt, vgl. Nagra (2014a).

Die charakteristischen Dosisintervalle ergeben sich aus den Dosismaxima für den Referenzfall (unterer Rand) und für den Rechenfall mit den höchsten Dosen (oberer Rand) innerhalb des Betrachtungszeitraums, wobei nur die ENSI-Fälle und der "massgebende Fall für die Einengung" verwendet werden und das Referenz-Inventar für das SMA-Lager vollumfänglich im jeweiligen Wirtgestein eingelagert wird (vgl. auch Fig. 3.2-1).

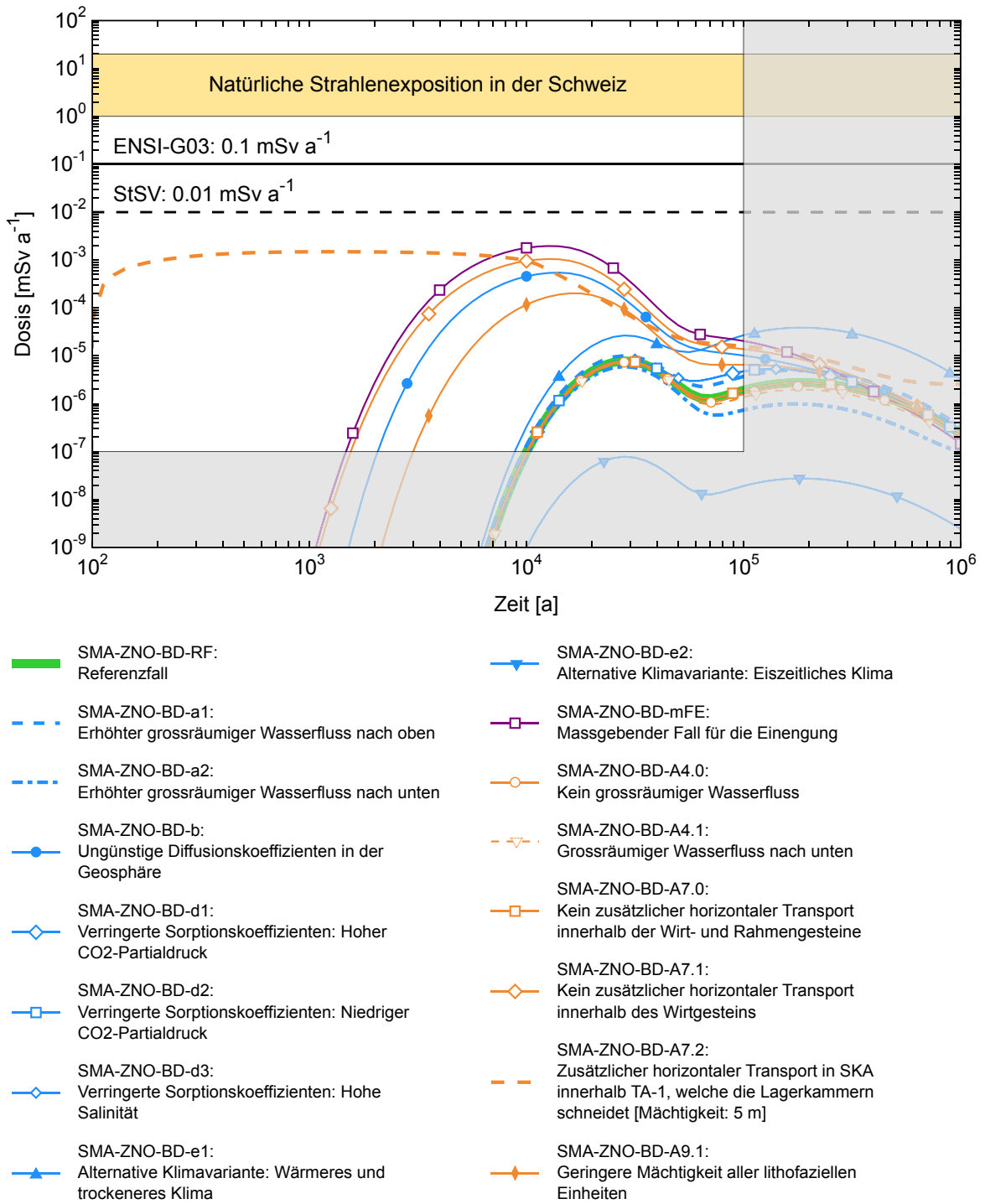


Fig. 3.2-3: Dosiskurven für das SMA-Lager mit dem Wirtgestein Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger' im Standortgebiet Zürich Nordost (SMA-ZNO-BD), vgl. Nagra (2014a).

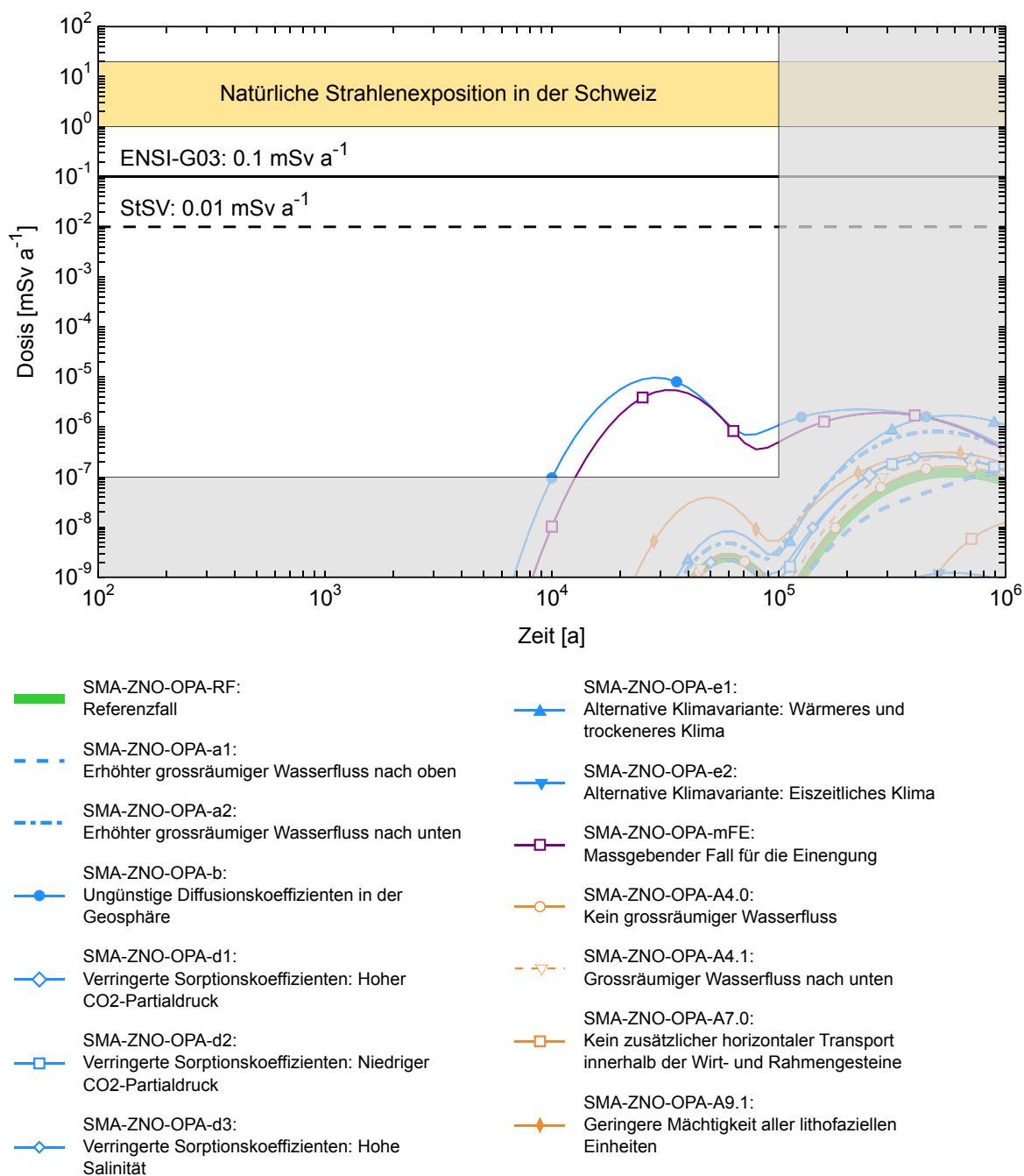


Fig. 3.2-4: Dosiskurven für das SMA-Lager mit dem Wirtgestein Opalinuston im Standortgebiet Zürich Nordost (SMA-ZNO-OPA), vgl. Nagra (2014a).

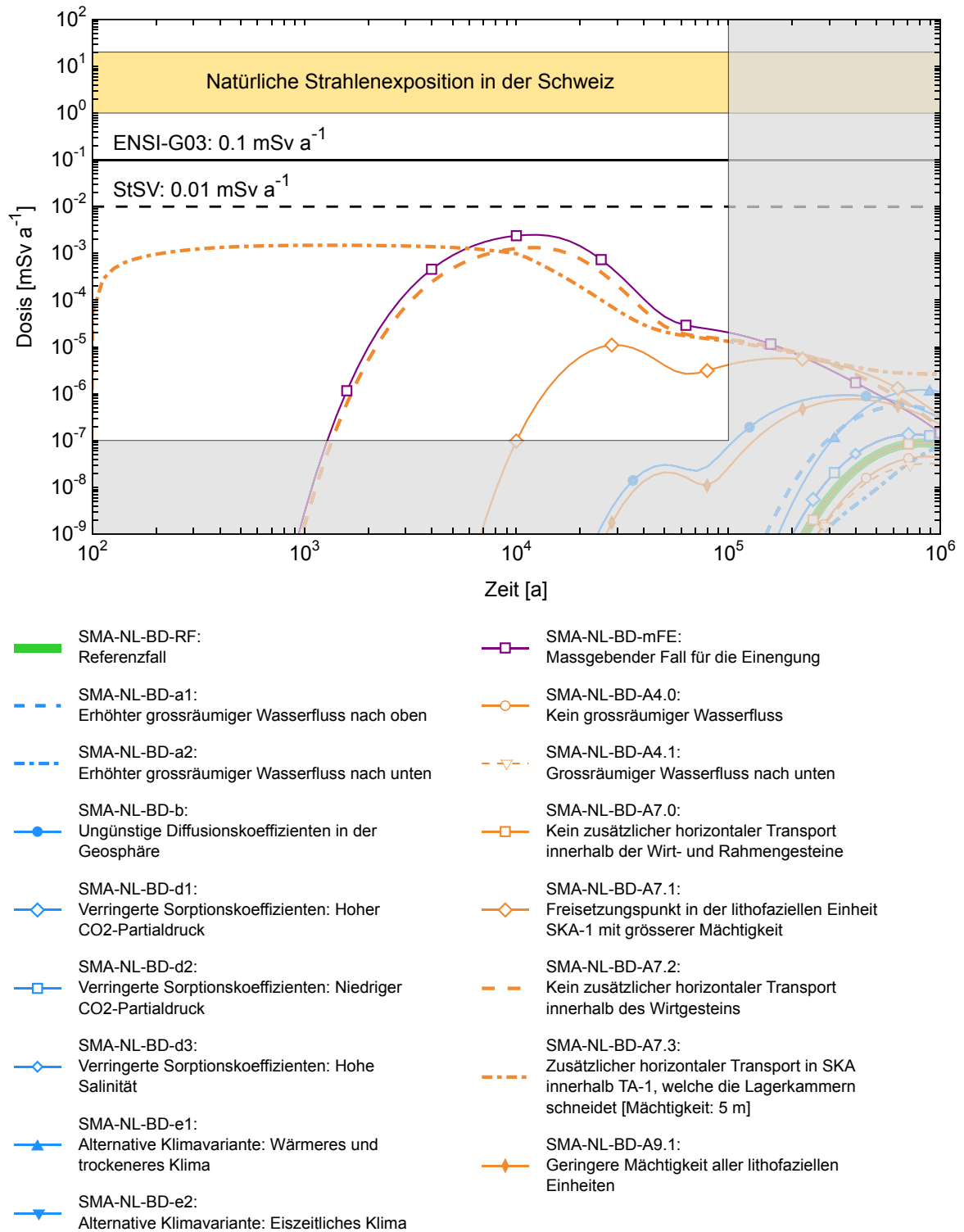


Fig. 3.2-5: Dosiskurven für das SMA-Lager mit dem Wirtgestein Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger' im Standortgebiet Nördlich Lägern (SMA-NL-BD), vgl. Nagra (2014a).

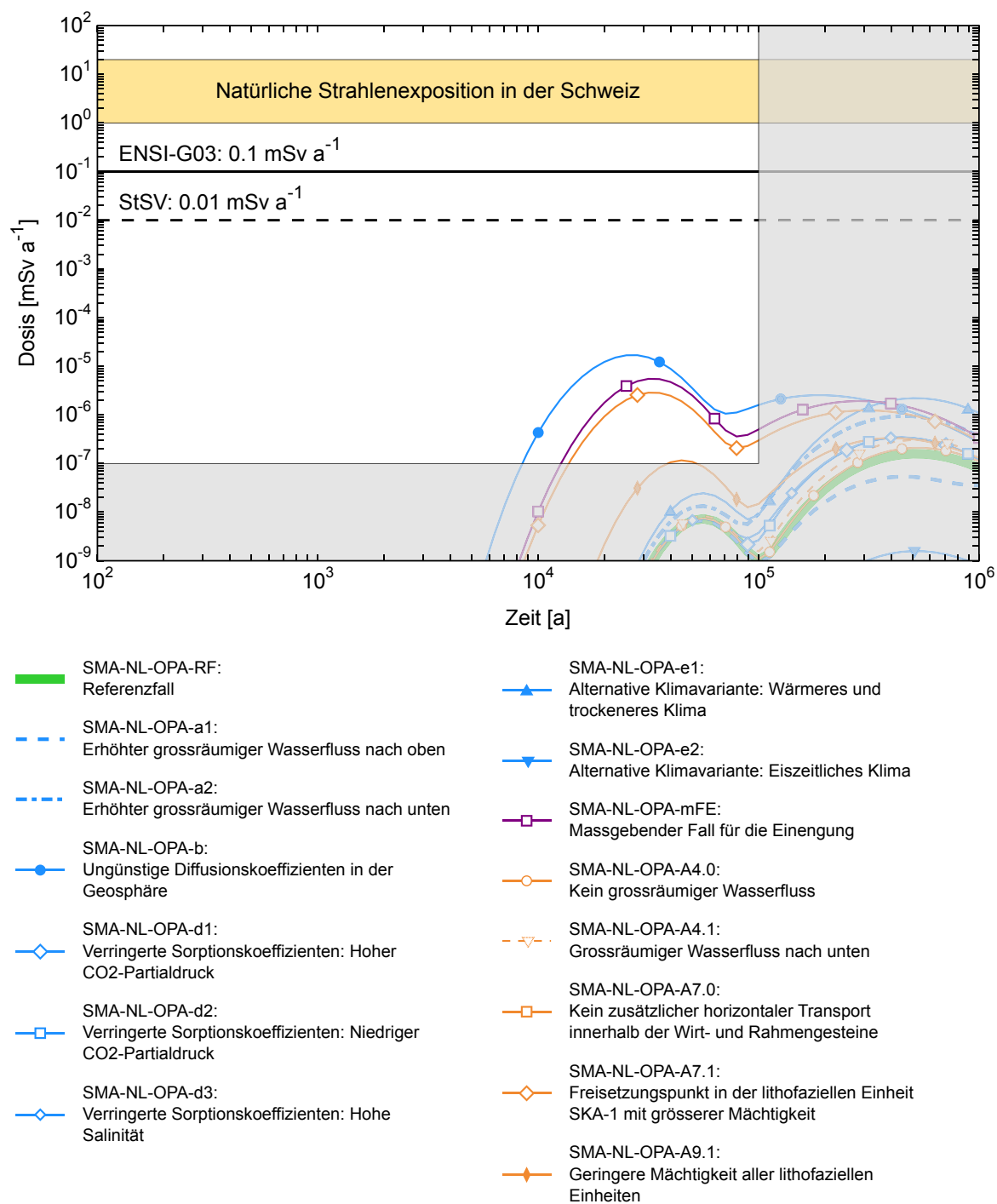


Fig. 3.2-6: Dosiskurven für das SMA-Lager mit dem Wirtgestein Opalinuston im Standortgebiet Nördlich Lägern (SMA-NL-OPA), vgl. Nagra (2014a).

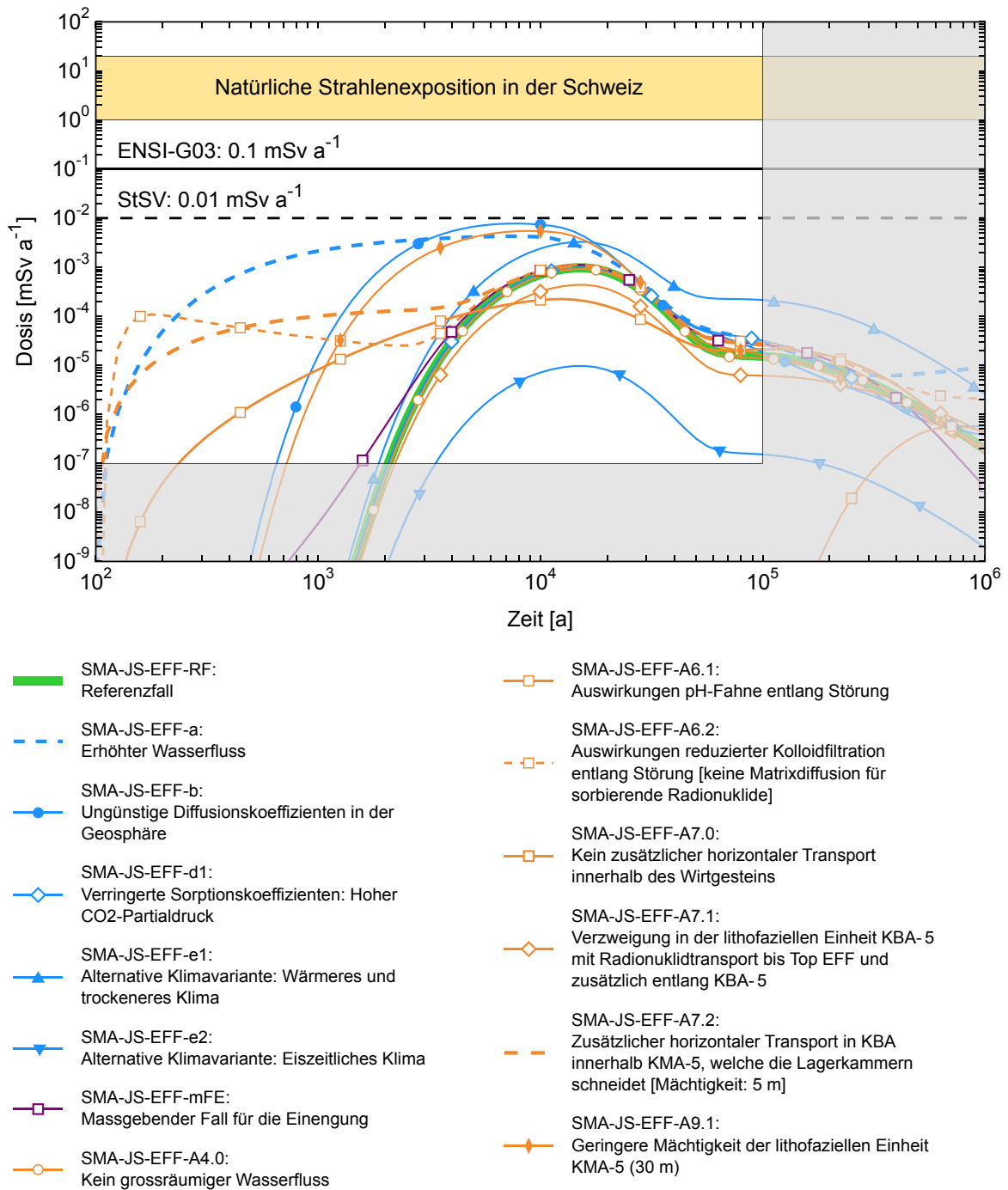


Fig. 3.2-7: Dosiskurven für das SMA-Lager mit dem Wirtgestein Effinger Schichten im Standortgebiet Jura-Südfuss (SMA-JS-EFF), vgl. Nagra (2014a).

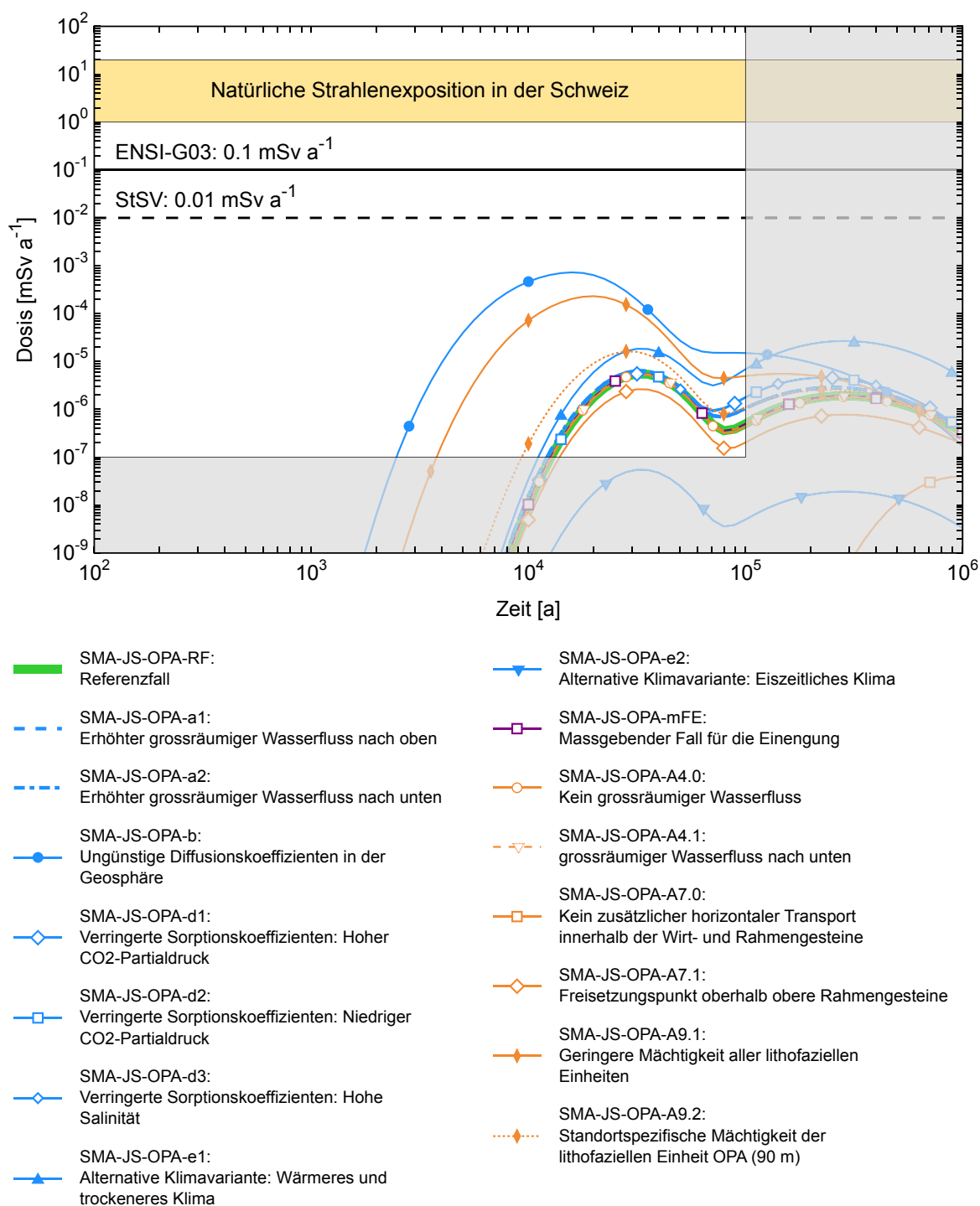


Fig. 3.2-8: Dosiskurven für das SMA-Lager mit dem Wirtgestein Opalinuston im Standortgebiet Jura-Südfuss (SMA-JS-OPA), vgl. Nagra (2014a).

3.2.2 Hinweise aus den Dosisberechnungen für die qualitative Bewertung ausgewählter Indikatoren

Nachfolgend werden aus den Dosisberechnungen Hinweise für die qualitative Bewertung ausgewählter Indikatoren abgeleitet. Dabei handelt es sich um diejenigen Indikatoren, welche in Tab. 2.3-2 und 2.3-3 mit dem Symbol '+' gekennzeichnet sind: 'Mächtigkeit', 'Hydraulische Durchlässigkeit', 'Art der Transportpfade und Ausbildung des Porenraums', 'Transmissivität präferenzierter Freisetzungspfade' und 'Länge der massgebenden Freisetzungspfade'. Die Ableitung von Hinweisen für die qualitative Bewertung des Indikators 'Mächtigkeit' erfolgt anhand standortspezifischer Dosisberechnungen in Kap. 4.4.

Für jeden der oben genannten Indikatoren werden jeweils pro Wirtgestein geeignete Rechenfälle herangezogen, um für den betrachteten Indikator in einem Vergleich der Dosismaxima die Bedeutung der entsprechenden Wirtgesteinseigenschaften für die berechneten Dosen zu erfassen und damit Hinweise für die qualitative Bewertung des betreffenden Indikators abzuleiten. In gewissen Fällen werden zur Illustration auch Parametervariationen beigezogen. Im Folgenden werden die für die verschiedenen Indikatoren relevanten Rechenfälle (Tab. 3.2-1) und die dazugehörigen Dosismaxima aufgeführt (Tab. 3.2-2 bis 3.2-4) und diskutiert.

Tab. 3.2-1: Verwendung von Rechenfällen zur Ableitung von Hinweisen für die qualitative Bewertung ausgewählter Indikatoren (vgl. Nagra 2014a).

- 1) nur bei ungefähr vergleichbarer Länge des massgebenden Freisetzungspfades
- 2) mit gegenüber dem Referenzfall veränderter Konzeptualisierung der Transportpfade in den Effinger Schichten und in den Mergel-Formationen des Helvetikums
- 3) mit gegenüber dem Referenzfall veränderter Konzeptualisierung der Transportpfade (Wirtgestein Helvetische Mergel)

I-Nr.	Indikator	Art der verwendeten Rechenfälle	Anwendung
I-5	'Mächtigkeit'	Referenzfall (RF), inkl. Fall mit realistischem Wert für Länge des massgebenden Freisetzungspfades von $L = 35$ m für Standortgebiet Jura-Südfuss (RF*) alternativer Referenzfall (a-RF) massgebender Fall für die Einengung (mFE) massgebender Fall für die Einengung, ausgewertet mit unteren Eckwerten für Mächtigkeit WG (mFE-uE)	Bewertung der Standortgebiete
I-9	'Hydraulische Durchlässigkeit'	Referenzfall ¹⁾ (RF) ENSI-Fall a ¹⁾ (ENSI-a)	Bewertung der Wirtgesteine
I-17	'Art der Transportpfade und Ausbildung des Porenraums'	Referenzfall (RF) massgebender Fall für die Einengung ²⁾ (mFE) alternativer massgebender Fall für die Einengung ³⁾ (a-mFE)	
I-20	'Transmissivität präferenzierter Freisetzungspfade'		
I-19	'Länge der massgebenden Freisetzungspfade'	massgebender Fall für die Einengung (mFE) massgebender Fall für die Einengung, ausgewertet mit unteren Eckwerten für Mächtigkeit WG (mFE-uE)	

Indikator 'Hydraulische Durchlässigkeit'

Tab. 3.2-2 enthält die für den Indikator 'Hydraulische Durchlässigkeit' relevanten Rechenfälle mit den dazugehörigen Dosismaxima. Hier liegt der Fokus auf den ENSI-Fällen a (erhöhter Wasserfluss durch den Tiefenlagerbereich – oberer Eckwert); zu Vergleichszwecken werden auch die Resultate des jeweiligen Referenzfalls gezeigt. Die Wirtgesteine Opalinuston und 'Brauner Dogger' weisen sehr niedrige Dosismaxima auf (10^{-5} mSv/a oder weniger)⁶⁰. Im Quervergleich zeigen die Effinger Schichten und die Mergel-Formationen des Helvetikums (letztere nur für den ENSI-Fall a) deutlich höhere Dosismaxima im Bereich von einigen 10^{-3} mSv/a auf, wobei bei den Effinger Schichten auch die geringe Länge des massgebenden Freisetzungspfads von 16 m zu diesem Ergebnis beiträgt.

Fazit: Die Ergebnisse der Dosisberechnungen zeigen für den Opalinuston und den 'Braunen Dogger' mit ihren sehr kleinen Durchlässigkeiten eine sehr gute Barrierenwirkung, während die Effinger Schichten in allen Fällen und die Mergel-Formationen des Helvetikums in den Rechnungen mit höheren Durchlässigkeiten eine etwas weniger gute Barrierenwirkung aufweisen; dies ist in Übereinstimmung mit der in Kap. 3.3 vorgenommenen qualitativen Bewertung für den Indikator 'Hydraulische Durchlässigkeit'⁶¹.

⁶⁰ Die Unterschiede in den Dosismaxima zwischen den verschiedenen Rechenfällen für die Wirtgesteine Opalinuston und 'Brauner Dogger' lassen sich alle mit den unterschiedlichen Längen L der massgebenden Freisetzungspfade erklären (vgl. Tab. 3.2-2).

⁶¹ In Kap. 3.3 werden der Opalinuston und der 'Braune Dogger' bzgl. des Indikators 'Hydraulische Durchlässigkeit' mit *sehr günstig* bewertet, die Effinger Schichten und die Mergel-Formationen des Helvetikums mit *günstig*.

Tab. 3.2-2: Dosismaxima für Rechenfälle zur Ableitung von Hinweisen für die qualitative Bewertung des Indikators 'Hydraulische Durchlässigkeit' bei der Bewertung der Wirtgesteine (vgl. Nagra 2014a).

Die Art der verwendeten Rechenfälle (inkl. Abkürzungen) ist in Tab. 3.2-1 festgelegt.

K: hydraulische Durchlässigkeit

L: Länge des massgebenden Freisetzungspfads

D_{\max} : maximale Dosis des betreffenden Rechenfalls

Einstufung: dunkelgrün: tiefe maximale Dosen; hellgrün: erhöhte maximale Dosen

Wirtgestein	Standort- gebiet	Rechenfall	K [m/s]	L [m]	D_{\max} [mSv/a]
OPA	SR	RF	10^{-13}	40	3.8×10^{-6}
		ENSI-a	3×10^{-13}	40	7.4×10^{-6}
	ZNO	RF	2×10^{-14}	72	2.5×10^{-9}
		ENSI-a	10^{-13}	72	2.3×10^{-9}
	NL	RF	2×10^{-14}	67	7.3×10^{-9}
		ENSI-a	10^{-13}	67	6.8×10^{-9}
	JO	RF	2×10^{-14}	40	2.8×10^{-6}
		ENSI-a	10^{-13}	40	3.8×10^{-6}
JS	RF	2×10^{-14}	40	5.5×10^{-6}	
	ENSI-a	10^{-13}	40	6.5×10^{-6}	
BD	ZNO	RF	2×10^{-14}	31	7.8×10^{-6}
		ENSI-a	10^{-13}	31	1×10^{-5}
	NL	RF	2×10^{-14}	104	4.3×10^{-13}
		ENSI-a	10^{-13}	104	8.5×10^{-12}
EFF	JS	RF	10^{-12}	16	9.7×10^{-4}
		ENSI-a	10^{-11}	16	4.3×10^{-3}
MG	WLB	RF	3×10^{-13}	100	3.2×10^{-6}
		ENSI-a	10^{-11}	100	4.7×10^{-3}

Indikatoren 'Art der Transportpfade und Ausbildung des Porenraums' und 'Transmissivität präferenzierter Freisetzungspfade'

In Tab. 3.2-3 sind die für die Indikatoren 'Art der Transportpfade und Ausbildung des Porenraums' und 'Transmissivität präferenzierter Freisetzungspfade' relevanten Rechenfälle mit den dazugehörigen Dosismaxima aufgeführt. Hier liegt der Fokus der Dosisberechnungen auf dem "massgebenden Fall für die Einengung" mit gegenüber dem Referenzfall⁶² veränderter Konzeptualisierung der Transportpfade für die Effinger Schichten und für die Mergel-Formationen des Helvetikums, bei denen eine solche alternative Konzeptualisierung nicht ausgeschlossen werden kann. Zu Vergleichszwecken werden auch jeweils die Resultate des Referenzfalls und auch Resultate für die als äquivalent poröse Medien charakterisierten Wirtgesteine Opalinuston und 'Brauner Dogger' gezeigt⁶³. Die Rechenfälle mit dem Ansatz eines äquivalent porösen Mediums ergeben alle sehr niedrige Dosismaxima.

Bei den Effinger Schichten werden die Dosismaxima auch durch die sehr geringe Länge des massgebenden Freisetzungspfads von 16 m beeinflusst; diese Länge ist zu kurz, um eine belastbare negative Aussage über die Bedeutung der Indikatoren 'Art der Transportpfade und Ausbildung des Porenraums' und 'Transmissivität präferenzierter Freisetzungspfade' zu machen⁶⁴. Hier ergeben der Referenzfall und der "massgebende Fall für die Einengung" vergleichbare Dosismaxima, bei gleicher Länge des massgebenden Freisetzungspfads und unterschiedlicher Konzeptualisierung der Freisetzungspfade.

Bei den Mergel-Formationen des Helvetikums ergibt der hier relevante Rechenfall (zusätzlicher Transport in Störungen bei einer Länge des massgebenden Freisetzungspfads von 100 m) eine erhöhte maximale Dosis von ca. 2×10^{-3} mSv/a.

Fazit: Die Ergebnisse der Dosisberechnungen zeigen für den Opalinuston und den 'Braunen Dogger' mit ihren sehr kleinen Durchlässigkeiten eine sehr gute Barrierenwirkung, während die Mergel-Formationen des Helvetikums in den Rechnungen mit "geklüfteten Medien" eine etwas weniger gute Barrierenwirkung aufweisen; dies ist in Übereinstimmung mit der in Kap. 3.3 vorgenommenen qualitativen Bewertung der Indikatoren 'Art der Transportpfade und Ausbildung des Porenraums' und 'Transmissivität präferenzierter Freisetzungspfade'⁶⁵. Für die Effinger Schichten kann wegen der kurzen Länge des massgebenden Freisetzungspfads keine eindeutige Aussage gemacht werden; im Sinne der Vorsicht wird die günstige Bewertung beibehalten.

⁶² Die Referenz-Konzeptualisierung der Effinger Schichten und der Mergel-Formationen des Helvetikums gehen von einem äquivalent porösen Medium aus.

⁶³ Für den Opalinuston und den 'Braunen Dogger' gibt es keine alternativen Konzeptualisierungen für die Art der Transportpfade.

⁶⁴ Vergleiche auch Nagra (2008d), Anhang 5, wo man sieht, dass beim SMA-Lager bei Transportpfadlängen von weniger als ca. 20 m die Dosismaxima auch für poröse Medien deutlich ansteigen.

⁶⁵ In Kap. 3.3 werden der Opalinuston und der 'Braune Dogger' bzgl. der Indikatoren 'Art der Transportpfade und Ausbildung des Porenraums' und 'Transmissivität präferenzierter Freisetzungspfade' mit *sehr günstig* bewertet, die Effinger Schichten und die Mergel-Formationen des Helvetikums mit *günstig*.

Tab. 3.2-3: Dosismaxima für Rechenfälle zur Ableitung von Hinweisen für die qualitative Bewertung der Indikatoren 'Art der Transportpfade und Ausbildung des Porenraums' und 'Transmissivität präferenzierter Freisetzungspfade' bei der Bewertung der Wirtgesteine (vgl. Nagra 2014a).

Die Art der verwendeten Rechenfälle (inkl. Abkürzungen) ist in Tab. 3.2-1 festgelegt.

K: hydraulische Durchlässigkeit

L: Länge des massgebenden Freisetzungspfads

D_{\max} : maximale Dosis des betreffenden Rechenfalls

a-mFE*: modifizierter alternativer mFE mit einer Transportpfadlänge von 100 m

Einstufung: dunkelgrün: tiefe maximale Dosen; hellgrün: erhöhte maximale Dosen

Wirtgestein	Standort- gebiet	Rechenfall	K [m/s]	L [m]	D_{\max} [mSv/a]
OPA	SR	RF	10^{-13}	40	3.8×10^{-6}
	ZNO	RF	2×10^{-14}	72	2.5×10^{-9}
	NL	RF	2×10^{-14}	67	7.3×10^{-9}
	JO	RF	2×10^{-14}	40	2.8×10^{-6}
	JS	RF	2×10^{-14}	40	5.5×10^{-6}
BD	ZNO	RF	2×10^{-14}	31	7.8×10^{-6}
	NL	RF	2×10^{-14}	104	4.3×10^{-13}
EFF	JS	RF	10^{-12}	16	9.7×10^{-4}
		mFE	2×10^{-12}	16	1.1×10^{-3}
MG	WLB	RF	3×10^{-13}	100	3.2×10^{-6}
		a-mFE*	10^{-12}	100	2.0×10^{-3}

Indikator 'Länge der massgebenden Freisetzungspfade'

Tab. 3.2-4 enthält die für den Indikator 'Länge der massgebenden Freisetzungspfade' relevanten Rechenfälle mit den dazugehörigen Dosismaxima. Hier liegt der Fokus der Dosisberechnungen auf dem "massgebenden Fall für die Einengung", wo nur das Wirtgestein *sensu stricto* betrachtet wird. Die Resultate zeigen für den Opalinuston und für die Mergel-Formationen des Helvetikums sehr niedrige Dosismaxima. Im Gegensatz dazu weisen die Dosisberechnungen für den 'Braunen Dogger' und für die Effinger Schichten deutlich höhere Dosismaxima auf (im Bereich von einigen wenigen 10^{-3} mSv/a); das gleiche gilt auch für die alternative Konzeptualisierung der Mergel-Formationen des Helvetikums, wo die Länge des massgebenden Freisetzungspfads bei der Radionuklidfreisetzung über boudinierte Kalkbankabfolgen in Kombination mit Störungzonen deutlich kürzer ist (20 m) und zu deutlich höheren Dosen führt⁶⁶.

Fazit: Die Ergebnisse der Dosisberechnungen zeigen für den Opalinuston und die Mergel-Formationen des Helvetikums mit ihren längeren Freisetzungspfaden eine sehr gute Barrierenwirkung, während die Effinger Schichten und der 'Braune Dogger' mit ihren kurzen Frei-

⁶⁶ Diese erhöhten Dosen werden aber teilweise auch durch die erhöhte Durchlässigkeit bzw. Transmissivität verursacht. Die *bedingt günstige* Bewertung für diese alternative Konzeptualisierung wird trotzdem beibehalten (vgl. Kap. 4.4.3.7).

setzungspfaden eine etwas weniger gute Barrierenwirkung aufweisen; dies ist in Übereinstimmung mit der in Kap. 3.3 vorgenommene qualitative Bewertung des Indikators 'Länge der massgebenden Freisetzungspfade'⁶⁷.

Tab. 3.2-4: Dosismaxima für Rechenfälle zur Ableitung von Hinweisen für die qualitative Bewertung des Indikators 'Länge der massgebenden Freisetzungspfade' bei der Bewertung der Wirtgesteine (vgl. Nagra 2014a).

Die Art der verwendeten Rechenfälle (inkl. Abkürzungen) ist in Tab. 3.2-1 festgelegt.

K: hydraulische Durchlässigkeit

L: Länge des massgebenden Freisetzungspfads

D_{max}: maximale Dosis des betreffenden Rechenfalls

Einstufung: dunkelgrün: tiefe maximale Dosen; hellgrün: erhöhte maximale Dosen

Wirtgestein	Standort- gebiet	Rechenfall	K [m/s]	L [m]	D _{max} [mSv/a]
OPA	SR	mFE	10 ⁻¹³	40	6.5 × 10 ⁻⁶
	ZNO	mFE	2 × 10 ⁻¹⁴	40	5.5 × 10 ⁻⁶
	NL	mFE	2 × 10 ⁻¹⁴	40	5.5 × 10 ⁻⁶
	JO	mFE	2 × 10 ⁻¹⁴	40	5.5 × 10 ⁻⁶
	JS	mFE	2 × 10 ⁻¹⁴	40	5.5 × 10 ⁻⁶
BD	ZNO	mFE	10 ⁻¹³	14	2.0 × 10 ⁻³
	NL	mFE	10 ⁻¹³	13	2.5 × 10 ⁻³
EFF	JS	mFE	2 × 10 ⁻¹²	16	1.1 × 10 ⁻³
MG	WLB	mFE	3 × 10 ⁻¹³	100	3.2 × 10 ⁻⁶
		mFE-uE	10 ⁻¹²	20	2.2 × 10 ⁻³

3.2.3 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Anhand der charakteristischen Dosisintervalle wurde gezeigt, dass die Wirtgesteine in den SMA-Standortgebieten mit mehr als einem Wirtgestein sicherheitstechnisch geeignet und gleichwertig sind.

Da die für die oberen Ränder der Dosisintervalle verwendeten Konzeptualisierungen und Parameterwerte vorsichtig gewählt wurden, heisst dies, dass mit diesen Rechnungen der obere Rand der Dosisintervalle zuverlässig eingegrenzt wurde.

Damit qualifizieren sich alle Wirtgesteine in den SMA-Standortgebieten mit mehr als einem Wirtgestein für den weiteren Bewertungsschritt (qualitative Bewertung) in Kap. 3.3.

⁶⁷ In Kap. 3.3 werden der Opalinuston und die Mergel-Formationen des Helvetikums bzgl. des Indikators 'Länge der massgebenden Freisetzungspfade' mit *sehr günstig* bewertet, der 'Braune Dogger' und die Effinger Schichten mit *ungünstig*. In Kap. 4.4.3.7 werden die Mergel-Formationen des Helvetikums im Rahmen einer alternativen Konzeptualisierung als *bedingt günstig* bewertet; dabei wird berücksichtigt, dass nur ein kleiner Teil der Lagerkammern durch eine verkürzte Länge des massgebenden Freisetzungspfads betroffen sein wird.

3.3 Charakterisierung und qualitative Bewertung der Wirtgesteine für das SMA- und HAA-Lager

Im vorliegenden Kapitel erfolgt die Charakterisierung und qualitative Bewertung der Wirtgesteine für das SMA- und für das HAA-Lager anhand der 24 wirtgesteinsspezifischen Indikatoren (Kap. 3.3.1 – 3.3.5 für SMA, Kap. 3.3.6 – 3.3.7 für HAA). Die Charakterisierung und qualitative Bewertung erfolgen jeweils zuerst für den "massgebenden Fall"⁶⁸; danach wird geprüft, ob und wo basierend auf den vorhandenen Ungewissheiten alternative Konzepte bestehen und zu anderen Bewertungen führen könnten.

Als Grundlage für die qualitative Bewertung dient die ausführliche geologische Beschreibung in Nagra (2014b), welche die Basis bildet für die nachfolgende kurze Charakterisierung der Wirtgesteine. Wie in Kap. 3.1.4 aufgeführt, werden für die Bewertung Beschreibungen der konzeptuellen Modelle zur Barrierenwirkung und Angaben zu den zugehörigen für die Barrierenwirkung relevanten Parameter, geometrische Angaben, Angaben zur Beständigkeit der Gesteinseigenschaften, felsmechanische Eigenschaften, Unterlagen zur Beurteilung der lagerbedingten Einflüsse und zur Beurteilung von allfälligen Nutzungskonflikten sowie Unterlagen zur Beurteilung der Explorierbarkeit und Charakterisierbarkeit benötigt, die alle in Nagra (2014b) enthalten sind. Nachfolgend wird eine kurze Übersicht über die Bewertung gegeben.

Die Bewertung der Eigenschaften der Wirtgesteine bezieht sich für die Mehrheit der Indikatoren auf denjenigen Teil des Wirtgesteins, welcher bei der Radionuklidfreisetzung den dominierenden Beitrag zur Barrierenwirkung beisteuert. Dabei handelt es sich in der Regel um die tonmineralreiche Gesteinsabfolge, innerhalb derer die Lagerkammern platziert werden⁶⁹ (vgl. Fig. 3.1-3 und Tab. 2.3-3). Bei der Bewertung der nachfolgend aufgelisteten Indikatoren wird also nur das "**Wirtgestein *sensu stricto***" (WG-ss in Tab. 2.3-3, 3.3-1 und 3.3-2) bewertet⁷⁰: 'Hydraulische Durchlässigkeit', 'Mineralogie', 'pH', 'Redox-Bedingungen', 'Salinität', 'Mikrobielle Prozesse', 'Kolloide', 'Art der Transportpfade und Ausbildung des Porenraums', 'Transmissivität präferenzierter Freisetzungspfade', 'Selbstabdichtungsvermögen', 'Länge der massgebenden Freisetzungspfade', 'Auflockerungszone im Nahbereich der Untertagebauten', 'Chemische Wechselwirkungen', 'Verhalten des Wirtgesteins bezüglich Gas', 'Verhalten des Wirtgesteins bezüglich Temperatur' (nur für HAA-Lager), 'Variabilität der Gesteinseigenschaften im Hinblick auf ihre Charakterisierbarkeit' und 'Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften'.

Bei den folgenden Indikatoren bezieht sich die Bewertung auf das **gesamte Wirtgestein** (inkl. "harte Bänke", wo vorhanden; WG in Tab. 2.3-3, 3.3-1 und 3.3-2): 'Homogenität des Gesteinsaufbaus', 'Potenzial zur Bildung neuer Wasserwegsamkeiten (Verkarstung)', 'Rohstoffvorkommen innerhalb des Wirtgesteins'⁷¹, 'Erfahrungen', 'Explorationsverhältnisse im geologischen Untergrund' und 'Unabhängige Evidenzen der Langzeitisolation'.

⁶⁸ Für die qualitative Bewertung definiert sich der "massgebende Fall für die Einengung" durch den "massgebenden Fall" des Wirtgesteins (orange Doppelpfeile in Fig. 3.1-3; als Alternative die gestrichelten orangenen Doppelpfeile; in der Bewertung durch WG-ss erfasst) und das restliche Wirtgestein bzw. die Rahmengesteine (grüne Doppelpfeile in Fig. 3.1-3; als Alternative die gestrichelten grünen Doppelpfeile, in der Bewertung durch WG bzw. EG erfasst).

⁶⁹ Dieser Teil wird mit Wirtgestein *sensu stricto* (Abkürzung WG-ss) bezeichnet; er ist Teil des Wirtgesteins (WG) und des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (EG), vergleiche dazu auch die Kolonne "Bewertungsobjekt" in Tab. 3.3-1 bzw. Tab. 3.3-2.

⁷⁰ Wo sinnvoll, werden alternative Varianten zur Abgrenzung des Wirtgesteins *sensu stricto* untersucht, vgl. Text weiter hinten.

⁷¹ Vergleiche dazu auch die Vorgaben zur Bewertung allfälliger Nutzungskonflikte in Kap. 4.4.2.

Beim Indikator 'Mächtigkeit' bezieht sich die Bewertung auf den nutzbaren **einschlusswirksamen Gebirgsbereich** (EG in Tab. 2.3-3, 3.3-1 und 3.3-2), d.h. hier werden diejenigen Beiträge der Rahmengesteine berücksichtigt, welche eine ausreichende Überdeckung aufweisen (kein Einfluss der Gesteins-Dekompaktion) und trotz vorhandener "harter Bänke" als barriierenwirksam beurteilt werden (grüne vertikale Doppelpfeile in Fig. 3.1-3). Dabei wird in den Standortgebieten Nördlich Lägern, Jura Ost und Jura-Südfuss unterschieden zwischen dem "massgebenden Fall" bzw. Referenz-Konzeptualisierung (ausgezogene grüne Doppelpfeile in Fig. 3.1-3) und alternativen Konzeptualisierungen (gestrichelte grüne Doppelpfeile in Fig. 3.1-3; vgl. nachfolgenden Text).

Bei der qualitativen Bewertung werden grundsätzlich die gleichen Bewertungsskalen verwendet wie in Etappe 1 (vgl. Nagra 2008d, Anhang 1), mit folgenden Ausnahmen: Beim Indikator 'Länge der massgebenden Freisetzungspfade' wird im Sinne der Präzisierung die Bewertungsskala auf die massgebenden vertikalen Beiträge zur Transportpfadlänge beschränkt⁷², beim Indikator 'Mächtigkeit' wird die Bewertungsskala im Hinblick auf die nutzbare Mächtigkeit der oberen Rahmengesteine (d.h. mit ausreichender Gesteinsüberdeckung) im Sinne der Optimierung modifiziert⁷³ und bei den Indikatoren 'Hydraulische Durchlässigkeit' und 'Transmissivität präferenzierter Freisetzungspfade' wird für das SMA-Lager im Sinne der Optimierung neu die gleiche Bewertungsskala wie für das HAA-Lager verwendet^{74,75}.

Bei der Charakterisierung und Bewertung liegt der Schwerpunkt der nachfolgenden Diskussion auf dem "massgebenden Fall für die Einengung"; dabei wird im Text jeweils nur die Bewertungsstufe benannt, die Feinabstufung der Bewertung zur allfälligen Differenzierung zwischen den Wirtgesteinen ist aus Tab. 3.3-1 und 3.3-2 ersichtlich. Die Charakterisierung und Bewertung für den "massgebenden Fall" dient als Grundlage für die Einengungsentscheide.

⁷² In Etappe 1 (Nagra 2008d, A1.19) bezog sich der Indikator 'Länge der Freisetzungspfade' auf das Wirtgestein und seine Rahmengesteine und berücksichtigte laterale Beiträge zur Transportpfadlänge. Neu bezieht sich der Indikator ausschliesslich auf die für die Barriierenwirkung massgebenden vertikalen Beiträge zur Transportpfadlänge (im massgebenden Fall nur innerhalb des Wirtgesteins *sensu stricto*), was durch den modifizierten Namen 'Länge der *massgebenden* Freisetzungspfade' ausgedrückt wird. Dabei wird für die vertikale Länge der massgebenden Freisetzungspfade neu die folgende Bewertungsskala verwendet:

- *Sehr günstig* ≥ 30 m (Opalinuston, Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger') bzw. ≥ 40 m (Effinger Schichten, Mergel-Formationen).
- *Günstig* ≥ 20 m (Opalinuston, Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger') bzw. ≥ 30 m (Effinger Schichten, Mergel-Formationen).
- *Bedingt günstig* ≥ 15 m (Opalinuston, Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger') bzw. ≥ 20 m (Effinger Schichten, Mergel-Formationen).

⁷³ In Etappe 1 (Nagra 2008d, A1.5) wurde für das SMA- und HAA-Lager zur Erreichung der Bewertungsstufe *sehr günstig* verlangt, dass die nutzbare Mächtigkeit des Opalinustons ≥ 100 m bzw. der oberen und unteren Rahmengesteine je ≥ 25 m beträgt, wobei als untere Rahmengesteine nur die Zone bis Top Arietenkalk betrachtet wird. Neu wird für eine *sehr günstige* Bewertung eine nutzbare Mächtigkeit der oberen Rahmengesteine des Opalinustons von ≥ 50 m verlangt. Damit kommt dem bevorzugten Tiefenfenster für das SMA-Lager mit einer minimalen Tiefenlage des Top Opalinuston von 350 m unter Terrain (Vermeidung der Dekompaktion eines Teils des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs, vgl. Kap. 4.2) eine erhebliche Bedeutung zu.

⁷⁴ In Etappe 1 (Nagra 2008d, Anhang A1.9) wurde für das SMA-Lager zur Erreichung der Bewertungsstufe *sehr günstig* eine hydraulische Durchlässigkeit von $\leq 10^{-11}$ m/s und für die Bewertungsstufe *günstig* $\leq 10^{-10}$ m/s verlangt. Neu wird wie für das HAA-Lager zur Erreichung der Bewertungsstufe *sehr günstig* eine hydraulische Durchlässigkeit von $\leq 10^{-12}$ m/s und für die Bewertungsstufe *günstig* $\leq 10^{-11}$ m/s verlangt.

⁷⁵ In Etappe 1 (Nagra 2008d, Anhang A1.20) wurde für das SMA-Lager zur Erreichung der Bewertungsstufe *sehr günstig* eine Transmissivität von $\leq 10^{-10}$ m²/s und für die Bewertungsstufe *günstig* $\leq 10^{-9}$ m²/s verlangt. Neu wird wie für das HAA-Lager zur Erreichung der Bewertungsstufe *sehr günstig* eine Transmissivität von $\leq 10^{-11}$ m²/s und für die Bewertungsstufe *günstig* $\leq 10^{-10}$ m²/s verlangt.

Zur Prüfung der Sensitivität der Einengungsentscheide bezüglich alternativer konzeptueller Annahmen zur Wasserführung in "harten Bänken" im Wirtgestein wird beim 'Braunen Dogger' auch ein Fall bewertet, der von etwas günstigeren konzeptuellen Annahmen bezüglich hydrogeologischer Eigenschaften der "harten Bänke" innerhalb des 'Braunen Doggers' ausgeht (gestrichelte orange Doppelpfeile in Fig. 3.1-3). Diese Prüfung erfolgt durch eine alternative Bewertung derjenigen Indikatoren, welche einerseits die Existenz und Lage der "harten Bänke" betreffen ('Homogenität des Gesteinsaufbaus', 'Länge der massgebenden Freisetzungspfade') sowie andererseits deren Charakterisierbarkeit und Explorierbarkeit erfassen ('Variabilität der Gesteinseigenschaften im Hinblick auf ihre Charakterisierbarkeit', 'Explorationsverhältnisse im geologischen Untergrund'; vgl. hierzu auch die Erläuterungen in Kap. 3.1). Bei allen anderen Indikatoren wird die Bewertung unverändert aus dem massgebenden Fall für die Einengung übernommen.

Auch für die Mergel-Formationen des Helvetikums wird zur Prüfung der Sensitivität der Bewertung bezüglich alternativer konzeptueller Annahmen zur Wasserführung im Wirtgestein ein Fall bewertet, wo die Radionuklidfreisetzung für einen Teil des Migrationspfads in Zusammenhang mit Störungszonen über boudinierte Kalkbankabfolgen erfolgt. Dies betrifft bei der Bewertung nur den Indikator 'Länge der massgebenden Freisetzungspfade', die Bewertung aller anderen Indikatoren bleibt gleich.

Weiter werden zur Prüfung der Sensitivität der Einengungsentscheide auch alternative konzeptuelle Annahmen zur Wirksamkeit der Rahmengesteine geprüft (gestrichelte grüne Doppelpfeile in Fig. 3.1-3). Dies betrifft für das Standortgebiet Nördlich Lägern die oberen Rahmengesteine des Opalinustons und für den 'Braunen Dogger' seinen unteren Teil, für die Standortgebiete Jura Ost und Jura-Südfuss die oberen Rahmengesteine des Opalinustons. Diese Prüfung führt nur beim Indikator 'Mächtigkeit' zu einer Änderung der Bewertung, alle anderen Bewertungen werden unverändert vom "massgebenden Fall" übernommen.

Eine zusammenfassende Diskussion der Bewertung inkl. Sensitivität der Ergebnisse bezüglich konzeptueller Ungewissheiten erfolgt in Kap. 3.3.5. Die Resultate aller Bewertungen sind in Anhang C.2 tabellarisch zusammengestellt.

Bei der qualitativen Bewertung einiger Indikatoren werden auch die Resultate der Dosisberechnungen zur Barrierenwirkung der Wirtgesteine berücksichtigt. Dabei handelt es sich um die Indikatoren 'Mächtigkeit' (vgl. Kap. 4.4), 'Hydraulische Durchlässigkeit', 'Art der Transportpfade und Ausbildung des Porenraums', 'Transmissivität präferenzierter Freisetzungspfade' und 'Länge der massgebenden Freisetzungspfade'.

Bei den Indikatoren 'Mächtigkeit', 'Hydraulische Durchlässigkeit', 'Potenzial zur Bildung neuer Wasserwegsamkeiten (Verkarstung)' und 'Explorationsverhältnisse im geologischen Untergrund', 'Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften' sind zusätzlich Aspekte der Konfiguration zu berücksichtigen; die lokalen Bedingungen können zu einer differenzierten Bewertung dieser Indikatoren führen⁷⁶.

⁷⁶ Die differenzierte Bewertung dieser Indikatoren erfolgt in Kap. 4.4.

3.3.1 Opalinuston

Entstehung und Hauptmerkmale

Der Opalinuston ist als Gesteinsformation im Tafel- und Faltenjura sowie im Molassebecken weit verbreitet und wird an zahlreichen Abbaustellen v.a. als Rohstoff für die Ziegelei-Industrie genutzt. Über die Vorkommen in grösseren Tiefen kann auf eine breite Basis von Erfahrungen, Kenntnissen und Daten zugegriffen werden: Untertagebauten (Eisenbahn- und Strassentunnel), Erdöl- und Erdgasbohrungen, Sondierbohrungen für Bau-, Deponie- und Entsorgungsprojekte sowie reflexionsseismische Untersuchungen.

Der Opalinuston entstand in einem epikontinentalen Flachmeer während der Jurazeit vor rund 174 Millionen Jahren. Der Ablagerungsraum war vergleichsweise wenig strukturiert; feinkörnige Feststoffe (Ton, Silt, Sand) bildeten als eingeschwemmte Erosionsprodukte des umliegenden Festlands über grosse Flächen des Meeresgrunds eine einheitliche, in ihrer Zusammensetzung weitgehend homogene Schlammschicht. Diese wurde im Lauf der Erdgeschichte (durch Auflast der später abgelagerten bis 1700 m mächtigen Sedimente) allmählich zu einer Tonsteinschicht verfestigt (konsolidiert).

Die Entstehungsbedingungen führten zu den prägenden Eigenschaften des Opalinustons. Zu den besonderen Merkmalen zählen insbesondere die auch über grössere Distanzen hinweg bestehende geringe Variabilität in der sedimentologischen Ausbildung sowie die vergleichsweise geringen Schwankungen der Schichtmächtigkeit. Diese grosse räumliche Ausdehnung einer weitgehend homogen aufgebauten Tonsteinschicht kommt insbesondere durch die mineralogische Zusammensetzung des Opalinustons zum Ausdruck, die von der Nordostschweiz (Nagra-Tiefbohrungen) bis in den Faltenjura (Felslabor Mont Terri) weitgehend identisch ist, wobei auch die relativen Verhältnisse der einzelnen Minerale nur in beschränktem Mass schwanken.

Der Opalinuston kommt in fünf der sechs Standortgebieten für das SMA-Lager (Ausnahme: Standortgebiet Wellenberg) und in allen Standortgebieten für das HAA-Lager als Wirtgestein in Frage. Dort weist er (teilweise in Kombination mit den Rahmengesteinen) die erforderliche Mächtigkeit in geeigneter Tiefenlage sowie eine ausreichende laterale Ausdehnung auf. Es ist vorgesehen, die Lagerkammern in der Mitte des Opalinustons zu platzieren.

Der Opalinuston zeichnet sich durch eine sehr gute Barrierenwirkung für Radionuklide aus, die primär durch den substanziellen Gehalt an Tonmineralen, das gute Selbstabdichtungsvermögen und die damit verbundene geringe (vernachlässigbare) Wasserführung sowie die guten Sorptionseigenschaften für Radionuklide gewährleistet wird.

Die Barrierenwirkung des Opalinustons wird ergänzt durch die Barrierenwirkung der oberen und unteren Rahmengesteine, wo es jedoch Unterschiede zwischen den Standortgebieten gibt (vgl. Fig. 3.1-3).

A) Eigenschaften des Opalinustons

Räumliche Ausdehnung (Kriterium 1.1)

Der Opalinuston weist in allen Lagerperimetern der Standortgebiete Südranden, Zürich Nordost, Nördlich Lägern und Jura Ost eine nutzbare Mächtigkeit von 105 – 110 m auf (Referenzwerte); im Liegenden befindet sich der Tonige Lias mit einer Mächtigkeit von ca. 30 m (vgl. Tab. 3.1-1

bis 3.1-4), welcher sich bezüglich seiner transportrelevanten Eigenschaften kaum vom Opalinuston unterscheidet. Die nutzbare Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs⁷⁷ vom Tonigen Lias bis zu den Effinger Schichten variiert in diesen Standortgebieten zwischen ca. 190 m (Standortgebiet Jura Ost) und ca. 300 m (Standortgebiet Nördlich Lägern). Die nutzbare Mächtigkeit der oberen Rahmengesteine beträgt im Standortgebiet Zürich Nordost mindestens ca. 105 m, in Nördlich Lägern ca. 160 m und in Jura Ost ca. 50 m; im Standortgebiet Südranden können die oberen Rahmengesteine aufgrund der geringeren Überdeckung ihre Barrierenwirkung nicht in vollem Umfang entfalten (keine nutzbare Mächtigkeit mit einer Überdeckung von mind. 300 m).

Im Standortgebiet Jura-Südfuss weist der Opalinuston eine nutzbare Mächtigkeit von ca. 90 m auf (Referenzwert, Tab. 3.1-5); im Liegenden befindet sich der Kalkige Lias mit einer Mächtigkeit von ca. 10 m, der bezüglich seiner transportrelevanten Eigenschaften deutlich abfällt, sodass die unteren Rahmengesteine nicht zur Barrierenwirkung beitragen (Abschlag in der Bewertung). Die nutzbare Mächtigkeit des potenziellen einschlusswirksamen Gebirgsbereichs beträgt hier ca. 175 m, zu der die oberen Rahmengesteine ca. 85 m beitragen.

In den Standortgebieten Jura Ost und Jura-Südfuss wird zusätzlich erwartet, dass die oberen Rahmengesteine im Vergleich zum Faziesraum Ost eher von schlechterer Qualität sind (erhöhte Durchlässigkeit innerhalb der Passwang-Formation und der Unteren Acuminata-Schichten). Deshalb wird ihr Beitrag zur Mächtigkeit für die Bewertung des Indikators 'Mächtigkeit' im "massgebenden Fall" vernachlässigt.

Die Bewertung des Indikators 'Mächtigkeit' fällt deshalb in den Standortgebieten Zürich Nordost und Nördlich Lägern *sehr günstig*, in den Standortgebieten Südranden und Jura Ost *günstig* und im Standortgebiet Jura-Südfuss *bedingt günstig* aus.

Zur Beurteilung der Bedeutung der Ungewissheiten bezüglich der Qualität der oberen Rahmengesteine wird für die Standortgebiete Jura Ost und Jura-Südfuss auch eine alternative günstigere Konzeptualisierung der oberen Rahmengesteine berücksichtigt. Auch für das Standortgebiet Nördlich Lägern gibt es Ungewissheiten in der Qualität der oberen Rahmengesteine, wo deshalb auch eine alternative ungünstigere Konzeptualisierung der oberen Rahmengesteine mit einbezogen wird⁷⁸.

Fazit: Die Bewertung des Kriteriums 'Räumliche Ausdehnung' für den Opalinuston wird durch die Bewertung des Indikators 'Mächtigkeit' bestimmt: *sehr günstig* für die Standortgebiete Zürich Nordost und Nördlich Lägern, *günstig* für die Standortgebiete Südranden und Jura Ost und *bedingt günstig* für das Standortgebiet Jura-Südfuss.

⁷⁷ Der nutzbare Teil des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs muss alle verschärften Anforderungen bzgl. Tiefenlage erfüllen (vgl. Nagra 2008d, Anhang A1.2). Im Falle des Opalinustons muss eine Gesteinsüberdeckung von mindestens 200 m u.T. vorliegen, für die tonmineralärmeren lithofaziellen Einheiten der oberen Rahmengesteine eine solche von mindestens 300 m u.T. Dies wird in Kap. 4.2 bei der Abgrenzung der Lagerperimeter detaillierter betrachtet.

⁷⁸ Für die alternativen günstigeren Konzeptualisierungen der oberen Rahmengesteine ergibt sich auch unter Berücksichtigung der Resultate der Dosisberechnungen für die Standortgebiete Jura Ost (Fall *SMA-JO-mLE-r-oRG*, vgl. Kap. 4.4) eine *sehr günstige* und für das Standortgebiet Jura-Südfuss (Fall *SMA-JS-OPA-aF1-oRG*) eine *günstige* Bewertung; für die alternative ungünstigere Konzeptualisierung der oberen Rahmengesteine für das Standortgebiet Nördlich Lägern (Fall *SMA-NL-OPA-aF1-oRG*) ergibt sich noch eine *günstige* Bewertung.

Hydraulische Barrierenwirkung (Kriterium 1.2)

Der Opalinuston verfügt mit seinen verhältnismässig hohen Anteilen an quellfähigen Tonmineralen über die Fähigkeit zur Wasseraufnahme und Quellung. Diese Eigenschaft führt unter anderem dazu, dass die durch tektonische Überprägung entstandenen oder zukünftig entstehenden Risse, Klüfte oder Störungen im Gesteinsverband als Folge des guten Selbstabdichtungsvermögens wieder verschlossen werden und zu keiner erhöhten Wasserführung führen. Untersuchungen und Beobachtungen in Bohrungen und Tunneln im Opalinuston weisen darauf hin, dass sich die hydraulische Durchlässigkeit von Störungen praktisch nicht von derjenigen des ungestörten Gesteins unterscheidet, sofern die Gesteinsüberdeckung mindestens 200 m beträgt.

Aufgrund der feinen Porenstruktur und des ausgeprägten Selbstabdichtungsvermögens weist der Opalinuston eine sehr geringe hydraulische Durchlässigkeit auf (K-Wert parallel zur Schichtung im Bereich von ca. 10^{-12} bis 10^{-13} m/s oder weniger, im Standortgebiet Zürich Nordost (Bohrung Benken) $\leq 10^{-13}$ m/s, senkrecht zur Schichtung ca. Faktor 5 niedriger)⁷⁹. Auch für den Tonigen Lias im Liegenden werden ähnlich gute transportrelevante Eigenschaften erwartet.

Der Stofftransport wird selbst für vergleichsweise grosse hydraulische Gradienten (ca. 1 m/m) durch Diffusion dominiert. Dies wird durch unabhängige Evidenzen bestätigt, insbesondere durch den Gehalt an salinen Wässern bzw. deren Verweilzeiten und durch die Präsenz von durch Diffusion geprägten Profilen von Wasserinhaltsstoffen.

Der Indikator 'Hydraulische Durchlässigkeit' wird in allen Standortgebieten insgesamt *mit sehr günstig* bewertet. Auch unter Berücksichtigung der Resultate der Dosisberechnungen zur Barrierenwirkung bleibt die Bewertung sehr günstig.

Fazit: Das Kriterium 'Hydraulische Barrierenwirkung' wird für den Opalinuston in allen Standortgebieten insgesamt als *sehr günstig* beurteilt.

Geochemische Bedingungen (Kriterium 1.3)

Der Opalinuston besteht aus feinkörnigen kontinentalen Verwitterungs- und Erosionsprodukten (vorwiegend Tonminerale und Quarz), marinen Karbonaten und diagenetischen Neubildungen (z.B. Pyrit). Der vergleichsweise hohe Gehalt an Tonmineralen (40 – 80 Gew.-%) verleiht dem Opalinuston sehr gute Radionuklid-Rückhalteeigenschaften (ausgeprägtes Selbstabdichtungsvermögen, sehr niedrige hydraulische Durchlässigkeit, gutes Sorptionsvermögen, Kolloidfiltration, geochemische Pufferkapazität). Die geringe Durchlässigkeit bildet eine sehr gute Voraussetzung für eine fortbestehende geochemische Stabilität innerhalb der Gesteinsformation.

Damit wird der Indikator 'Mineralogie' in allen Standortgebieten als *sehr günstig* beurteilt. Der pH liegt mit Werten um 7.2 im neutralen Bereich, was zur Bewertung *sehr günstig* führt. Dank des Gehalts an Pyrit und Siderit und organischen Substanzen besitzt der Opalinuston eine grosse Redoxpufferkapazität. Die Redox-Bedingungen werden deshalb als *sehr günstig* eingestuft.

Meerwasser hat eine Salinität von ca. 35 g/L. Dies entspricht einer Ionenstärke von 0.7 Mol/L. Der Opalinuston erreicht etwa 30 – 40 % der Meerwassersalinität bzw. eine Ionenstärke von rund 0.2 Mol/L. Damit ergibt sich für den Indikator 'Salinität' in allen Standortgebieten die Bewertung *günstig*.

⁷⁹ Für die hydraulische Durchlässigkeit gibt es eine Tiefenabhängigkeit, die sich aber nur im Standortgebiet Südranden bemerkbar macht. Die resultierende Durchlässigkeit (K-Wert senkrecht zur Schichtung) liegt jedoch auch im Standortgebiet Südranden im Bereich von ca. 10^{-13} m/s, sodass die Bewertung auch dort *sehr günstig* ausfällt.

Der Opalinuston besitzt keine grösseren Poren (im Bereich von μm bis mm) und keine offenen Klüfte. Zudem ist der Gehalt an Nährstoffen relativ gering. Somit herrschen keine Bedingungen, die eine hohe mikrobielle Aktivität fördern. Die Auflockerungszone im Nahbereich der Untertagebauten kann einen gewissen Lebensraum für Mikroorganismen bieten, zumindest in der Anfangsphase nach Verschluss der Lagerkammern. Insgesamt wird der Indikator 'Mikrobielle Prozesse' als *sehr günstig* eingestuft.

Die schon erwähnte geringe Porengrösse, zusammen mit der vorteilhaften Porenstruktur (hohe Tortuosität), führt dazu, dass der Opalinuston als Kolloidfilter wirkt. Der Indikator 'Kolloide' wird deshalb mit *sehr günstig* bewertet.

Fazit: Das Kriterium 'Geochemische Bedingungen' wird für den Opalinuston in allen Standortgebieten insgesamt als *sehr günstig* beurteilt.

Freisetzungspfade (Kriterium 1.4)

Durch das ausgeprägte Selbstabdichtungsvermögen erweisen sich selbst deformierte, verfaltete und z.T. zerscherte Opalinuston-Schichten in grösserer Tiefe als sehr geringdurchlässig. Dieser Befund wird gestützt durch die weitgehende Absenz von Mineraladern und Alterationen; dies weist darauf hin, dass auch in der geologischen Vergangenheit selbst in mechanisch gestörten Gesteinspartien keine bedeutenden Gestein-Wasser-Interaktionen bzw. keine signifikanten Wasserflüsse stattgefunden haben. Der Opalinuston kann deshalb bezüglich seiner Transporteigenschaften grossräumig als äquivalent-poröses Medium aufgefasst werden. Aufgrund dieser Verhältnisse wird der Indikator 'Art der Transportpfade und Ausbildung des Porenraums' mit *sehr günstig* bewertet. Auch unter Berücksichtigung der Resultate der Dosisberechnungen bleibt die Bewertung in allen Standortgebieten sehr günstig.

Allenfalls vorhandene Diskontinuitäten unterscheiden sich hydraulisch kaum von der ungestörten Gesteinsmatrix; ihre Transmissivität ist bei genügender Überdeckung sehr gering ($T < 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$). Dies führt für den Indikator 'Transmissivität präferenzialer Freisetzungspfade' zur Bewertung *sehr günstig*. Auch unter Berücksichtigung der Resultate der Dosisberechnungen zur Barrierenwirkung bleibt die Bewertung in allen Standortgebieten sehr günstig.

Dank des hohen Tonmineralgehalts besitzt der Opalinuston ein ausgeprägtes Selbstabdichtungsvermögen. Dies wird u.a. durch hydraulische Tests belegt, die zeigen, dass die hydraulische Durchlässigkeit der Störungszonen sich nicht wesentlich von derjenigen des ungestörten Bereichs unterscheidet. Der Indikator 'Selbstabdichtungsvermögen' wird daher in allen Standortgebieten mit *sehr günstig* bewertet.

Wie die stratigraphische Beschreibung zeigt, gibt es innerhalb des Opalinustons keine mehrere Meter mächtige und über hunderte von Metern ausgedehnte Elemente mit gegenüber dem restlichen Gestein klar reduzierten Barriereigenschaften. Der Indikator 'Homogenität des Gesteinsaufbaus' (makroskopischer Massstab) ist deshalb in allen Standortgebieten als *sehr günstig* einzustufen.

Im massgebenden Fall für die Einengung und bei Platzierung der Lagerkammern in der Mitte des Opalinustons wird die minimale Transportpfadlänge durch die Schichtpaketmächtigkeit des Opalinustons bestimmt (Fig. 3.1-3); schichtparallele Beiträge zur Transportpfadlänge innerhalb des Opalinustons sind kaum von Bedeutung. Der Referenzwert für die Schichtpaketmächtigkeit beträgt in allen Standortgebieten ca. 105 – 110 m (vgl. Referenzwerte in Tab. 3.1-1 bis 3.1-4), mit Ausnahme des Standortgebiets Jura-Südfuss, wo der Referenzwert 90 m beträgt (Tab. 3.1-5). Unter vereinfachter Berücksichtigung der vertikalen Ausdehnung der SMA-Lager-

kammern (inkl. Auflockerungszone) von 20 m ergibt sich somit in allen Standortgebieten eine minimale Transportpfadlänge von ca. 40 – 45 m, mit Ausnahme des Standortgebiets Jura-Südfuss, wo diese ca. 35 m beträgt. Der Indikator 'Länge der massgebenden Freisetzungspfade' wird daher in allen Standortgebieten mit *sehr günstig* bewertet. Auch unter Berücksichtigung der Resultate der Dosisberechnungen zur Barrierenwirkung bleibt die Bewertung sehr günstig.

Fazit: Das Kriterium 'Freisetzungspfade' wird für den Opalinuston in allen Standortgebieten insgesamt als *sehr günstig* beurteilt.

Gesamtbewertung der Kriteriengruppe 'Eigenschaften des Wirtgesteins' für den Opalinuston in den Standortgebieten Südranden, Zürich Nordost, Nördlich Lägern und Jura Ost: *sehr günstig*, im Standortgebiet Jura-Südfuss: *günstig*.

B) Langzeitstabilität des Opalinustons

Beständigkeit der Gesteinseigenschaften (Kriterium 2.1)

Infolge des geringen Karbonatgehalts des Gesteins und der Abwesenheit karbonatreicher Schichten sind Karsterscheinungen, d.h. die Bildung neuer Wasserwegsamkeiten infolge Karbonatlösung, ausgeschlossen. Der Indikator 'Potenzial zur Bildung neuer Wasserwegsamkeiten (Verkarstung)' wird daher als *sehr günstig* bewertet.

Fazit: Das Kriterium 'Beständigkeit der Gesteinseigenschaften' wird für den Opalinuston in allen Standortgebieten als *sehr günstig* beurteilt.

Lagerbedingte Einflüsse (Kriterium 2.3)

Die Auflockerungszone im Nahbereich der Untertagebauten (bei SMA konkret die Auflockerungszone im Bereich der Versiegelungsstrecken) kann im Opalinuston bei Beschränkung der Tiefe der Lagerebene durch geeignete technische Massnahmen weitgehend kontrolliert werden. Diese Massnahmen umfassen den sorgfältigen Ausbruch, die Verwendung einer geeigneten Sicherung und die Verfüllung mit einem quellfähigen Versiegelungsmaterial. Nach Einbringen der Versiegelung wird sich die Auflockerungszone in den Versiegelungsstrecken allmählich wieder aufsättigen. Diese Aufsättigung (einschliesslich zeitabhängiger Deformation, Quellung und Desintegration des Gesteins) und das Quellen des Versiegelungsmaterials führen zu einer signifikanten Reduktion der Durchlässigkeit der Risse und Klüfte in der Auflockerungszone des Opalinustons (Selbstabdichtung), wie dies auch experimentell nachgewiesen wurde (vgl. Nagra 2014b, Dossier IV). Unter Berücksichtigung des ausgeprägten Selbstabdichtungsvermögens des Opalinustons fällt die Beurteilung des Indikators 'Auflockerungszone im Nahbereich der Untertagebauten' *günstig* aus.

Die wichtigsten lagerbedingten geochemischen Effekte sind Langzeitauswirkungen von alkalischen Zementporenwässern auf das Umfeld der Lagerkammern und die Oxidation des Wirtgesteins während der Bau- und Betriebsphase. Die Umwandlungszone als Folge der alkalischen Zementporenwässer ist räumlich sehr beschränkt und nicht nachteilig für die Langzeitsicherheit; die gebildeten Sekundärminerale führen allenfalls zu einer erhöhten Sorptionskapazität für Radionuklide. Der bedeutendste Oxidationsprozess im Opalinuston betrifft die Oxidation von Pyrit. Verschiedene Untersuchungen (Felslabor Mont Terri, Eisenbahntunnel) zeigen, dass auch bei einer langen Betriebsdauer nur ein kleiner Teil des Pyrits oxidiert, mit vernachlässigbaren Auswirkungen auf die Barriereigenschaften des Opalinustons. Der Indikator 'Chemische Wechselwirkungen' wird daher mit *sehr günstig* bewertet.

Mit geeigneten baulichen Massnahmen kann sichergestellt werden, dass die Freisetzung von im Lager gebildetem Korrosions- und Degradations-Gas keine kritische Beeinträchtigung der Barriereigenschaften des Opalinustons zur Folge hat (vgl. Nagra 2014a). Eine entscheidende Rolle spielt dabei insbesondere die Wahl von geeigneten Verfüll- und Versiegelungsmaterialien für die Zugangsstollen (Schaffung von untertägigem Speicherraum; kontrollierte Ableitung der Gase über die Versiegelungsstrecken⁸⁰), da der Beitrag des Opalinustons zur Speicherung und Ableitung der Gase begrenzt ist. Weiter besteht auch die Möglichkeit zur Behandlung gewisser radioaktiver Abfälle. Trotz der technischen Möglichkeiten zur Beherrschung der Gasbildung wird der Indikator 'Verhalten des Wirtgesteins bezüglich Gas' mit *bedingt günstig* bewertet.

Der Indikator 'Verhalten des Wirtgesteins bezüglich Temperatur' ist für das SMA-Lager nicht relevant und wird deshalb nicht beurteilt.

Fazit: Das Kriterium 'Lagerbedingte Einflüsse' wird für den Opalinuston in allen Standortgebieten insgesamt als *günstig* beurteilt.

Nutzungskonflikte (Kriterium 2.4)

Der Opalinuston wird in der Nordschweiz in erster Linie als Ziegelei-Rohstoff in verschiedenen Tongruben abgebaut. Diese Nutzung dürfte auch in Zukunft auf die Erdoberfläche beschränkt bleiben, sodass im tiefen Untergrund kein Nutzungskonflikt besteht. Der Indikator 'Rohstoffvorkommen innerhalb des Wirtgesteins' wird daher mit *sehr günstig* bewertet⁸¹.

Fazit: Das Kriterium 'Nutzungskonflikte' wird für den Opalinuston in allen Standortgebieten insgesamt als *sehr günstig* beurteilt.

Gesamtbewertung der Kriteriengruppe 'Langzeitstabilität' für den Opalinuston in allen Standortgebieten: *sehr günstig*.

C) Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen zum Opalinuston

Charakterisierbarkeit der Gesteine (Kriterium 3.1)

Die Charakterisierbarkeit der Eigenschaften des Wirtgesteins wird anhand der Indikatoren 'Variabilität der Gesteinseigenschaften im Hinblick auf ihre Charakterisierbarkeit' und 'Erfahrungen' erfasst.

Die Beurteilung des Indikators 'Variabilität der Gesteinseigenschaften im Hinblick auf ihre Charakterisierbarkeit' erfolgt anhand der Merkmale Lagerungsverhältnisse, Homogenität bzw. Heterogenität der Gesteinsbeschaffenheit, Variabilität der Gesteinseigenschaften, Existenz und Art von Diskontinuitäten als Folge der tektonischen Überprägung. Zur günstigen Beurteilung des Opalinustons bezüglich dieser Aspekte trägt bei, dass mit keinen präferentiellen Fliesspfaden zu rechnen ist, und dass die Formation einen homogenen Aufbau hat und die laterale Kontinuität der lithologischen Ausbildung eine laterale Extrapolierbarkeit der relevanten Wirt-

⁸⁰ Das dazu vorgesehene 'engineered gas transport system' wird bei geeigneter Auslegung auch über sehr lange Zeiten seine geeigneten Eigenschaften behalten (vgl. Kosakowski & Smith 2014).

⁸¹ Dies berücksichtigt auch die Möglichkeit der zukünftigen Gasförderung durch Fracking, die im Opalinuston im Bereich der Standortgebiete in der Nordschweiz als nicht gegeben eingestuft wird (vgl. Nagra 2014b, Dossier VII).

gesteinseigenschaften über grössere Distanzen erlaubt. Auch die Übertragbarkeit der Wirtgesteinseigenschaften von einer Lokalität (z.B. Felslabor Mont Terri) auf die geologischen Standortgebiete in der Nordschweiz ist generell möglich, insbesondere weil die Auswirkungen unterschiedlicher Randbedingungen (z.B. Versenkungsgeschichte, tektonische Überprägung) auf die interessierenden Gesteinseigenschaften abgeschätzt werden können. Weiter lässt der sedimentäre Aufbau des Opalinustons keine lithofaziellen Einheiten und tektonisch-strukturelle Elemente erwarten, die sich ungünstig auf die hydraulischen Eigenschaften und den Stofftransport auswirken könnten; insbesondere sind auch bei tektonischer Überprägung wegen des hohen Selbstabdichtungsvermögens (lithofazielle Einheit der Kategorie 1, Nagra 2014b, Dossier VI) keine präferenziellen Freisetzungspfade mit ungünstigen Rückhalteeigenschaften zu erwarten. Der Indikator 'Variabilität der Gesteinseigenschaften im Hinblick auf ihre Charakterisierbarkeit' wird daher in allen Standortgebieten mit *sehr günstig* bewertet.

Im Rahmen von Entsorgungsprojekten mit dem Wirtgestein Opalinuston im Inland (SGT Etappe 1, Projekt Entsorgungsnachweis, Felslabor Mont Terri) sowie mit vergleichbaren Tongesteinen im Ausland (z.B. Callovo-Oxfordian-Tonsteine in Frankreich) konnten umfangreiche Erfahrungen gesammelt werden. Der Indikator 'Erfahrungen' erhält somit für den Opalinuston die Bewertung *sehr günstig*.

Fazit: Das Kriterium 'Charakterisierbarkeit der Gesteine' wird für den Opalinuston in allen Standortgebieten insgesamt als *sehr günstig* beurteilt.

Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse (Kriterium 3.2)

Der Indikator 'Explorationsverhältnisse im geologischen Untergrund' wird anhand der Existenz von seismischen Markerhorizonten im oder in der Nähe des Wirtgesteins sowie anhand der Homogenität des Wirtgesteins (inkl. lateraler Korrelationslängen) beurteilt. Aufgrund der seismischen Impedanzkontraste der Sedimentgesteinsabfolgen unterhalb und in reduzierter Qualität auch oberhalb des Opalinustons können die Untergrenze und teilweise auch die Obergrenze des Wirtgesteinskörpers und die Lage von Störungszonen mit einem Versatz von 10 bis 20 m mittels 2D-/3D-Seismik zuverlässig erfasst werden. Vertikalversätze von einigen Metern sind mit hochauflösender 3D-Seismik noch erkennbar, ebenso der laterale Verlauf von Störungen mit einer Längserstreckung von mehr als 150 m. Kleinere durch tektonische Überprägung verursachte Störungen des Wirtgesteinskörpers sowie schichtparallele Scherzonen können jedoch mit seismischen Untersuchungen von der Erdoberfläche aus nicht erfasst werden. Das Potenzial einer zukünftigen Standortexploration mittels 3D-Seismik und Bohrungen wird aufgrund der Erfahrungen im Standortgebiet Zürich Nordost insgesamt als sehr gut eingestuft, auch wenn sich zwischen den Standortgebieten kleine Unterschiede ergeben (vgl. Kap. 4.4). Der Indikator 'Explorationsverhältnisse im geologischen Untergrund' wird daher in allen Standortgebieten als *sehr günstig* bewertet.

Fazit: Das Kriterium 'Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse' wird für den Opalinuston in allen Standortgebieten insgesamt als *sehr günstig* beurteilt.

Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen (Kriterium 3.3)

Die Qualität des Opalinustons bezüglich Langzeitisolation wird durch unabhängige Evidenzen bestätigt, insbesondere durch den Gehalt an salinen Wässern und deren Verweilzeiten sowie durch die Präsenz von durch Diffusion geprägten Profilen von Wasserinhaltsstoffen. Der Indikator 'Unabhängige Evidenzen der Langzeitisolation' wird daher mit *sehr günstig* bewertet.

Fazit: Das Kriterium 'Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen' wird für den Opalinuston in allen Standortgebieten insgesamt als *sehr günstig* beurteilt.

Gesamtbewertung der Kriteriengruppe 'Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen' für den Opalinuston in allen Standortgebieten: *sehr günstig*.

D) Bautechnische Eignung des Opalinustons

Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen (Kriterium 4.1)

Erfahrungen aus mehr als hundert Jahren mit Untertagebauten zeigen, dass die Eisenbahn- und Strassentunnel im Opalinuston (vor allem im Faltenjura) auch bei Überlagerungen von bis zu 800 m realisiert werden konnten. Dies gilt auch bei vergleichsweise starker tektonischer Überprägung mit zahlreichen Störungen, wie dies im Faltenjura der Fall ist. In Tunnelabschnitten mit erhöhter Frequenz von Scherzonen erfolgten aber zum Teil grössere Ausbrüche.

Die einaxialen Druckfestigkeiten parallel und senkrecht zur Schichtung liegen je nach lithologischer Ausprägung, Konsolidierung und Wassergehalt zwischen 10 und 45 MPa (Nagra 2014b, Dossier IV), wobei die sandige Fazies eher im oberen und die tonige Fazies im unteren Festigkeitsbereich liegt. Der Opalinuston zeichnet sich aufgrund seiner Ablagerungs- und Kompaktionsgeschichte durch ein anisotropes (transversal isotropes) Verformungsverhalten aus mit deutlich reduzierten Festigkeiten in der Schichtung und reduzierter Steifigkeit bei Belastung senkrecht zur Schichtung. Darüber hinaus wird ein moderates Quellverhalten beobachtet.

Die Untertagebauten (inkl. Lagerkammern) müssen mit einem angemessenen Ausbau gesichert werden. Die bautechnische Machbarkeit ist bei Beschränkung der maximalen Tiefenlage generell gewährleistet; beim Bau der Lagerkammern sind allerdings Erschwernisse, welche anspruchsvolle Bauverfahren erforderlich machen, nicht auszuschliessen.

Der Indikator 'Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften' wird bei Beschränkung der maximalen Tiefenlage auf 600 m u.T. insgesamt als *günstig* eingestuft. Diese Einstufung berücksichtigt den Grundsatz, dass bei der Bewertung ausschliesslich die Sicherheit und Machbarkeit eine Rolle spielen sollen, nicht aber der Aufwand. Um bezüglich bautechnischer Bedingungen eine günstige Situation zu erreichen, wird in Etappe 2 eine Tiefe der Lagerebene von ≤ 600 m u.T. angestrebt, was deutlich weniger tief ist als dies in Etappe 1 mit 800 m u.T. bzw. 700 m u.T. (verschärfte Anforderung aus Etappe 1 für die östliche Subjurassische Zone) zugelassen wurde. Die diesbezüglichen Auswirkungen auf die Abgrenzung der Lagerperimeter werden in Kap. 4.2 ersichtlich. Die Beurteilung der maximalen Tiefenlage der Lagerkammern erfolgt für die verschiedenen Standortgebiete bzw. Lagerperimeter in Kap. 4.4.

Fazit: Das Kriterium 'Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen' wird für den Opalinuston bei Beschränkung der Tiefenlage insgesamt als *günstig* beurteilt.

Gesamtbewertung der Kriteriengruppe 'Bautechnische Eignung' für den Opalinuston in allen Standortgebieten: *günstig*.

Prüfung der Sensitivität der Bewertungen für den Opalinuston

Zur Prüfung der Sensitivität der oben für den "massgebenden Fall" durchgeführten Bewertungen werden diese mit den Bewertungen für alternative konzeptuelle Annahmen zur Barrierenwirkung der oberen Rahmengesteine verglichen, vgl. dazu die Bewertungen in Anhang C.2.1.2 bzw. C.3.1.2. Der Vergleich der Bewertungen ergibt folgendes Bild:

Die alternativen Konzeptualisierungen zur Barrierenwirkung der oberen Rahmengesteine des Opalinustons (Fälle *SMA-JO-mLE-r-oRG*, *SMA-JS-OPA-aFl-oRG*, *SMA-NL-OPA-aFl-oRG*, vgl. Kap. 4.4) ergeben für den Indikator 'Mächtigkeit' für das Standortgebiet Nördlich Lägern anstelle einer sehr günstigen Bewertung eine *günstige* Bewertung, für das Standortgebiet Jura Ost anstelle einer günstigen Bewertung eine *sehr günstige* Bewertung und für das Standortgebiet Jura-Südfuss anstelle einer bedingt günstigen Bewertung eine *günstige* Bewertung, vgl. dazu auch Kap. 4.4. Die Veränderung der Bewertung in den Standortgebieten Nördlich Lägern, Jura Ost und Jura-Südfuss ist aber für die Gesamtbewertung des Wirtgesteins Opalinuston nicht von Bedeutung.

Fazit: Die alternative Bewertung des Indikators 'Mächtigkeit' führt nicht zu einer signifikant anderen Gesamtbewertung.

3.3.2 Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger'

Entstehung und Hauptmerkmale

Mit dem Begriff 'Brauner Dogger' wird hier die Abfolge von tonreichen Gesteinseinheiten zusammengefasst, welche stratigraphisch zwischen dem Opalinuston und den Effinger Schichten liegen und ungefähr östlich der Aare im östlichen Tafeljura (Bereich nördlich der Lägern bis Schaffhausen) vorkommen. Die Abfolge besteht einerseits aus mächtigeren Tonsteinen und Mergeln, die eine relativ grosse Ausdehnung besitzen, und andererseits aus Eisenoolithen, Karbonatbänken, Hartgründen und Sandsteinen, die z.T. nur lokal ausgebildet, z.T. aber auch fast im ganzen Verbreitungsgebiet zu finden sind. Trotz der relativ grossen lithologischen Variabilität ist der Tonmineralgehalt im gesamten Abschnitt signifikant, d.h. auch die kalkigen und sandigen Bereiche weisen einen durchschnittlichen Tonmineralgehalt von etwas mehr als 10 Gew.-% auf. Im Raum Zürich Nordost-Nördlich Lägern bilden die Parkinsoni-Württembergica-Schichten und die Variansmergel-Formation⁸² (lithofazielle Einheit TA-1, vgl. Fig. 3.1-3) die mächtigste und tonreichste Einheit, welche lithologisch und mineralogisch vergleichbar mit dem Opalinuston ist. Insgesamt ist der Gesteinsaufbau im Meterbereich aber dort deutlich weniger homogen als derjenige des Opalinustons. Gemäss aktuellen Modellvorstellungen würden die Lagerkammern in der Einheit TA-1 platziert.

Die Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger' wurde in Etappe 1 in den geologischen Standortgebieten Zürich Nordost und Nördlich Lägern als Wirtgestein für das SMA-Lager vorgeschlagen. Dort weist der 'Braune Dogger' die erforderliche Mächtigkeit in geeigneter Tiefenlage sowie eine ausreichende laterale Ausdehnung auf. Die Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger' zeichnet sich durch eine gute Barrierenwirkung für Radionuklide aus, die primär durch den substanziellen Gehalt an Tonmineralen innerhalb der tonreicheren Abfolgen, die damit verbundene geringe Wasserführung und die guten Sorptionseigenschaften für Radionuklide gewährleistet wird.

Die Barrierenwirkung der Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger' wird ergänzt durch die Barrierenwirkung der oberen und unteren Rahmengesteine, wo es jedoch Unterschiede zwischen den Standortgebieten gibt (vgl. Fig. 3.1-3).

⁸² Die Parkinsoni-Württembergica-Schichten und die Variansmergel-Formation sind im Westen voraussichtlich nicht vorhanden.

A) Eigenschaften der Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger'

Räumliche Ausdehnung (Kriterium 1.1)

Die Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger' weist im Standortgebiet Zürich Nordost eine Mächtigkeit von ca. 90 m (Referenzwert, vgl. Tab. 3.1-2) und im Standortgebiet Nördlich Lägern von ca. 75 m auf (Referenzwert, vgl. Tab. 3.1-3). Die nutzbare⁸³ Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (Basis Toniger Lias bis Top Effinger Schichten) beträgt im Standortgebiet Zürich Nordost ca. 250 m und im Standortgebiet Nördlich Lägern ca. 300 m. Die nutzbare Mächtigkeit der oberen Rahmengesteine (Effinger Schichten) beträgt im Standortgebiet Zürich Nordost ca. 15 m und im Standortgebiet Nördlich Lägern ca. 90 m.

Aus diesen Gründen fällt die Bewertung des Indikators 'Mächtigkeit' für den 'Braunen Dogger' in den Standortgebieten Zürich Nordost und Nördlich Lägern *sehr günstig* aus.

Für das Standortgebiet Nördlich Lägern gibt es jedoch Ungewissheiten bezüglich des untersten Teils des 'Braunen Doggers' und damit auch bezüglich der Barrierenwirkung der unteren Rahmengesteine. Diese Ungewissheiten werden durch eine alternative ungünstigere Konzeptualisierung erfasst⁸⁴.

Fazit: Das Kriterium 'Räumliche Ausdehnung' wird für die Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger' in den Standortgebieten Zürich Nordost und Nördlich Lägern insgesamt als *sehr günstig* beurteilt.

Hydraulische Barrierenwirkung (Kriterium 1.2)

Aufgrund der feinen Porenstruktur und des erwarteten Selbstabdichtungsvermögens weist die Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger' innerhalb der tonreichsten Abfolgen (Parkinsoni-Württembergica-Schichten und die Variansmergel-Formation (in denen die Lagerkammern platziert werden), TA-1), die für die Bewertung der hydraulischen Durchlässigkeit massgebend sind, auch wegen des hohen Tonmineralgehalts eine sehr geringe hydraulische Durchlässigkeit auf. Der Indikator 'Hydraulische Durchlässigkeit' wird anhand der gemessenen Daten mit *sehr günstig* bewertet; unter Berücksichtigung der vorhandenen gering mächtigen Sandkalkeinschaltungen wird die Bewertung jedoch gegenüber dem Opalinuston geringfügig reduziert. Die Aussage gilt für Gebiete mit geringer bis mässiger tektonischer Überprägung. Auch unter Berücksichtigung der Resultate der Dosisberechnungen zur Barrierenwirkung bleibt die Bewertung sehr günstig.

Fazit: Das Kriterium 'Hydraulische Barrierenwirkung' wird für die Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger' in den Standortgebieten Zürich Nordost und Nördlich Lägern insgesamt als *sehr günstig* beurteilt.

⁸³ Der nutzbare Teil des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs muss alle verschärften Anforderungen bzgl. Tiefenlage erfüllen (vgl. Nagra 2008d, Anhang A1.2 bzw. Nagra 2014b, Dossiers IV und VI). Im Falle der oberen Rahmengesteine muss für die tonmineralärmeren lithofaziellen Einheiten eine Gesteinsüberdeckung von mindestens 300 m vorliegen. Dies wird in Kap. 4.2 bei der Abgrenzung der Lagerperimeter detaillierter betrachtet.

⁸⁴ Für die alternative ungünstigere Konzeptualisierung des untersten Teils des 'Braunen Doggers' (Sissach-Member von grösserer Mächtigkeit und wasserführender im westlichen Teil des Standortgebiets (vgl. Nagra 2014b, Anhang 2) bzw. ungünstige Eigenschaften der anhand der Seismik vermuteten "Schwellenzone" im zentralen Teil des Standortgebiets (vgl. Nagra 2014b, Dossier VI) ergibt sich für den Indikator 'Mächtigkeit' auch unter Berücksichtigung der Resultate der Dosisberechnungen für das Standortgebiet Nördlich Lägern nur noch eine *günstige* Bewertung (Fall SMA-NL-BD-aF2-uRG).

Geochemische Bedingungen (Kriterium 1.3)

Die Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger' weist grösstenteils hohe Tonmineralgehalte auf (tonreichste Einheiten vergleichbar mit Opalinuston). Der hohe Gehalt an Tonmineralen verleiht den tonreichsten Abfolgen des 'Braunen Doggers' (TA-1) sehr gute Rückhalteigenschaften (gutes Sorptionsvermögen, geochemische Pufferkapazität, Kolloidfiltration). Damit wird der Indikator 'Mineralogie' insgesamt als *sehr günstig* eingestuft. Was den pH-Wert betrifft, kann man aufgrund der mineralogischen Ähnlichkeit praktisch den gleichen Wert annehmen wie beim Opalinuston. Dies führt zur Bewertung *sehr günstig*. Dank des Gehalts an Pyrit und organischen Substanzen sind auch die Redox-Bedingungen *sehr günstig*.

Die Salinität liegt wie im Opalinuston bei Werten von 30 – 40 % der Meerwassersalinität (bzw. Ionenstärken von rund 0.2 Mol/L) und führt zur Bewertung des Indikators 'Salinität' *günstig*.

Die Porengrössenverteilung in den tonreichsten Abfolgen des 'Braunen Doggers' ist vergleichbar mit dem Opalinuston; der 'Braune Dogger' bietet damit auch vergleichbare Lebensbedingungen für Mikroorganismen wie der Opalinuston. Der Indikator 'Mikrobielle Prozesse' wird deshalb mit *sehr günstig* bewertet.

Die geringe Porengrösse, zusammen mit der vorteilhaften Porenstruktur (hohe Tortuosität), führt dazu, dass die tonreichsten Abfolgen des 'Braunen Doggers' ähnlich wie der Opalinuston als Kolloidfilter wirken. Der Indikator 'Kolloide' wird deshalb mit *sehr günstig* bewertet.

Fazit: Das Kriterium 'Geochemische Bedingungen' wird für den 'Braunen Dogger' in den Standortgebieten Zürich Nordost und Nördlich Lägern insgesamt als *sehr günstig* beurteilt.

Freisetzungspfade (Kriterium 1.4)

Das Selbstabdichtungsvermögen der tonreichsten Einheiten der Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger', in denen die Lagerkammern platziert werden (TA-1 in Fig. 3.1-3), dürfte etwa demjenigen des Opalinustons entsprechen. Diese Abfolge kann in guter Näherung als poröses Medium betrachtet werden. Der Indikator 'Art der Transportpfade und Ausbildung des Porenraums' wird für die tonreichsten Abfolgen (TA-1) mit *sehr günstig* bewertet. Auch unter Berücksichtigung der Resultate der Dosisberechnungen zur Barrierenwirkung bleibt die Bewertung sehr günstig.

In den Bohrungen Benken und Weiach wurden keine grösseren Störungszonen angetroffen. In der in der Nähe des Hegau-Bodenseegrabens liegenden Bohrung Schlattigen-1 wurde ein Intervall mit zwei potenziell offenen Strukturen in Humphriesiolith und Wedelsandsteinformation mit einer Durchlässigkeit von ca. 10^{-9} m/s angetroffen. Die in den tonreichen Formationen beobachteten Strukturen resultieren nicht in erhöhten Durchlässigkeiten. In den tonreichsten Abfolgen (TA-1) wird wie im Opalinuston erwartet, dass Störungszonen aufgrund des guten Selbstabdichtungsvermögens grundsätzlich dicht sind. Dies führt zu einer *sehr günstigen* Bewertung. Auch unter Berücksichtigung der Resultate der Dosisberechnungen zur Barrierenwirkung bleibt die Bewertung des Indikators 'Transmissivität präferentieller Freisetzungspfade' sehr günstig.

Dank des hohen Tonmineralgehalts wird für die tonreichsten Abfolgen des 'Braunen Doggers' (TA-1) ein ausgeprägtes Selbstabdichtungsvermögen erwartet (ähnlich wie Opalinuston). Dies führt zur Bewertung *sehr günstig* für den Indikator 'Selbstabdichtungsvermögen'.

Beim Indikator 'Homogenität des Gesteinsaufbaus' stehen innerhalb der ganzen Gesteinsabfolge des 'Braunen Doggers' Architekturelemente im Fokus, die mehrere Meter mächtig sind, über hunderte von Metern ausgedehnt sind und gegenüber dem umliegenden Gestein klar reduzierte Barriereigenschaften aufweisen und damit die Barrierenwirksamkeit des gesamten Gesteinstapels erheblich einschränken können. In dieser Hinsicht ist die Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger' mit ihren kalkigen und sandigen Einschaltungen insgesamt als *bedingt günstig* einzustufen.

Im "massgebenden Fall für die Einengung" und bei Platzierung der Lagerkammern in der Mitte der tonreichsten Abfolge innerhalb des 'Braunen Doggers' (TA-1) wird die minimale Transportpfadlänge durch deren Schichtpaketmächtigkeit bestimmt (Fig. 3.1-3); schichtparallele Beiträge zur Transportpfadlänge innerhalb dieser tonreichsten Abfolge sind kaum von Bedeutung. Der Referenzwert für die Schichtpaketmächtigkeit beträgt in beiden Standortgebieten ca. 40 m (vgl. Referenzwerte in Tab. 3.1-2 und 3.1-3). Unter vereinfachter Berücksichtigung der vertikalen Ausdehnung der SMA-Lagerkammern (inkl. Auflockerungszone) von 20 m ergibt sich in beiden Standortgebieten eine minimale Transportpfadlänge von ca. 10 m. Der Indikator 'Länge der massgebenden Freisetzungspfade' wird daher mit *ungünstig* bewertet. Auch unter Berücksichtigung der Resultate der Dosisberechnungen zur Barrierenwirkung bleibt die Bewertung ungünstig.

Es bestehen jedoch Ungewissheiten bezüglich der Wasserführung in "harten Bänken" innerhalb des 'Braunen Doggers'; diese Ungewissheiten werden durch eine alternative günstigere Konzeptualisierung erfasst⁸⁵.

Fazit: Das Kriterium 'Freisetzungspfade' wird für die Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger' in den Standortgebieten Zürich Nordost und Nördlich Lägern insgesamt als *günstig* beurteilt, trotz der ungünstigen Bewertung des Indikators 'Länge der massgebenden Freisetzungspfade'.

Gesamtbewertung der Kriteriengruppe 'Eigenschaften des Wirtgesteins' für die Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger' in den Standortgebieten Zürich Nordost und Nördlich Lägern: knapp sehr günstig.

B) Langzeitstabilität der Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger'

Beständigkeit der Gesteinseigenschaften (Kriterium 2.1)

Eine Bildung neuer Wasserwegsamkeiten durch Verkarstung ist in der Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger' nicht bekannt und aufgrund des lithologischen Gesamtaufbaus und der mineralogischen Zusammensetzung insbesondere in den tonreichsten Abfolgen des 'Braunen Doggers' auch nicht zu erwarten. Der Indikator 'Potenzial zur Bildung neuer Wasserwegsamkeiten (Verkarstung)' wird daher mit *sehr günstig* bewertet.

⁸⁵ Für die alternative günstigere Konzeptualisierung bzgl. der Wasserführung in "harten Bänken" innerhalb des 'Braunen Doggers' (Fälle *SMA-ZNO-BD-aFI-WG* und *SMA-NL-BD-aFI-WG*) ergibt sich für den Indikator 'Homogenität des Gesteinsaufbaus' in den Standortgebieten Zürich Nordost und Nördlich Lägern eine *günstige* Bewertung. Die Bewertung für den Indikator 'Länge der massgebenden Freisetzungspfade' in der alternativen Konzeptualisierung fällt auch unter Berücksichtigung der Resultate der Dosisberechnungen *ungünstig* aus, weil die Lagerkammern auch bei günstigeren Annahmen zur Wasserführung in den "harten Bänken" in den tonmineralreichen Parkinsoni-Württembergica-Schichten und der Variansmergel-Formation (lithofazielle Einheit TA-1) angeordnet werden und der Freisetzungspfad nach oben gleich bleibt wie in der Konzeptualisierung für den massgebenden Fall (vgl. gestrichelte orange Doppelpfeile in Fig. 3.1-3).

Fazit: Das Kriterium 'Beständigkeit der Gesteinseigenschaften' wird für den 'Braunen Dogger' in den Standortgebieten Zürich Nordost und Nördlich Lägern insgesamt als *sehr günstig* beurteilt.

Lagerbedingte Einflüsse (Kriterium 2.3)

Wie beim Opalinuston kann die Auflockerungszone bei Beschränkung der Tiefe der Lagerebene im Nahbereich der Untertagebauten (bei SMA konkret die Auflockerungszone im Bereich der Versiegelungsstrecken) auch in den tonreichsten Abfolgen des 'Braunen Doggers' (TA-1) durch geeignete technische Massnahmen weitgehend kontrolliert werden. Diese Massnahmen umfassen den sorgfältigen Ausbruch, die Verwendung einer geeigneten Sicherung und die Verfüllung mit einem quellfähigen Versiegelungsmaterial. Nach Einbringen der Versiegelung wird sich die Auflockerungszone in den Versiegelungsstrecken allmählich wieder aufsättigen. Diese Aufsättigung (einschliesslich zeitabhängiger Deformation, Quellung und Desintegration des Gesteins) und das Quellen des Versiegelungsmaterials führen zu einer signifikanten Reduktion der Durchlässigkeit der Risse und Klüfte in der Auflockerungszone des 'Braunen Doggers' (Selbstabdichtung). Unter Berücksichtigung des ähnlich ausgeprägten Selbstabdichtungsvermögens und der vergleichbaren Gesteinsfestigkeiten der tonreichsten Abfolgen im 'Braunen Dogger' und des Opalinustons fällt die Beurteilung des Indikators 'Auflockerungszone im Nahbereich der Untertagebauten' *günstig* aus.

Die wichtigsten lagerbedingten geochemischen Effekte sind Langzeitauswirkungen von alkalischen Zementporenwässern auf das Umfeld der Lagerkammern und die Oxidation des Wirtgesteins während der Bau- und Betriebsphase. Dank seines Verhaltens als mehrheitlich poröses Medium, der guten geochemischen Pufferkapazität und der sehr kleinen Durchlässigkeiten bleibt die Hoch-pH-Fahne in den tonreichsten Abfolgen des 'Braunen Doggers' auf die unmittelbare Umgebung der Lagerkammern beschränkt. Wie beim Opalinuston wird der Indikator 'Chemische Wechselwirkungen' für die tonreichsten Abfolgen des 'Braunen Doggers' mit *sehr günstig* bewertet.

Mit geeigneten baulichen Massnahmen kann sichergestellt werden, dass die Freisetzung von im Lager gebildetem Korrosions- und Degradationsgas keine kritische Beeinträchtigung der Barriereigenschaften der Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger' zur Folge hat. Eine entscheidende Rolle spielt dabei insbesondere die Wahl von geeigneten Verfüll- und Versiegelungsmaterialien für die Zugangsstollen (Schaffung von untertägigem Speicherraum; kontrollierte Ableitung der Gase über die Versiegelungsstrecken) sowie die Möglichkeit der Behandlung gewisser radioaktiver Abfälle. In der Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger' wird wegen der gegenüber dem Opalinuston insgesamt etwas grösseren Heterogenität das Gas voraussichtlich etwas einfacher durch das Wirtgestein entweichen können (niedriger Gaseintrittsdruck). Dennoch wird der Indikator 'Verhalten des Wirtgesteins bezüglich Gas' für die tonreichsten Abfolgen des 'Braunen Doggers' ebenfalls mit *bedingt günstig* bewertet.

Der Indikator 'Verhalten des Wirtgesteins bezüglich Temperatur' ist für das SMA-Lager nicht relevant und wird deshalb nicht beurteilt.

Fazit: Das Kriterium 'Lagerbedingte Einflüsse' wird für die Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger' in den Standortgebieten Zürich Nordost und Nördlich Lägern insgesamt als *günstig* beurteilt.

Nutzungskonflikte (Kriterium 2.4)

Innerhalb der Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger' sind keine nutzbaren Rohstoffe bekannt. Die im süddeutschen Raum als Aquifere resp. Kohlenwasserstoff-Speichergesteine ausgebildeten Dogger- β -Sandsteine sind in dieser Form im Raum der Standortgebiete nicht bekannt. Deshalb fällt die Bewertung des Indikators 'Rohstoffvorkommen innerhalb des Wirtgesteins' *sehr günstig* aus.

Fazit: Das Kriterium 'Nutzungskonflikte' wird für die Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger' in den Standortgebieten Zürich Nordost und Nördlich Lägern insgesamt als *sehr günstig* beurteilt.

Gesamtbewertung der Kriteriengruppe 'Langzeitstabilität' für die Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger' in den Standortgebieten Zürich Nordost und Nördlich Lägern: *sehr günstig*.

C) Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen zur Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger'

Charakterisierbarkeit der Gesteine (Kriterium 3.1)

Die Charakterisierbarkeit der Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger' wird anhand der Indikatoren 'Variabilität der Gesteinseigenschaften im Hinblick auf ihre Charakterisierbarkeit' und 'Erfahrungen' erfasst.

Die Beurteilung des Indikators 'Variabilität der Gesteinseigenschaften im Hinblick auf ihre Charakterisierbarkeit' erfolgt anhand der Merkmale Lagerungsverhältnisse, Homogenität bzw. Heterogenität der Gesteinsbeschaffenheit, Variabilität der Gesteinseigenschaften, Existenz und Art von Diskontinuitäten als Folge der tektonischen Überprägung. Die für die Bewertung massgebende tonreichste Abfolge des 'Braunen Doggers' (TA-1, Wirtgestein *sensu stricto*), welche aus den Parkinsoni-Württembergica-Schichten und der Variansmergel-Formation besteht, ist bezüglich dieser Merkmale etwa ähnlich einzustufen wie der Opalinuston. Insbesondere sind auch bei tektonischer Überprägung wegen des hohen Selbstabdichtungsvermögens keine bevorzugten Fliesspfade mit ungünstigen Rückhalteigenschaften zu erwarten. Aufgrund der im Dezimeterbereich vorhandenen sandig-kalkigen Bänke wird die tonreichste Abfolge des 'Braunen Doggers' (TA-1) etwas schlechter bewertet als der Opalinuston. Der Indikator 'Variabilität der Gesteinseigenschaften im Hinblick auf ihre Charakterisierbarkeit' wird aber trotzdem noch knapp als *sehr günstig* eingestuft.

Es bestehen jedoch Ungewissheiten bezüglich der Wasserführung in "harten Bänken" innerhalb des 'Braunen Doggers'; diese Ungewissheiten werden durch eine alternative günstigere Konzeptualisierung erfasst⁸⁶.

⁸⁶ Für die alternative günstigere Konzeptualisierung bzgl. der Wasserführung in "harten Bänken" innerhalb des 'Braunen Doggers' (Fälle *SMA-ZNO-BD-aF1-WG* und *SMA-NL-BD-aF1-WG*) ergibt sich für den Indikator 'Variabilität der Gesteinseigenschaften im Hinblick auf ihre Charakterisierbarkeit' in den Standortgebieten Zürich Nordost und Nördlich Lägern eine *bedingt günstige* Bewertung. Begründung: Während im massgebenden Fall für die Einengung nur die zuverlässige Erkundung der Lage der "harten Bänke" erforderlich ist (insbesondere die Grenzen der tonreichsten Abfolge TA-1 innerhalb des 'Braunen Doggers'), muss in der alternativen Konzeptualisierung zusätzlich auch der Nachweis der nicht vorhandenen hydraulischen Kontinuität in den "harten Bänken" erbracht werden.

Während Tongesteine weltweit sehr eingehend untersucht werden, werden Tonformationen mit sandig-kalkigen Einschaltungen international nur selten als mögliche Wirtgesteine für radioaktive Abfälle in Betracht gezogen. In der Schweiz wurden in jüngerer Zeit verschiedene Untersuchungen zur Charakterisierung des 'Braunen Doggers' durchgeführt (vgl. Nagra 2014b, Dossier II und VI). Ferner weisen grosse Bereiche der Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger' ähnliche Eigenschaften wie der Opalinuston auf, weshalb man diesbezüglich von den vorhandenen Erfahrungen profitieren kann. Bis zu einem gewissen Grad ist es auch möglich, auf Erfahrungen mit verwandten Gesteinen und auf Analogieschlüsse zurückzugreifen. Aus diesen Gründen wird der Indikator 'Erfahrungen' für die Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger' trotzdem noch knapp als *günstig* eingestuft.

Fazit: Das Kriterium 'Charakterisierbarkeit der Gesteine' wird für die Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger' in den Standortgebieten Zürich Nordost und Nördlich Lägern insgesamt als *günstig* beurteilt.

Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse (Kriterium 3.2)

Der Indikator 'Explorationsverhältnisse im geologischen Untergrund' wird anhand der Existenz von seismischen Markerhorizonten im oder in der Nähe des Wirtgesteins sowie anhand der Homogenität des Wirtgesteins (inkl. lateraler Korrelationslängen) beurteilt unter Berücksichtigung der Möglichkeit, den Zielwert bezüglich zu detektierender Versätze zu erreichen⁸⁷. Aufgrund der seismischen Impedanzkontraste der Sedimentgesteinsabfolgen unterhalb des Opalinustons und in reduzierter Qualität auch unterhalb und oberhalb der Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger' sowie stratigraphischen Informationen können die Untergrenze und teilweise auch die Obergrenze des Wirtgesteinskörpers und die Lage von Störungszonen mit Versätzen von 10 und mehr Metern mittels 3D-Seismik zuverlässig erfasst werden, kleinere Versätze sind nicht zuverlässig erfassbar. Die Identifikation von kalkigen und sandigen Untereinheiten ist mit reflexionsseismischen Methoden wegen der variablen und relativ geringen Mächtigkeiten und relativ geringen Impedanzkontraste nur ansatzweise oder gar nicht möglich.

Die flächenhafte Exploration der Geometrie der Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger' ist aufgrund eines tiefer liegenden Markerhorizonts und den Mächtigkeitsdaten für den Opalinuston weitgehend gegeben, wenn auch mit einer weniger guten Qualität als beim Opalinuston. Die ausgeprägte Variabilität der Gesteinsausbildung und Mächtigkeit der einzelnen Schichten ergibt einen lateral eingeschränkten Gültigkeitsbereich für die Wirtgesteinseigenschaften. Örtlich beschriebene Eigenschaften sind also nur bedingt auf das ganze Standortgebiet oder auf andere Standortgebiete übertragbar.

Die für die Barrierenwirkung des 'Braunen Doggers' wichtigen Explorationsziele, nämlich die zuverlässige Erkundung der Lage und der Nachweis der fehlenden Kontinuität von "harten Bänken" sowie die Abwesenheit auch von kleinen Versätzen in diesen "harten Bänken", können nicht zuverlässig erreicht werden. Deshalb wird der Indikator 'Explorationsverhältnisse im geologischen Untergrund' mit *bedingt günstig* bewertet.

Fazit: Das Kriterium 'Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse' wird für die Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger' in den Standortgebieten Zürich Nordost und Nördlich Lägern insgesamt als *bedingt günstig* beurteilt.

⁸⁷ Ziel ist es nachzuweisen, dass innerhalb der Lagerperimeter keine Versätze bestehen, welche in den "harten Bänken" (Sandkalkabfolgen) zu einer erhöhten Wasserführung führen. Schon Versätze im Meterbereich können zu einer Erhöhung der Wasserführung führen.

Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen (Kriterium 3.3)

Die Fähigkeit der Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger' zur Langzeitisolation wird durch unabhängige hydrochemische Evidenzen bestätigt (Bohrungen Benken und Schlattingen). Gemäss den vorhandenen Daten verlaufen die Profile der natürlichen Tracer Chlorid, Wasserisotope und Helium innerhalb der Fehlergrenzen und natürlichen Streubreiten praktisch kontinuierlich vom Opalinuston durch den 'Braunen Dogger', d.h. es sind keine klaren Anomalien feststellbar, die auf eine Zirkulation von Grundwässern in einzelnen Gesteinseinheiten (z.B. Wedelsandstein-Formation) hinweisen. Wegen der vorhandenen Sandkalkeinschaltungen mit ihrem deutlich schlechteren Selbstabdichtungsvermögen werden jedoch die Evidenzen im Vergleich mit dem Opalinuston als schwächer eingestuft. Insgesamt wird jedoch der Indikator 'Unabhängige Evidenzen der Langzeitisolation' trotzdem noch knapp als *sehr günstig* eingestuft.

Fazit: Das Kriterium 'Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen' wird für die Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger' in den Standortgebieten Zürich Nordost und Nördlich Lägern insgesamt knapp als *sehr günstig* beurteilt.

Gesamtbewertung der Kriteriengruppe 'Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen' für die Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger' in den Standortgebieten Zürich Nordost und Nördlich Lägern: *günstig*.

D) Bautechnische Eignung der Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger'

Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen (Kriterium 4.1)

In der Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger' sind im betrachteten Verbreitungsraum keine Untertagebauten bekannt. Aufgrund der Resultate felsmechanischer Untersuchungen an Proben des 'Braunen Doggers' aus der Bohrung Schlattingen und aufgrund von lithologischen Analogien und der ähnlichen maximalen Versenkungstiefe ergeben sich Festigkeiten und Steifigkeiten für die tonreichste Abfolge des 'Braunen Doggers', die zu ähnlichen Festigkeiten und einem ähnlichen Verformungsverhalten wie beim Opalinuston führen. Die vorhandenen Einschaltungen sandig-kalkiger Partien lassen zwar insgesamt höhere Gesteinsfestigkeiten als für die tonigmergeligen Schichten erwarten, werden aber die Homogenität des Gebirges vermindern.

Die Untertagebauten (inkl. Lagerkammern) müssen mit einem angemessenen Ausbau gesichert werden. Die bautechnische Machbarkeit ist generell gewährleistet; beim Bau der Lagerkammern sind allerdings Erschwernisse, welche anspruchsvolle Bauverfahren erforderlich machen, nicht auszuschliessen.

Der Indikator 'Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften' wird bei Beschränkung der maximalen Tiefenlage insgesamt als *günstig* eingestuft. Diese Einstufung gilt für Gebiete mit geringer tektonischer Überprägung und berücksichtigt den Grundsatz, dass bei der Bewertung ausschliesslich die Sicherheit und Machbarkeit eine Rolle spielen sollen, nicht aber der Aufwand. Die Beurteilung der maximalen Tiefenlage der Lagerkammern erfolgt in Kap. 4.4.

Fazit: Das Kriterium 'Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen' wird für die Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger' in den Standortgebieten Zürich Nordost und Nördlich Lägern insgesamt als *günstig* beurteilt.

Gesamtbewertung der Kriteriengruppe 'Bautechnische Eignung' für die Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger' in den Standortgebieten Zürich Nordost und Nördlich Lägern: *günstig*.

Prüfung der Sensitivität der Bewertungen für die Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger'

Zur Prüfung der Sensitivität der Bewertungen der oben für den "massgebenden Fall" durchgeführten Bewertungen werden diese mit den Bewertungen für alternative konzeptuelle Annahmen zur Wasserführung in "harten Bänken" innerhalb des 'Braunen Doggers' sowie zur Barrierenwirkung der Rahmengesteine verglichen (vgl. dazu die Bewertungen in Anhang C.2.1.2). Der Vergleich der Bewertungen ergibt folgendes Bild:

Für die alternative Annahme, dass zumindest die weniger mächtigen "harten Bänke" im 'Braunen Dogger' nicht hydraulisch verbunden sind und somit die Barrierenwirksamkeit des gesamten Gesteinsstapels des 'Braunen Doggers' nicht in erheblichem Masse reduzieren (Fälle *SMA-ZNO-BD-aF1-WG* und *SMA-NL-BD-aF1-WG*), führt für den Indikator 'Homogenität des Gesteinsaufbaus' zu einer *günstigen* Bewertung. Während im massgebenden Fall für die Einengung nur die zuverlässige Erkundung der Lage der "harten Bänke" erforderlich ist (insbesondere die Grenzen der tonreichsten Abfolge TA-1 innerhalb des 'Braunen Doggers'), muss in diesem alternativen Fall zusätzlich auch der Nachweis der nicht vorhandenen hydraulischen Kontinuität in den "harten Bänken" erbracht werden. Aus diesen Gründen wird die Bewertung des Indikators 'Variabilität der Gesteinseigenschaften im Hinblick auf ihre Charakterisierbarkeit' von sehr günstig auf *bedingt günstig* reduziert.

Für den untersten Teil des 'Braunen Doggers' bestehen im Standortgebiet Nördlich Lägern Ungewissheiten, welche durch eine alternative ungünstigere Konzeptualisierung erfasst werden (Fall *SMA-NL-BD-aF2-uRG*). Dadurch reduziert sich die Bewertung des Indikators 'Mächtigkeit' von sehr günstig auf *günstig*.

Fazit: Die alternativen konzeptuellen Annahmen zur Wasserführung in "harten Bänken" innerhalb der Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger' in den Standortgebieten Zürich Nordost und Nördlich Lägern sowie zur Barrierenwirkung des untersten Teils des 'Braunen Doggers' im Standortgebiet Nördlich Lägern führen nicht zu einer signifikant anderen Gesamtbewertung.

3.3.3 Effinger Schichten

Entstehung und Hauptmerkmale

Die Effinger Schichten sind als marine Sedimente während der jüngeren Jurazeit vor rund 160 Millionen Jahren entstanden. Der Ablagerungsraum war im Vergleich zu demjenigen des Opalinustons stärker strukturiert. Je nach Wassertiefe und Lage des Beckens lagerten sich eher tonige bzw. siliziklastische oder eher kalkige Sedimente ab.

Innerhalb der Effinger Schichten treten gebietsweise bis zu mehrere Dekameter mächtige Kalkmergelabfolgen auf, deren Tonmineralgehalt jedoch deutlich tiefer ist als derjenige des Opalinustons. Zwischen diesen Kalkmergelabfolgen sind einzelne Kalkbankabfolgen eingeschaltet. Wegen der Kalkbankabfolgen ist die (vertikale) Homogenität der Effinger Schichten im Meterbereich bedeutend ungünstiger als diejenige des Opalinustons. Bei den Kalkbankabfolgen kann eine Verkarstung nicht ausgeschlossen werden.

Die Effinger Schichten wurden im Rahmen von Etappe 1 nur im geologischen Standortgebiet Jura-Südfuss als Wirtgestein vorgeschlagen. Dort weisen sie die erforderliche Mächtigkeit in geeigneter Tiefenlage sowie eine ausreichende laterale Ausdehnung auf. Die mächtigste Kalkmergelabfolge im Standortgebiet Jura-Südfuss ist die lithofazielle Einheit KMA-5 (vgl. Fig. 3.1-3); in dieser Einheit würden die Lagerkammern platziert.

Die Effinger Schichten zeichnen sich durch eine gute Barrierenwirkung für Radionuklide aus, die primär durch den erheblichen Gehalt an Tonmineralen in den Kalkmergelabfolgen, die damit verbundene geringe Wasserführung und die guten Sorptionseigenschaften für Radionuklide gewährleistet wird.

Die Effinger Schichten sind als Gesteinsformation im Tafel- und Faltenjura weit verbreitet und werden an der Oberfläche an zahlreichen Abbaustellen v.a. als Rohstoff für die Zement-Industrie genutzt. Über die Vorkommen in grösseren Tiefen kann auf einige Erfahrungen, Kenntnisse und Daten aus Untertagebauten (Eisenbahn- und Strassentunnel, Erdöl- und Erdgasbohrungen, Erdwärmesonden, Sondierbohrungen für Deponie- und Entsorgungsprojekte) zurückgegriffen werden.

A) Eigenschaften der Effinger Schichten

Räumliche Ausdehnung (Kriterium 1.1)

Die Effinger Schichten weisen im Standortgebiet Jura-Südfuss eine nutzbare⁸⁸ Mächtigkeit von ca. 225 m auf (Referenzwert, vgl. Tab. 3.1-5). Es gibt keine Rahmengesteine mit nennenswerten Barriereigenschaften, d.h. der einschliessungswirksame Gebirgsbereich besteht ausschliesslich aus den Effinger Schichten. Entsprechend der Konzeptualisierung der Effinger Schichten bezüglich Barrierenwirkung (Berücksichtigung der "harten Bänke", vgl. grüne Doppelpfeile in Fig. 3.1-3) wird jedoch die Wirksamkeit dieser Mächtigkeit reduziert; die Bewertung des Indikators 'Mächtigkeit' fällt für die Effinger Schichten im Standortgebiet Jura-Südfuss deshalb nur *bedingt günstig* aus.

Fazit: Das Kriterium 'Räumliche Ausdehnung' wird für die Effinger Schichten im Standortgebiet Jura-Südfuss insgesamt als *bedingt günstig* beurteilt.

Hydraulische Barrierenwirkung (Kriterium 1.2)

Die für die Bewertung der Durchlässigkeit massgebenden Kalkmergelabfolgen (insbesondere KMA-5) der Effinger Schichten haben einen signifikanten Anteil an Tonmineralen, was ein gewisses Selbstabdichtungsvermögen erwarten lässt.

Gemäss den vorhandenen Daten weisen die Kalkmergelabfolgen der Effinger Schichten in den betrachteten Verbreitungsräumen bei einer genügenden Überdeckung eine geringe hydraulische Durchlässigkeit auf (z.B. EWS-Bohrung Oftringen: $K_H < \text{ca. } 10^{-11} \text{ m/s}$). In vertikaler Richtung dürfte die Durchlässigkeit noch geringer sein. Die günstige Beurteilung der Effinger Schichten wird durch unabhängige Evidenzen zum Langzeitisoliationsvermögen bestätigt (saline Porenwasser, hohe Heliumgehalte im Porenwasser). Mit der beschränkten Datenbasis kann jedoch nicht ausgeschlossen werden, dass die grossräumige Durchlässigkeit durch steilstehende Diskontinuitäten etwas erhöht wird. Um günstige Bedingungen für eine geringe Durchlässigkeit sicher zu stellen (Kompaktion), ist eine Überdeckung von mindestens 300 m anzustreben.

⁸⁸ Der nutzbare Teil des Wirtgesteins muss alle verschärften Anforderungen bzgl. Tiefenlage erfüllen (vgl. Nagra 2008d, Anhang A1.2). Im Falle der Effinger Schichten muss eine Gesteinsüberdeckung von mindestens 300 m vorliegen.

Untersuchungen und Beobachtungen in Tunneln im Faltenjura zeigen, dass die hydraulischen Eigenschaften der Effinger Schichten durch tektonische Überprägung in gewissen Situationen und je nach Überdeckung signifikant beeinflusst sein können (wasserführende Systeme entlang von Sprödstrukturen in den Kalkbankabfolgen), was jedoch für Kalkmergelabfolgen voraussichtlich nicht zutrifft.

Der Indikator 'Hydraulische Durchlässigkeit' wird für die mächtigste Kalkmergelabfolge der Effinger Schichten (KMA-5) anhand der gemessenen Daten und unter Berücksichtigung der Erfahrungen mit Gesteinen mit Tonmineralgehalten im Bereich von 20 – 40 Gew.-% und der Ungewissheiten bezüglich des Einflusses von Diskontinuitäten als *günstig* bewertet. Auch unter Berücksichtigung der Resultate der Dosisberechnungen zur Barrierenwirkung bleibt die Bewertung *günstig*.

Fazit: Das Kriterium 'Hydraulische Barrierenwirkung' wird für die Effinger Schichten im Standortgebiet Jura-Südfuss insgesamt als *günstig* beurteilt.

Geochemische Bedingungen (Kriterium 1.3)

Die geochemischen Bedingungen in den Effinger Schichten in einer geeigneten geologisch-tektonischen Situation können als stabil bezeichnet werden. Sie sind – wie im Opalinuston – weitgehend durch Gleichgewichtsreaktionen mit den Mineralen (v.a. Tonminerale, Karbonate, Pyrit, organische Stoffe) bestimmt. Für das Sorptionsvermögen in der für die Bewertung massgebenden Kalkmergelabfolge werden grundsätzlich günstige Verhältnisse erwartet.

Damit wird der Indikator 'Mineralogie' für die mächtigste Kalkmergelabfolge der Effinger Schichten (KMA-5) als *günstig* eingestuft. Ausgehend von den vorhandenen Messungen (Nagra 2014b, Dossier VI) und aufgrund mineralogischer Analogien ist es plausibel anzunehmen, dass der pH-Wert wie beim Opalinuston bzw. bei den Mergel-Formationen des Helvetikums im neutralen Bereich liegt. Dies führt zur Bewertung *sehr günstig*. Dank des Gehalts an Pyrit und organischen Substanzen sind auch die Redox-Bedingungen *sehr günstig*.

Die Salinität liegt bei einer Ionenstärke von ca. 0.7 Mol/L und führt zu einer *günstigen* Bewertung des Indikators 'Salinität'.

In den Kalkmergelabfolgen der Effinger Schichten gibt es Poren bzw. Diskontinuitäten von grösserer Abmessung als im Opalinuston; damit bieten die Effinger Schichten vermutlich tendenziell etwas günstigere Lebensbedingungen für Mikroorganismen, insbesondere in der Auflockerungszone in der Anfangsphase nach Verschluss der Lagerkammern. Der Indikator 'Mikrobielle Prozesse' wird deshalb etwas weniger positiv bewertet als beim Opalinuston, nämlich *günstig*.

Kleinere Störungen und Klüfte, denen mit den Lagerkammern nicht ausgewichen werden kann und die als Fließpfade für Kolloide dienen könnten, sind – im Unterschied zum Opalinuston – in den Effinger Schichten auch in den Kalkmergelabfolgen nicht auszuschliessen, sodass die Kolloidfiltration trotz Selbstabdichtung beeinträchtigt sein könnte. Der Indikator 'Kolloide' wird deshalb weniger positiv bewertet als beim Opalinuston, nämlich *bedingt günstig*.

Fazit: Das Kriterium 'Geochemische Bedingungen' wird für die Effinger Schichten im Standortgebiet Jura-Südfuss insgesamt als *günstig* beurteilt.

Freisetzungspfade (Kriterium 1.4)

Im Bereich der für die Bewertung massgebenden Kalkmergel haben die Effinger Schichten geringe Durchlässigkeiten, und für allenfalls vorhandene Diskontinuitäten werden geringe Transmissivitäten erwartet, sodass diese voraussichtlich eine untergeordnete Rolle spielen. Die Kalkmergel der Effinger Schichten sind voraussichtlich ein poröses Medium mit Diskontinuitäten, wobei in den Kalkmergeln mit wenig ausgeprägtem lokalisiertem Wasserfluss und günstigen Bedingungen für Matrixdiffusion gerechnet wird. Da den Kalkbankabfolgen mit den Lagerkammern ausgewichen wird und der massgebliche Teil des vertikalen Freisetzungspfades durch die Kalkmergelabfolge verläuft (KMA-5, vgl. Fig. 3.1-3), wird der Indikator 'Art der Transportpfade und Ausbildung des Porenraums' mit *günstig* bewertet. Auch unter Berücksichtigung der Resultate der Dosisberechnungen zur Barrierenwirkung bleibt die Bewertung günstig.

In der mächtigsten Kalkmergelabfolge (KMA-5), in der die Lagerkammern platziert würden, werden basierend auf den vorhandenen Messungen Transmissivitätswerte deutlich $< 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ erwartet. Auch zur Berücksichtigung der erwarteten vertikalen bzw. subvertikalen Diskontinuitäten und unter Berücksichtigung der Erfahrungen bei Gesteinen mit ähnlichem Tonmineralgehalt wird die Bewertung des Indikators 'Transmissivität präferentieller Freisetzungspfade' knapp auf *günstig* gelegt. Auch unter Berücksichtigung der Resultate der Dosisberechnungen zur Barrierenwirkung bleibt die Bewertung *günstig*.

Dank des Tonmineralgehalts wird für die Effinger Schichten im Bereich der für die Bewertung massgebenden Kalkmergel eine gewisse Selbstabdichtung erwartet. Wegen des höheren Karbonatgehalts wird das Selbstabdichtungsvermögen aber als deutlich weniger gut als im Opalinuston eingeschätzt. Insgesamt führt dies für den Indikator 'Selbstabdichtungsvermögen' zur Bewertung knapp *günstig*.

Beim Indikator 'Homogenität des Gesteinsaufbaus' – mit welchem die gesamte Gesteinsabfolge der Effinger Schichten (Kalkmergel- und Kalkbankabfolgen) erfasst wird – sind für die Bewertung diejenigen Architekturelemente massgebend, die mehrere Meter mächtig sind, über hunderte von Metern ausgedehnt sind und die gegenüber dem umliegenden Gestein eine klar erhöhte Wasserführung und klar reduzierte Barrierenwirkung aufweisen. Wegen der Kalkbankabfolgen sind in dieser Hinsicht die Effinger Schichten gleich einzustufen wie die Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger' mit ihren Sandkalkabfolgen und erhalten somit insgesamt die Bewertung *bedingt günstig*.

Im "massgebenden Fall für die Einengung" und bei Platzierung der Lagerkammern in der Mitte der Kalkmergelabfolge innerhalb der Effinger Schichten (KMA-5) wird die minimale Transportpfadlänge durch deren Schichtpaketmächtigkeit bestimmt (Fig. 3.1-3); schichtparallele Beiträge zur Transportpfadlänge innerhalb dieser Kalkmergelabfolge sind kaum von Bedeutung. Der Referenzwert für die Schichtpaketmächtigkeit beträgt ca. 44 m (Referenzwert, vgl. Tab. 3.1-5). Unter vereinfachter Berücksichtigung der vertikalen Ausdehnung der SMA-Lagerkammern (inkl. Auflockerungszone) von 20 m ergibt sich eine minimale Transportpfadlänge von ca. 12 m. Der Indikator 'Länge der massgebenden Freisetzungspfade' wird daher mit *ungünstig* bewertet. Die Resultate der Dosisberechnungen zeigen die ungünstige Barrierenwirkung für diesen Fall und bestätigen die Bewertung ungünstig.

Fazit: Das Kriterium 'Freisetzungspfade' wird für die Effinger Schichten im Standortgebiet Jura-Südfuss insgesamt als *bedingt günstig* beurteilt. Dabei ist zu beachten, dass die 'Länge der massgebenden Freisetzungspfade' mit ungünstig bewertet wird.

Gesamtbewertung der Kriteriengruppe 'Eigenschaften des Wirtgesteins' für die Effinger Schichten im Standortgebiet Jura-Südfuss: *günstig*.

B) Langzeitstabilität der Effinger Schichten

Beständigkeit der Gesteinseigenschaften (Kriterium 2.1)

Die für die Bewertung massgebenden Kalkbankabfolgen in den Effinger Schichten haben ein nicht vernachlässigbares Potenzial zur Verkarstung (rezenter Karst vor allem im Faltenjura, hypogener Karst im Gebiet des Jura-Südfuss wegen der Möglichkeit der Mischung von Tiefengrundwässern mit unterschiedlicher Chemie). Im geologischen Standortgebiet Jura-Südfuss ist die Bildung neuer Wasserwegsamkeiten in den Effinger Schichten durch Verkarstung zwar wenig wahrscheinlich, unter Berücksichtigung des hypogenen Karsts jedoch nicht auszuschliessen. Deshalb wird der Indikator 'Potenzial zur Bildung neuer Wasserwegsamkeiten (Verkarstung)' als *bedingt günstig* eingestuft.

Fazit: Das Kriterium 'Beständigkeit der Gesteinseigenschaften' wird für die Effinger Schichten im Standortgebiet Jura-Südfuss insgesamt als *bedingt günstig* beurteilt.

Lagerbedingte Einflüsse (Kriterium 2.3)

Wie beim Opalinuston kann die Auflockerungszone im Nahbereich der Untertagebauten (bei SMA konkret die Auflockerungszone im Bereich der Versiegelungsstrecken) bei Beschränkung der Tiefe der Lagerebene auch in den Kalkmergelabfolgen der Effinger Schichten (KMA-5) durch geeignete technische Massnahmen weitgehend kontrolliert werden. Die gegenüber dem Opalinuston grösseren Festigkeiten des intakten Gesteins lassen bei den Effinger Schichten bei sonst gleichen Bedingungen eine kleinere Ausdehnung der Auflockerungszone erwarten. In den Effinger Schichten ist im Bereich der Kalkmergel jedoch eine geringere Selbstabdichtung der Auflockerungszone zu erwarten als im Opalinuston. Unter Berücksichtigung des Selbstabdichtungsvermögens ergibt sich für den Indikator 'Auflockerungszone im Nahbereich der Untertagebauten' deshalb auch die Bewertung knapp *günstig*, und ist somit im Vergleich mit dem Opalinuston etwas ungünstiger.

Die wichtigsten lagerbedingten geochemischen Effekte sind Langzeitauswirkungen von alkalischen Zementporenwässern auf das Umfeld der Lagerkammern und die Oxidation des Wirtgesteins während der Bau- und Betriebsphase. Dank der geringen Durchlässigkeit, dem wenig ausgeprägten lokalisierten Wasserfluss sowie der chemischen Pufferkapazität bleibt die Hoch-pH-Fahne voraussichtlich in den Kalkmergelabfolgen der Effinger Schichten auf die Umgebung der Lagerkammern beschränkt. Da die Ausdehnung der Hoch-pH-Fahne jedoch etwas grösser wäre als beim Opalinuston, wird der Indikator 'Chemische Wechselwirkungen' als *günstig* bewertet.

Wegen der gegenüber dem Opalinuston insgesamt etwas grösseren Heterogenität (inkl. Diskontinuitäten) wird das Gas voraussichtlich etwas einfacher durch das Wirtgestein entweichen können. Durch Massnahmen (Schaffung von untertägigem Speicherraum, kontrollierte Ableitung des Gases über die Versiegelungsstrecken, Behandlung gewisser radioaktiver Abfälle) kann bei Bedarf für eine weitere Entschärfung der Gasproblematik gesorgt werden. Daher wird der Indikator 'Verhalten des Wirtgesteins bezüglich Gas' mit *günstig* bewertet.

Der Indikator 'Verhalten des Wirtgesteins bezüglich Temperatur' ist für das SMA-Lager nicht relevant und wird deshalb nicht beurteilt.

Fazit: Das Kriterium 'Lagerbedingte Einflüsse' wird für die Effinger Schichten im Standortgebiet Jura-Südfuss insgesamt als *günstig* beurteilt.

Nutzungskonflikte (Kriterium 2.4)

Die Effinger Schichten sind als Rohstoff für die Zementherstellung gut geeignet und werden deshalb in der Nordschweiz in verschiedenen Steinbrüchen abgebaut. Der untertägige Abbau in Tiefenlagen im Bereich 200 – 800 m ist wirtschaftlich nicht sinnvoll, da genügend oberflächennahe Vorkommen bestehen. Innerhalb der Effinger Schichten sind keine weiteren nutzbaren Rohstoffe bekannt. Die Bewertung des Indikators 'Rohstoffvorkommen innerhalb des Wirtgesteins' fällt daher *sehr günstig* aus.

Fazit: Das Kriterium 'Nutzungskonflikte' wird für die Effinger Schichten im Standortgebiet Jura-Südfuss insgesamt als *sehr günstig* beurteilt.

Gesamtbewertung der Kriteriengruppe 'Langzeitstabilität' für die Effinger Schichten im Standortgebiet Jura-Südfuss: *günstig*.

C) Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen zu den Effinger Schichten

Charakterisierbarkeit der Gesteine (Kriterium 3.1)

Die Charakterisierbarkeit der Effinger Schichten wird anhand der Indikatoren 'Variabilität der Gesteinseigenschaften im Hinblick auf ihre Charakterisierbarkeit' und 'Erfahrungen' erfasst.

Die Beurteilung des Indikators 'Variabilität der Gesteinseigenschaften im Hinblick auf ihre Charakterisierbarkeit' erfolgt anhand der Merkmale Lagerungsverhältnisse, Homogenität / Heterogenität der Gesteinsbeschaffenheit, Variabilität der Gesteinseigenschaften, Existenz und Art von Diskontinuitäten als Folge der tektonischen Überprägung. Für die Bewertung ist die mächtigste Kalkmergelabfolge (KMA-5) der Effinger Schichten massgebend, in welcher die Lagerkammern platziert werden (Wirtgestein *sensu stricto*). Die Kontinuität der Schichten der Kalkmergelabfolge über mehrere km ist – basierend auf Korrelationen von bohrlochgeophysikalischen Logs – verhältnismässig gut gewährleistet. Die Kalkmergelabfolgen der Effinger Schichten haben ein mässig gutes Selbstabdichtungsvermögen (lithofazielle Einheiten der Kategorie 2, Nagra 2014b, Dossier VI). In diesen Einheiten kann eine gewisse hydraulische Wirksamkeit von allfälligen tektonisch-strukturellen Elementen nicht ausgeschlossen werden. Durch tektonische Überprägung können kleinere, seismisch nicht erfassbare Störungen auftreten, welche nicht zuverlässig lokalisierbar und charakterisierbar sind (vgl. Nagra 2014b, Dossier VIII). Der Indikator 'Variabilität der Gesteinseigenschaften im Hinblick auf ihre Charakterisierbarkeit' wird deshalb mit *bedingt günstig* bewertet.

Während Tongesteine weltweit sehr eingehend untersucht werden, werden Formationen aus Kalkmergeln mit kalkigen Einschaltungen international nur selten als mögliche Wirtgesteine für radioaktive Abfälle in Betracht gezogen. In der Schweiz wurde jedoch mit den verschiedenen durchgeführten Untersuchungen zur Charakterisierung der Effinger Schichten eine gewisse Erfahrung aufgebaut (Nagra 2014b, Dossier II). Ferner bestehen Erfahrungen mit ähnlichen Wirtgesteinen dank der detaillierten Untersuchungen, die in den helvetischen Mergel-Formationen (insbesondere Wellenberg) durchgeführt wurden. Allerdings sind diese Erfahrungen aufgrund des anderen geologisch-tektonischen Umfelds der Alpen nur beschränkt auf die Effinger Schichten übertragbar. Insgesamt gelangt man damit für den Indikator 'Erfahrungen' zur Bewertung *günstig*.

Fazit: Das Kriterium 'Charakterisierbarkeit der Gesteine' wird für die Effinger Schichten im Standortgebiet Jura-Südfuss insgesamt als *bedingt günstig* beurteilt.

Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse (Kriterium 3.2)

Der Indikator 'Explorationsverhältnisse im geologischen Untergrund' wird anhand der Existenz von seismischen Markerhorizonten im oder in der Nähe des Wirtgesteins sowie anhand der Homogenität des Wirtgesteins (inkl. lateraler Korrelationslängen) beurteilt unter Berücksichtigung der Möglichkeit, den Zielwert bezüglich zu detektierender Versätze zu erreichen⁸⁹. Aufgrund der eher bescheidenen seismischen Impedanzkontraste der Sedimentgesteinsabfolgen ober- und unterhalb der Effinger Schichten können die Ober- und Untergrenze des Wirtgesteinskörpers und die Lage von Störungzonen mittels 2D-Seismik nur mit gewissen Unschärfen erfasst werden. Vertikalversätze von 10 und mehr Metern sind aber voraussichtlich mit hochauflösender 3D-Seismik an Markern ausserhalb des Wirtgesteins noch erkennbar, ebenso der laterale Verlauf von Störungen mit einer Längserstreckung von mehr als 150 m. Kleinere durch tektonische Überprägung verursachte Störungen des Wirtgesteinskörpers können mit seismischen Untersuchungen von der Erdoberfläche aus nicht zuverlässig erfasst werden.

Die Identifikation von Kalkbankabfolgen, welche aus hydrogeologischer Sicht eine wichtige Rolle spielen, ist mit reflexionsseismischen Methoden wegen ihrer geringeren Mächtigkeiten (in der Regel < 10 m) schwierig, ausser im Falle der Gerstenhübel-Schichten. Aufgrund ihrer meist bedeutenden Kontinuität können sie jedoch mit Hilfe mehrerer Bohrungen untereinander korreliert werden. Dadurch wird gewährleistet, dass Abfolgen mit ungünstigen Eigenschaften bei der Platzierung der Lagerkammern ausgewichen werden kann.

Einen wichtigen Aspekt hinsichtlich der Explorierbarkeit bilden kleinere, seismisch nicht erkennbare Störungen mit geringem Versatz, welche im Schnittbereich mit Kalkbankabfolgen eine erhöhte horizontale hydraulische Durchlässigkeit über längere Distanzen aufweisen können. Der Nachweis, dass solch geringe Versätze nicht existieren, ist jedoch mit der Seismik nicht möglich.

Die für die Barrierenwirkung der Effinger Schichten wichtigen Explorationsziele, nämlich der Nachweis der fehlenden Kontinuität von wenig mächtigen Kalkbankabfolgen und der Abwesenheit auch von kleinen Versätzen in kontinuierlichen Kalkbankabfolgen, können nicht zuverlässig erreicht werden. Deshalb wird der Indikator 'Explorationsverhältnisse im geologischen Untergrund' für die Effinger Schichten im Standortgebiet Jura-Südfuss mit *bedingt günstig* bewertet.

Fazit: Das Kriterium 'Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse' wird für die Effinger Schichten im Standortgebiet Jura-Südfuss insgesamt als *bedingt günstig* beurteilt.

Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen (Kriterium 3.3)

Die in der EWS-Bohrung Oftringen beobachtete hohe Salinität der Porenwässer und die durchwegs hohen, mit dem Opalinuston der Bohrung Benken vergleichbaren Heliumgehalte (Nagra 2014b, Dossier VI) bilden klare Evidenzen der Langzeitisolation. Der Indikator 'Unabhängige Evidenzen der Langzeitisolation' wird für die Effinger Schichten mit knapp *sehr günstig* bewertet.

Fazit: Das Kriterium 'Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen' wird für die Effinger Schichten im Standortgebiet Jura-Südfuss insgesamt knapp als *sehr günstig* beurteilt.

⁸⁹ Ziel ist es nachzuweisen, dass innerhalb des Lagerperimeters keine Versätze/Diskontinuitäten bestehen, welche in den "harten Bänken" (Kalkbankabfolgen) zu einer erhöhten Wasserführung führen. Schon Versätze im Meterbereich können eine Erhöhung der Wasserführung bewirken.

Gesamtbewertung der Kriteriengruppe 'Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen' für die Effinger Schichten im Standortgebiet Jura-Südfuss: *günstig*.

D) Bautechnische Eignung der Effinger Schichten

Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen (Kriterium 4.1)

Erfahrungen aus dem Tunnelbau, vor allem im Faltenjura über die vergangenen hundert Jahre, haben gezeigt, dass Strassen- und Eisenbahntunnel in den Effinger Schichten mit Überlagerungen von bis zu 600 m gebaut werden können. Die wenigen vorhandenen Literaturdaten und die Untersuchungen an Proben aus der EWS-Bohrung Oftringen zeigen für die Effinger Schichten deutlich höhere Steifigkeiten und Festigkeiten als für Opalinuston.

Generell sind die tonig-mergeligen und karbonatreichen Schichten in ihren felsmechanischen Eigenschaften heterogen und weisen eine grosse Bandbreite der einaxialen Druckfestigkeit auf. Für die interessierende Tiefenlage liegen die Werte zwischen 50 und 90 MPa (je nach lithologischer Ausprägung und Wassergehalt, vgl. Nagra 2014b, Dossier IV). Aufgrund der petrophysikalischen Daten wird nur eine geringe Anisotropie in den felsmechanischen Eigenschaften erwartet. Im Vergleich zum Opalinuston ergibt dies einen kleineren Einfluss der Schichtung.

Insgesamt sind die bautechnischen Eigenschaften günstiger als im Opalinuston. Bei geringer tektonischer Überprägung wird der Indikator 'Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften' daher mit *sehr günstig* bewertet. Durch die tektonische Überprägung im geologischen Standortgebiet Jura-Südfuss (kleinräumige Zerklüftung) sind allenfalls gewisse bautechnische Erschwernisse zu erwarten.

Fazit: Das Kriterium 'Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen' wird für die Effinger Schichten im Standortgebiet Jura-Südfuss insgesamt als *sehr günstig* beurteilt.

Gesamtbewertung der Kriteriengruppe 'Bautechnische Eignung' für die Effinger Schichten im Standortgebiet Jura-Südfuss: *sehr günstig*.

Prüfung der Sensitivität der Bewertungen für die Effinger Schichten

Für die Effinger Schichten gibt es keine bedeutenden Ungewissheiten bezüglich der Wasserführung in "harten Bänken", welche die Kalkmergelabfolge KMA-5 begrenzen (vgl. Fig. 3.1-3). Es existieren somit keine alternativen Konzeptualisierungen.

3.3.4 Mergel-Formationen des Helvetikums

Entstehung und Hauptmerkmale

Im Ablagerungsraum der Sedimentgesteine der Helvetischen Decken herrschten vorwiegend flachmarine Bedingungen mit zyklischer Sedimentation. Vor allem im südlichen Bereich wurden tonreiche Sedimente von beachtlicher Mächtigkeit abgelagert. Bei der Deckenbildung wurden die tonigsten Abfolgen als Gleithorizonte benutzt und demzufolge einerseits lokal stark ausgedünnt, andererseits in tektonischen Akkumulationen angehäuft.

Die bedeutendsten Anhäufungen von nicht-metamorphen tonreichen Gesteinen im Helvetikum bilden die frühkretazische Abfolge Palfris-Formation (Berriasian) – Vitznau-Mergel (Valanginian) sowie die Amden-Formation der Wildhorn-Drusberg-Decke. Im Gebiet Wellenberg sind aufgrund einer speziellen tektonischen Konstellation auch die tonreichen tertiären Abfolgen⁹⁰ an der Stirn der Axen-Decke mit der Palfris-Formation und den Vitznau-Mergeln verschuppt und verfalltet, was zu einer aussergewöhnlich grossen Akkumulation tonreicher Gesteine führte.

Die Palfris-Formation und die Vitznau-Mergel bestehen vorwiegend aus dunklen siltigen bis feinsandigen Tonmergeln und Mergeln. Teilweise alternieren sie mit Kalkmergel- und Kalkbänken, welche gelegentlich in mehrere Meter mächtigen Kalkbankabfolgen konzentriert sind⁹¹.

Die Mergel-Formationen des Helvetikums wurden im Rahmen von Etappe 1 nur im Standortgebiet Wellenberg als Wirtgestein vorgeschlagen. Dort weisen sie die erforderliche Mächtigkeit in geeigneter Tiefenlage sowie eine ausreichende laterale Ausdehnung auf. Es ist vorgesehen, die Lagerkammern auf mehreren Stockwerken in geeigneter Tiefenlage innerhalb des Wirtgesteinskörpers zu platzieren.

Die Mergel-Formationen des Helvetikums zeichnen sich durch eine gute Barrierenwirkung für Radionuklide aus, die primär durch den vergleichsweise erheblichen Gehalt an Tonmineralen, die damit verbundene geringe Wasserführung und die guten Sorptionseigenschaften für Radionuklide gewährleistet wird.

Aus dem Lötschbergtunnel gibt es jedoch Hinweise (durchlässige Störungszone in Globigerinenschiefer/Schimberg-Schiefern bei 600 m Überdeckung; vgl. Nagra 2014b, Dossier VI), dass das Tertiär der Axen-Decke möglicherweise eine weniger gute Barrierenqualität haben könnte als angenommen und nicht als Wirtgestein genutzt werden kann, sodass deshalb weniger Platz für die Anordnung der Lagerkammern zur Verfügung steht⁹².

Gezielte geowissenschaftliche Untersuchungen für das SMA-Lager begannen 1987 mit mehreren Bohrungen im Seelisbergtunnel (Oberbauenstock). Ein umfangreiches Untersuchungsprogramm von der Oberfläche aus erfolgte anschliessend im Gebiet Wellenberg. Die nachfolgende Charakterisierung der Mergel-Formationen des Helvetikums basiert grösstenteils auf diesen Ergebnissen, ergänzt durch Angaben aus Untersuchungen am Oberbauenstock und im Umfahrungstunnel Sachseln.

A) Eigenschaften der Mergel-Formationen des Helvetikums

Räumliche Ausdehnung (Kriterium 1.1)

Die Ausdehnung des akkumulierten Wirtgesteinskörpers im Standortgebiet Wellenberg beträgt ca. 2 km in Nord-Süd-Richtung, mehr als 3 km in West-Ost-Richtung und bis zu 1.7 km in der Vertikalen (maximal unter dem Eggeligrat auf 1200 m ü.M. bis zur infrahelvetischen Mélange auf -500 m ü.M.). Es gibt keine Rahmengesteine mit nennenswerten Beiträgen zur Barrierenwir-

⁹⁰ In vorliegendem Bericht wird häufig auch kurz nur von "Tertiär (der Axendecke)" oder von "tertiären Schiefer" gesprochen.

⁹¹ Im nachfolgenden Text wird vereinfacht häufig nur über die Palfris-Formation gesprochen; dabei sind jedoch immer auch die Vitznau-Mergel mit eingeschlossen.

⁹² Deshalb wird in Kap. 4 als alternative Konzeptualisierung die Annahme getroffen, dass das Tertiär der Axen-Decke keine Wirtgesteinsqualität aufweist und nur die Palfris-Formation der Drusberg-Decke als Wirtgestein berücksichtigt werden kann (Fälle *SMA-WLB-aL1-r*, *SMA-WLB-aL1-re200*).

kung, d.h. der einschlusswirksame Gebirgsbereich besteht ausschliesslich aus den Mergel-Formationen des Helvetikums. Die Bewertung des Indikators 'Mächtigkeit' fällt wegen der grossen Ausdehnung des Wirtgesteinsblocks *sehr günstig* aus.⁹³

Fazit: Das Kriterium 'Räumliche Ausdehnung' wird für die Mergel-Formationen des Helvetikums im Standortgebiet Wellenberg insgesamt als *sehr günstig* beurteilt.

Hydraulische Barrierenwirkung (Kriterium 1.2)

Die umfangreichen und detaillierten hydraulischen Untersuchungen am Wellenberg und am Oberbauenstock geben ein repräsentatives Gesamtbild der hydraulischen Verhältnisse, die in Mergel-Formationen des Helvetikums zu erwarten sind.

Die Mergel-Formationen des Helvetikums im Gebiet Wellenberg haben in den betrachteten Tiefenlagen eine geringe hydraulische Durchlässigkeit. In den obersten 500 – 600 m sind die K-Werte aufgrund von Dekompaktionseffekten erhöht, darunter liegen die Messwerte in der Regel unter 10^{-9} m/s. Aufgrund von hydrogeologischen Modellen, in welchen die beschränkte Verbundenheit der Störungen berücksichtigt wird, ist unterhalb der Dekompaktionszone mit K-Werten $< 10^{-11}$ m/s zu rechnen. Eine Anisotropie der Durchlässigkeit wurde nicht nachgewiesen. Grundwässer aus den Sondierbohrungen und die extrahierten Porenwässer aus Bohrkernen weisen eine hydrochemische Zonierung auf, die mit den hydraulischen Befunden und Modellvorstellungen konsistent ist. Die hydraulischen Unterdrücke, die am Wellenberg unterhalb 500 m unter Terrain gemessen wurden, bilden ebenfalls eine unabhängige Evidenz für die geringe Durchlässigkeit und somit für das Langzeitisolationsvermögen.

Mit dem genannten Wert von 10^{-11} m/s und unter Berücksichtigung möglicher kleinerer spröde reaktiverer Kluft- und Störungzonen fällt die Bewertung für den Indikator 'Hydraulische Durchlässigkeit' *günstig* aus. Auch unter Berücksichtigung der Resultate der Dosisberechnungen zur Barrierenwirkung bleibt die Bewertung *günstig*.

Fazit: Das Kriterium 'Hydraulische Barrierenwirkung' wird für die Mergel-Formationen des Helvetikums im Standortgebiet Wellenberg insgesamt als *günstig* beurteilt.

Geochemische Bedingungen (Kriterium 1.3)

Die geochemischen Bedingungen in den Mergel-Formationen des Helvetikums in geeigneter Tiefenlage werden als sehr stabil beurteilt. Sie sind – wie im Opalinuston – weitgehend durch Gleichgewichtsreaktionen mit den Mineralen (v.a. Tonminerale, Karbonate, Pyrit, organische Stoffe) bestimmt. Der Gehalt an Tonmineralen in der Palfris-Formation beträgt ca. 30 Gew.-%. Das Sorptionsvermögen zeigt eine relativ grosse Variabilität, welche direkt mit der Variabilität des Tonmineralgehalts zusammenhängt (hohes Sorptionsvermögen in Tonmergeln, niedrigeres in Kalkbänken). Fliesspfade, welche ausschliesslich in Kalkbänken verlaufen, werden aber wegen der starken tektonischen Zerschering der Kalkbänke nicht erwartet.

Damit wird der Indikator 'Mineralogie' für die Mergel-Formationen des Helvetikums als *günstig* eingestuft. Die Bewertung gilt unter der Voraussetzung, dass allenfalls vorhandene Fliesspfade in Kalkbänken durch mergelige Partien unterbrochen werden. Der pH-Wert liegt wie beim

⁹³ Die Situation im Standortgebiet Wellenberg ist nicht direkt vergleichbar mit den Standortgebieten in der Nordschweiz; der Indikator 'Mächtigkeit' wird deshalb sinngemäss angewendet.

Opalinuston im neutralen Bereich. Dies führt zur Bewertung *sehr günstig*. Dank des Gehalts an Pyrit und organischen Substanzen ist die Redoxpufferkapazität gross und die Redox-Bedingungen werden als *sehr günstig* eingestuft.

Aufgrund der bisherigen Erfahrungen wird erwartet, dass in den Tiefenbereichen, die für das SMA-Lager geeignet sind, hauptsächlich saline Grundwässer vorhanden sind, mit Salinitäten, die deutlich unterhalb derjenigen von Meerwasser liegen. Dies führt zur Bewertung des Indikators 'Salinität' *günstig*.

Im Vergleich zum Opalinuston stehen in den Mergel-Formationen des Helvetikums Poren bzw. Diskontinuitäten mit tendenziell grösseren Abmessungen als Lebensraum für Mikroorganismen zur Verfügung; damit bieten die Mergel-Formationen des Helvetikums vermutlich tendenziell etwas günstigere Lebensbedingungen für Mikroorganismen, insbesondere in der Auflockerungszone in der Anfangsphase nach Verschluss der Lagerkammern. Der Indikator 'Mikrobielle Prozesse' wird deshalb etwas weniger positiv bewertet als beim Opalinuston, nämlich *günstig*.

Kleinere Störungen und Klüfte (Spröddeformationen), denen mit den Lagerkammern nicht ausgewichen werden kann und die als Fließpfade für Kolloide dienen könnten, sind – im Unterschied zum Opalinuston – in den Mergel-Formationen des Helvetikums nicht auszuschliessen; eine Beeinträchtigung der Kolloidfiltration kann trotz Selbstabdichtung nicht ausgeschlossen werden. Der Indikator 'Kolloide' wird deshalb weniger positiv bewertet als beim Opalinuston, nämlich *bedingt günstig*.

Fazit: Das Kriterium 'Geochemische Bedingungen' wird für die Mergel-Formationen des Helvetikums im Standortgebiet Wellenberg insgesamt als *günstig* beurteilt.

Freisetzungspfade (Kriterium 1.4)

Die Mergel-Formationen des Helvetikums sind als geklüftetes Medium mit sehr geringdurchlässiger Matrix zu betrachten. Wie bei den Effinger Schichten ist mit wenig ausgeprägtem lokalisiertem Wasserfluss und günstigen Bedingungen für Matrixdiffusion zu rechnen. Daher wird der Indikator 'Art der Transportpfade und Ausbildung des Porenraums' mit knapp *günstig* bewertet. Auch unter Berücksichtigung der Resultate der Dosisberechnungen zur Barrierenwirkung bleibt die Bewertung knapp *günstig*.

Die Wasserführung ist praktisch ausschliesslich an Strukturen der spröden Deformation (z.T. spröd überprägte duktile Strukturen) gebunden. Die Transmissivitäten unterhalb der Dekompaktionszone sind in der Regel $< 10^{-9}$ m²/s. Rein duktile Strukturen (z.B. Überschiebungen) zeigen keine bevorzugte Wasserwegsamkeit. Weil die Kalkbänke tektonisch stark zerschert sind, ist die Wasserführung in diesen Freisetzungspfaden nicht signifikant erhöht. Aufgrund dieser Verhältnisse wird der Indikator 'Transmissivität präferenzialer Freisetzungspfade' mit knapp *günstig* bewertet. Auch unter Berücksichtigung der Resultate der Dosisberechnungen zur Barrierenwirkung bleibt die Bewertung knapp *günstig*.

Dank des Tonmineralgehalts besitzen die Mergel-Formationen des Helvetikums im Bereich der Tonmergelabfolgen bei grösserer Überdeckung ein gewisses Selbstabdichtungsvermögen, welches jedoch deutlich weniger ausgeprägt ist als im Opalinuston und auch etwas ungünstiger ist als dasjenige der Kalkmergelabfolgen der Effinger Schichten. Das Selbstabdichtungsvermögen der Kalkbankabfolgen ist gering, was allerdings wegen der begrenzten Kontinuität der Kalkbänke keinen signifikanten Einfluss auf die Wasserführung hat. Insgesamt ergibt dies für den Indikator 'Selbstabdichtungsvermögen' die Bewertung *bedingt günstig*.

Die Formationen im Alpenraum sind in der Regel durch tektonische Vorgänge stark verfaltet und zerschert, diese Verfaltung und Zerschierung ist jedoch durchgehend, sodass makroskopisch (Dekameter- bis Hektometer-Bereich) ein homogener Gesteinsaufbau vorliegt. Architektur-elemente, die mehrere Meter mächtig sind, über hunderte von Metern verbunden sind und gegenüber dem umliegenden Gestein klar reduzierte Barriereneigenschaften aufweisen, werden deshalb eher nicht erwartet. Es ist aber auch die Möglichkeit von Fremdgesteinsschlüssen zu beachten. Insgesamt wird der Indikator 'Homogenität des Gesteinsaufbaus' bei den betrachteten Mergel-Formationen des Helvetikums deshalb als *bedingt günstig* eingestuft.

Im massgebenden Fall für die Einengung ergibt sich die minimale Transportpfadlänge aus der kürzesten Distanz zwischen den Lagerkammern und dem Rand des Wirtgesteinskörpers (Fig. 3.1-5). Falls der Transportpfad vollständig in den Kalkmergeln verläuft, beträgt die barriere-wirksame Transportpfadlänge überall mindestens 100 m (vgl. Referenzwert in Tab. 3.1-6)⁹⁴. Der Indikator 'Länge der massgebenden Freisetzungspfade' wird daher mit *sehr günstig* bewertet. Auch unter Berücksichtigung der Resultate der Dosisberechnungen zur Barrierenwirkung bleibt die Bewertung sehr günstig.

Fazit: Das Kriterium 'Freisetzungspfade' wird für die Mergel-Formationen des Helvetikums im Standortgebiet Wellenberg insgesamt als *günstig* beurteilt.

Gesamtbewertung der Kriteriengruppe 'Eigenschaften des Wirtgesteins' für die Mergel-Formationen des Helvetikums im Standortgebiet Wellenberg: *günstig*.

B) Langzeitstabilität der Mergel-Formationen des Helvetikums

Beständigkeit der Gesteinseigenschaften (Kriterium 2.1)

Von besonderer Bedeutung für die Langzeitstabilität ist die Beständigkeit der Wirtgesteinseigenschaften über lange Zeiträume, insbesondere die Verkarstungsfähigkeit des Wirtgesteins. Aus den Mergel-Formationen des Helvetikums sind keine Hinweise bekannt, dass durch Lösungsvorgänge neue Fließwege entstanden sind, trotz teilweise grosser hydraulischer Gradienten. Dies hängt damit zusammen, dass die Kalkbänke und Kalkbankabfolgen im Allgemeinen so stark tektonisch verfaltet und zerschert sind, dass sich darin kein kontinuierlicher Fließpfad entwickeln kann. Der Indikator 'Potenzial zur Bildung neuer Wasserwegsamkeiten (Verkarstung)' wird daher mit *sehr günstig* bewertet.

Fazit: Das Kriterium 'Beständigkeit der Gesteinseigenschaften' wird für die Mergel-Formationen des Helvetikums im Standortgebiet Wellenberg insgesamt als *sehr günstig* beurteilt.

Lagerbedingte Einflüsse (Kriterium 2.3)

Wie beim Opalinuston kann die Auflockerungszone im Nahbereich der Untertagebauten (bei SMA konkret die Auflockerungszone im Bereich der Versiegelungstrecken) bei Beschränkung der Tiefe der Lagerebenen auch in den Mergel-Formationen des Helvetikums durch geeignete

⁹⁴ Als Alternative wird auch der Fall betrachtet, wo der grösste Teil der Transportpfadlänge in boudinierten Kalkbankabfolgen verläuft (Fall *SMA-WLB-mLE-r-KBA*, vgl. Fig. 3.1-5 und Kap. 4). Dann beträgt die wirksame Transportpfadlänge nur noch 20 m und der Indikator 'Länge der massgebenden Freisetzungspfade' wird auch unter Berücksichtigung der Resultate der Dosisberechnungen nur noch als *bedingt günstig* bewertet (vgl. Kap. 4.4).

technische Massnahmen weitgehend kontrolliert werden. Die gegenüber dem Opalinuston grösseren Festigkeiten des intakten Gesteins lassen bei den Mergel-Formationen des Helvetikums bei sonst gleichen Bedingungen eine kleinere Ausdehnung der Auflockerungszone erwarten, andererseits wird aber im Vergleich zum Opalinuston ein weniger ausgeprägtes Selbstabdichtungsvermögen erwartet. Unter Berücksichtigung des Selbstabdichtungsvermögens fällt die Beurteilung des Indikators 'Auflockerungszone im Nahbereich der Untertagebauten' *günstig* aus.

Die wichtigsten lagerbedingten geochemischen Effekte sind Langzeitauswirkungen von alkalischen Zementporenwässern auf das Umfeld der Lagerkammern und die Oxidation des Wirtgesteins während der Bau- und Betriebsphase. Studien betreffend Langzeitauswirkungen von Zementporenwässern im Rahmen des Projekts Wellenberg zeigen, dass die diesbezüglichen Effekte die Sicherheit nicht signifikant beeinflussen. Auch die Oxidation (v.a. Pyrit) wird keine signifikanten Auswirkungen auf die Barriereigenschaften der Mergel haben. Dank der geringen Transmissivität und der beschränkten Vernetzung der Diskontinuitäten bleibt die Hoch-pH-Fahne auch in den Mergel-Formationen des Helvetikums auf die nähere Umgebung der Lagerkammern beschränkt, auch wenn im Vergleich zum Opalinuston ein deutlich grösserer Teil des Migrationspfads dadurch beeinflusst wird. Der Indikator 'Chemische Wechselwirkungen' wird daher mit *günstig* bewertet.

Wegen der gegenüber dem Opalinuston insgesamt etwas grösseren Heterogenität (inkl. Diskontinuitäten) wird das Gas einfacher durch die Mergel-Formationen des Helvetikums entweichen können als durch den Opalinuston (niedriger Gaseintrittsdruck). Durch Massnahmen (Schaffung von untertägigem Speicherraum, kontrollierte Ableitung des Gases über die Versiegelungsstrecken, Behandlung gewisser radioaktiver Abfälle) kann bei Bedarf für eine weitere Entschärfung der Gasproblematik gesorgt werden. Daher wird der Indikator 'Verhalten des Wirtgesteins bezüglich Gas' mit *günstig* bewertet.

Der Indikator 'Verhalten des Wirtgesteins bezüglich Temperatur' ist für das SMA-Lager nicht relevant und wird deshalb nicht beurteilt.

Fazit: Das Kriterium 'Lagerbedingte Einflüsse' wird für die Mergel-Formationen des Helvetikums im Standortgebiet Wellenberg insgesamt als *günstig* beurteilt.

Nutzungskonflikte (Kriterium 2.4)

Mergel-Formationen des Helvetikums werden lokal zusammen mit angrenzenden Kalk-Formationen als Rohstoff für die Zementherstellung abgebaut. Aus wirtschaftlichen Gründen wird diese Nutzung aber auch in Zukunft auf die Oberfläche beschränkt bleiben. Innerhalb der Mergelvorkommen sind keine weiteren nutzbaren Rohstoffe bekannt. Die Bewertung des Indikators 'Rohstoffvorkommen innerhalb des Wirtgesteins' fällt daher *sehr günstig* aus.

Fazit: Das Kriterium 'Nutzungskonflikte' wird für die Mergel-Formationen des Helvetikums im Standortgebiet Wellenberg insgesamt als *sehr günstig* beurteilt.

Gesamtbewertung der Kriteriengruppe 'Langzeitstabilität' für die Mergel-Formationen des Helvetikums im Standortgebiet Wellenberg: knapp *sehr günstig*.

C) Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen zu den Mergel-Formationen des Helvetikums

Charakterisierbarkeit der Gesteine (Kriterium 3.1)

Die Charakterisierbarkeit der Mergel-Formationen des Helvetikums wird anhand der Indikatoren 'Variabilität der Gesteinseigenschaften im Hinblick auf ihre Charakterisierbarkeit' und 'Erfahrungen' erfasst.

Die Beurteilung des Indikators 'Variabilität der Gesteinseigenschaften im Hinblick auf ihre Charakterisierbarkeit' erfolgt anhand der Merkmale Lagerungsverhältnisse, Homogenität bzw. Heterogenität der Gesteinsbeschaffenheit, Variabilität der Gesteinseigenschaften, Existenz und Art der lithofaziellen Einheiten und tektonische Überprägung. Die Mergel-Formationen des Helvetikums sind wegen ihrer tektonischen Überprägung engräumig zerschert und verfaltet und werden als "homogen in ihrer Heterogenität" betrachtet. Durch die Zerschierung und Verfaltung sind auch die im Mergel vorhandenen Kalkbankabfolgen häufig boudiniert und auseinandergerissen; es bestehen aber auch Hinweise, dass sie stellenweise über grössere Distanzen zusammenhängend sein können (Nagra 2014b, Dossier VIII). Die Kalkbankabfolgen haben ein geringes Selbstabdichtungsvermögen (lithofazielle Einheit der Kategorie 3, Nagra 2014b, Dossier VI). Die Lokalisierung von grösseren kalkigen Fremdgesteinseinschlüssen wird durch den Indikator 'Explorationsverhältnisse im geologischen Untergrund' (siehe Kriterium 3.2) erfasst. Die Charakterisierbarkeit der Mergel-Formationen bezüglich Klüftung und kleinräumiger Strukturen und des damit verbundenen lokalisierten Wasserflusses (Indikator 'Variabilität der Gesteinseigenschaften im Hinblick auf ihre Charakterisierbarkeit') wird wegen ihrer Heterogenität nur als *bedingt günstig* beurteilt.

Tektonische Akkumulationen tonreicher Gesteine wurden international bisher noch nirgends im Hinblick auf ihre Eignung als Wirtgestein für radioaktive Abfälle betrachtet. Die umfassenden Erfahrungen mit flach gelagerten tonreichen Sedimentgesteinen und die Untersuchungsmethoden lassen sich zwar teilweise auch auf die Verhältnisse in den Mergel-Akkumulationen im Helvetikum übertragen, es bestehen jedoch bedeutende Unterschiede in der Hydrogeologie und Felsmechanik, welche sich aus der unterschiedlichen geologischen Geschichte (tektonische Deformation) ergeben. Es existieren aber für die Mergel-Formationen des Helvetikums umfangreiche Erfahrungen aus der Schweiz selbst, namentlich vom Wellenberg/Oberbauenstock und Lötschberg. Der Indikator 'Erfahrungen' wird deshalb knapp *sehr günstig* bewertet, auch wenn die Erfahrungen (unter Berücksichtigung der Erfahrungen im Ausland) im Vergleich zum Opalinuston deutlich weniger umfangreich sind.

Fazit: Das Kriterium 'Charakterisierbarkeit der Gesteine' wird für die Mergel-Formationen des Helvetikums im Standortgebiet Wellenberg insgesamt als *günstig* beurteilt.

Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse (Kriterium 3.2)

Der Indikator 'Explorationsverhältnisse im geologischen Untergrund' wird anhand der Existenz von seismischen Markerhorizonten im oder in der Nähe des Wirtgesteins sowie anhand der Homogenität des Wirtgesteins (inkl. lateraler Korrelationslängen) beurteilt. Praktische Erfahrungen mit reflexionsseismischen Untersuchungen von Mergel-Vorkommen im Gebiet Wellenberg zeigen klar, dass die grundlegenden Randbedingungen für eine erfolgreiche seismische Exploration (schichtförmiger Aufbau mit deutlichen Sprüngen der seismischen Impedanz, kontinuierlicher Verlauf der Schichtgrenzen) nicht erfüllt sind. Weil die Mergel aufgrund ihrer Versenkungsgeschichte stark kompaktiert sind und eine hohe Dichte aufweisen, ist der

seismische Impedanzkontrast zum Nebengestein gering. Zudem verlaufen die Grenzen zwischen Wirt- und Nebengestein oft sehr steil, sind verschuppt und deshalb mit reflexionsseismischen Methoden kaum erfassbar. Erschwerend kommt hinzu, dass das starke topographische Relief und die unregelmässige Lockergesteinsbedeckung zu einem komplexen Verlauf der seismischen Wellen mit Mehrfachreflexionen führen, weshalb auch mit 3D-seismischen Methoden keine belastbaren Ergebnisse erzielbar sind. Dies gilt auch für die anordnungsbestimmenden Störungszonen und grösseren tektonisch eingeschuppten, potenziell durchlässigen Fremdgesteins-einschlüsse.

Die Exploration von tektonischen Mergel-Akkumulationen von der Oberfläche ist somit nur mit Hilfe einer grösseren Anzahl von vertikalen und geneigten Bohrungen möglich bzw. es ist ein Sondierstollen notwendig. Bereiche mit günstigen Aufschlussverhältnissen und 3D-Informationen aufgrund der topographischen Verhältnisse können die Erfassung der Wirtgesteinsgrenzen erleichtern. Kritische Aspekte sind die Erfassung von grösseren tektonisch eingeschuppten, potenziell durchlässigen Fremdgesteinseinschlüssen und von höher durchlässigen anordnungsbestimmenden Störungszonen.

Aus diesen Gründen wird der Indikator 'Explorationsverhältnisse im geologischen Untergrund' bezüglich Exploration von der Oberfläche als *ungünstig* bewertet.

Fazit: Das Kriterium 'Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse' wird für die Mergel-Formationen des Helvetikums im Standortgebiet Wellenberg insgesamt als *ungünstig* beurteilt.

Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen (Kriterium 3.3)

Grundwässer aus den Sondierbohrungen und die extrahierten Porenwässer aus Bohrkernen weisen eine hydrochemische Zonierung auf, die einen klaren Hinweis auf das Langzeitisolationsvermögen der Mergel-Formationen bilden. Die hydraulischen Unterdrücke, die am Wellenberg unterhalb 500 m u.T. gemessen wurden, bilden ebenfalls eine unabhängige Evidenz für die geringe Durchlässigkeit und somit für das Langzeitisolationsvermögen. Auch wenn beim Opalinuston die Bewertung noch etwas positiver ausfällt, wird der Indikator 'Unabhängige Evidenzen der Langzeitisolation' für die Mergel-Formationen des Helvetikums trotzdem als *sehr günstig* eingestuft.

Fazit: Das Kriterium 'Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen' wird für die Mergel-Formationen des Helvetikums im Standortgebiet Wellenberg insgesamt als *sehr günstig* beurteilt.

Gesamtbewertung der Kriteriengruppe 'Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen' für die Mergel-Formationen des Helvetikums im Standortgebiet Wellenberg: knapp *günstig*.

D) Bautechnische Eignung der Mergel-Formationen des Helvetikums

Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen (Kriterium 4.1)

Die bautechnische Machbarkeit für das SMA-Lager in der Palfris-Formation ist im Rahmen des Projekts Wellenberg eingehend untersucht worden. Erfahrungen aus dem Tunnelbau haben ebenfalls gezeigt, dass Strassen- und Eisenbahntunnel in den Mergel-Formationen des Helvetikums mit Überlagerungen von bis zu 800 m und beträchtlichen Ausbruchquerschnitten gebaut werden können (z.B. Seelisbergtunnel).

Die einaxialen Druckfestigkeiten ohne Berücksichtigung der Schichtung liegen je nach lithologischer Ausprägung zwischen 20 und 100 MPa, wobei die grossräumig relevanten Durchschnittswerte 50 bis 70 MPa betragen (vgl. Nagra 2014b, Dossier IV). Insbesondere die Tonmergel zeigen eine vergleichsweise geringe Anisotropie. Bei der Evaluation der gebirgsmechanischen Eigenschaften sind in den Mergel-Formationen des Helvetikums die vorhandenen Diskontinuitäten und Strukturen zu berücksichtigen.

Die deutlich höheren Festigkeiten und Steifigkeiten der Kalkmergel und Tonmergel der Palfris-Formation führen im Vergleich zu Opalinuston je nach Tiefenlage der Lagerkammern zu deutlich geringerem Aufwand für die bautechnische Realisierung. Die bautechnischen Eigenschaften stellen sich insgesamt günstiger dar als für den Opalinuston.

Zonen höherer Störungsdichte werden mit einer angepassten Kombination aus Stützmassnahmen (Spritzbeton, Netze, Anker, Stahlbögen) gesichert, oder ihnen wird durch eine geänderte Anordnung der Lagerbauwerke Rechnung getragen.

Die geotechnischen Verhältnisse sind insgesamt etwa gleich wie in den Effinger Schichten. Der Indikator 'Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften' wird für die Mergel-Formationen des Helvetikums daher mit *sehr günstig* bewertet, falls die Tiefe der Lagerebene nicht allzu gross gewählt wird (vgl. Kap. 4).

Fazit: Das Kriterium 'Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen' wird für die Mergel-Formationen des Helvetikums insgesamt als *sehr günstig* beurteilt.

Gesamtbewertung der Kriteriengruppe 'Bautechnische Eignung' für die Mergel-Formationen des Helvetikums im Standortgebiet Wellenberg: *sehr günstig*.

Prüfung der Sensitivität der Bewertungen für die Mergel-Formationen des Helvetikums

Zur Prüfung der Sensitivität der Bewertungen der oben für den "massgebenden Fall" durchgeführten Bewertungen werden diese mit den Bewertungen für eine alternative Konzeptualisierung des Transportpfads verglichen, wo davon ausgegangen wird, dass in Zusammenhang mit Störungszonen ein erheblicher Teil des Transportpfads in den boudinierten Kalkabfolgen verläuft (Fall *SMA-WLB-mLE-r-KBA*), vgl. dazu die Bewertungen in Anhang C.3.1.2. Dies ergibt für den Indikator 'Länge der massgebenden Freisetzungspfade' wegen der voraussichtlich kleinen Anzahl von betroffenen Lagerkammern noch eine *bedingt günstige* Bewertung.

Die Hinweise aus dem Lötschbergtunnel, dass das Tertiär der Axen-Decke möglicherweise eine weniger gute Barrierenqualität haben könnte als angenommen und nicht als Wirtgestein genutzt werden kann (Fall *SMA-WLB-aLI-r*), ist in Kap. 4 bei der Abgrenzung der Lagerperimeter als alternative Konzeptualisierung zu berücksichtigen.

Fazit: Da im Standortgebiet Wellenberg nur die Mergel-Formationen des Helvetikums als Wirtgestein vorkommen, hat die Bewertung (inkl. Alternativen) keinen Einfluss auf die Festlegung der prioritären Wirtgesteine, sodass die Prüfung der Sensitivität in Kap. 3 nicht weiter zu berücksichtigen ist. Die oben erwähnten alternativen Konzeptualisierungen werden in Kap. 4 bei der Abgrenzung der Lagerperimeter bzw. bei der Bewertung des Standortgebiets berücksichtigt.

3.3.5 Zusammenfassung der qualitativen Bewertung der Wirtgesteine für das SMA-Lager

Bewertung des 'massgebenden Falls für die Einengung'

Die Wirtgesteine in den geologischen Standortgebieten für das SMA-Lager wurden in den vorhergehenden Kapiteln auf der Hierarchiestufe der Indikatoren, Kriterien und Kriteriengruppen qualitativ bewertet. Eine Zusammenfassung der Bewertungsergebnisse für den "massgebenden Fall für die Einengung" findet sich in Tab. 3.3-1 und in Fig. 3.3-1.

Die **Gesamtbewertung** für den Opalinuston ergibt in allen Standortgebieten (Südranden, Zürich Nordost, Nördlich Lägern, Jura Ost, Jura-Südfuss) die Bewertung *sehr geeignet*, die Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger' wird in allen Standortgebieten (Nördlich Lägern, Zürich Nordost) als *geeignet* bewertet. Auch die Effinger Schichten (Jura-Südfuss) und die Mergel-Formationen des Helvetikums (Wellenberg) erhalten die Bewertung *geeignet*. Diese Gesamtbewertung ergibt sich aus den Bewertungen auf den Hierarchiestufen der Kriteriengruppen bzw. Kriterien und den detaillierten Bewertungen der zugehörigen Indikatoren.

Für die **Kriteriengruppe 'Eigenschaften des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs'** wird der Opalinuston mit seinen Rahmengesteinen in fast allen Standortgebieten insgesamt mit *sehr günstig* bewertet (eine Ausnahme bildet das Standortgebiet Jura-Südfuss: *günstig*), ebenso wie die Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger' mit ihren Rahmengesteinen in den Standortgebieten Zürich Nordost und Nördlich Lägern. Für die Effinger Schichten und die Mergel-Formationen des Helvetikums in ihren jeweiligen Standortgebieten fällt die Bewertung *günstig* aus. Diese Bewertung resultiert aus der nachfolgend kurz diskutierten Bewertung der zu dieser Kriteriengruppe gehörenden Kriterien. Die Bewertung des Kriteriums 'Räumliche Ausdehnung', welches durch den Indikator 'Mächtigkeit' des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs bestimmt wird, fällt für den Opalinuston in den Standortgebieten Zürich Nordost und Nördlich Lägern *sehr günstig* aus und in den anderen Standortgebieten vor allem wegen der etwas ungünstigeren Bedingungen bei den Rahmengesteinen *günstig* (Südranden und Jura Ost) bzw. *bedingt günstig* (Jura-Südfuss). Die Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger' wird in den Standortgebieten Zürich Nordost und Nördlich Lägern aufgrund der grossen nutzbaren Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs mit *sehr günstig* bewertet. Für die Effinger Schichten im Standortgebiet Jura-Südfuss fällt die Bewertung unter Berücksichtigung der Wirkung der "harten Bänke" nur als *bedingt günstig* aus, für die Mergel-Formationen des Helvetikums im Standortgebiet Wellenberg hingegen *sehr günstig*. Die Wirtgesteine werden wegen ihrer kleinen hydraulischen Durchlässigkeiten bezüglich des Kriteriums 'Hydraulische Barrierenwirkung' teils als *sehr günstig* (Opalinuston und Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger' in allen Standortgebieten) und teils als *günstig* (Effinger Schichten im Standortgebiet Jura-Südfuss und Mergel-Formationen im Standortgebiet Wellenberg) bewertet. Die Bewertung des Kriteriums 'Geochemische Bedingungen' fällt für den Opalinuston und den 'Braunen Dogger' in allen Standortgebieten *sehr günstig* aus, für die Effinger Schichten im Standortgebiet Jura-Südfuss und die Mergel-Formationen im Standortgebiet Wellenberg *günstig*. Das Kriterium 'Freisetzungspfade' wird im Falle des Opalinustons in allen Standort-

gebieten als *sehr günstig* bewertet, im Falle des 'Braunen Doggers' wegen der Existenz dünner Sandkalkeinschaltungen in beiden Standortgebieten als *günstig*, im Falle der Effinger Schichten im Standortgebiet Jura-Südfuss wegen der Existenz von Kalkbankabfolgen als *bedingt günstig* und im Falle der Mergel-Formationen im Standortgebiet Wellenberg wegen der Klüftung des Wirtgesteins als *günstig*, je nach Möglichkeit des Bestehens von höher durchlässigen Diskontinuitäten sowie in Abhängigkeit der Ausbildung des Porenraums (insbesondere bezüglich Klüftung und lokalisiertem Wasserfluss) und der Länge der massgebenden Freisetzungspfade in den tonreichsten Abfolgen der jeweiligen Wirtgesteine.

Die Kriteriengruppe 'Langzeitstabilität' wird für alle Wirtgesteine in allen Standortgebieten insgesamt als *sehr günstig* bewertet, mit Ausnahme der Effinger Schichten im Standortgebiet Jura-Südfuss, für welche sich insgesamt die Bewertung *günstig* ergibt. Diese Bewertung resultiert aus der nachfolgend kurz diskutierten Bewertung der zu dieser Kriteriengruppe gehörenden Kriterien. Das Kriterium 'Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften' (vorne abgekürzt mit 'Beständigkeit der Gesteinseigenschaften') wird für den Opalinuston, die Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger' und die Mergel-Formationen des Helvetikums in allen Standortgebieten als *sehr günstig* bewertet. Bei den Effinger Schichten kann eine Verkarstung der Kalkbankabfolgen (insbesondere hypogene Verkarstung) nicht ausgeschlossen werden, ist aber unter Berücksichtigung der geologischen Situation im vorgeschlagenen Standortgebiet Jura-Südfuss eher unwahrscheinlich (Bewertung *bedingt günstig*). Bei entsprechenden technischen Massnahmen (insbesondere bezüglich der Freisetzung von im Lager gebildetem Gas⁹⁵ und unter Berücksichtigung der Möglichkeiten zur Reduktion der Gasbildung bzw. Gasbildungsraten) wird das Kriterium 'Lagerbedingte Einflüsse' für die verschiedenen Wirtgesteine in allen Standortgebieten insgesamt als *günstig* beurteilt. Bezüglich des Kriteriums 'Nutzungskonflikte' (Nutzung des Wirtgesteins als Rohstoff) sind alle Wirtgesteine in allen Standortgebieten *sehr günstig*; die gebietsspezifischen Aspekte (z.B. Rohstoffvorkommen unterhalb des Wirtgesteins) werden in Kap. 4.4 bewertet.

Für die **Kriteriengruppe 'Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen'** ergibt sich für den Opalinuston in allen Standortgebieten die Bewertung *sehr günstig*, für die Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger', die Effinger Schichten und die Mergel-Formationen des Helvetikums in den betreffenden Standortgebieten die Bewertung *günstig*. Diese Bewertung ergibt sich aus folgenden Bewertungen auf Stufe der Kriterien: Das Kriterium 'Charakterisierbarkeit der Gesteine' wird im Falle des Opalinustons in allen Standortgebieten als *sehr günstig* beurteilt, im Falle des 'Braunen Doggers' in den Standortgebieten Zürich Nordost und Nördlich Lägern sowie der Mergel-Formationen im Standortgebiet Wellenberg als *günstig* und im Falle der Effinger Schichten im Standortgebiet Jura-Südfuss als *bedingt günstig*, was im letzten Fall insbesondere auf die Variabilität der Gesteinseigenschaften im Wirtgestein *sensu stricto* zurückzuführen ist. Beim Kriterium 'Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse' gibt es erhebliche Unterschiede zwischen den Wirtgesteinen: Die Bewertung fällt für den Opalinuston in allen Standortgebieten *sehr günstig* aus, für den 'Braunen Dogger' und die Effinger Schichten in den betreffenden Standortgebieten *bedingt günstig* und für die Mergel-Formationen im Standortgebiet Wellenberg *ungünstig*. Letztere Bewertung ist insbesondere auf die problematische Erkundung der Wirtgesteinsgeometrie und Lokalisierung von möglichen Fremdgesteinseinschlüssen und anordnungsbestimmenden Störungszonen von der Oberfläche aus zurückzuführen. Das Kriterium 'Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen' wird für alle Wirtgesteine in allen Standortgebieten mit *sehr günstig* bewertet; für den 'Braunen Dogger' und die Effinger Schichten gibt es Evidenzen bezüglich ihrer Fähigkeit zur Langzeitisolation – allerdings in etwas geringerem Umfang als beim Opalinuston – weswegen die Bewertung etwas tiefer ausfällt.

⁹⁵ Vergleiche dazu die Evaluation der Gasfreisetzung für das SMA-Lager (Nagra 2014a und dort zitierte Referenzberichte).

Für die **Kriteriengruppe 'Bautechnische Eignung'** ergeben sich für den Opalinuston und die Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger' in allen Standortgebieten die Bewertung *günstig*, für die Effinger Schichten und die Mergel-Formationen des Helvetikums die Bewertung *sehr günstig*; diese sind jedoch nur beschränkt aussagekräftig, da die Tiefenlage der Lagerebene in diese Bewertung noch nicht einbezogen ist (vgl. dazu Kap. 4.4). Diese Bewertung ergibt sich aus folgenden Überlegungen: Die felsmechanischen Eigenschaften erlauben bei Beschränkung der Tiefe der Lagerebene und unter Berücksichtigung der verschiedenen technischen Möglichkeiten für den Ausbruch und die Sicherung der Untertagebauten – teilweise unter Inkaufnahme eines erhöhten technischen Aufwands (Kosten, Zeitbedarf) – die zuverlässige Erstellung der untertägigen Bauten, ohne dass die Barriereigenschaften der Wirtgesteine grösserräumig beeinträchtigt würden; deshalb werden der Opalinuston und der 'Braune Dogger' in allen Standortgebieten bei Beschränkung der maximalen Tiefenlage bezüglich des Kriteriums 'Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen' als *günstig* beurteilt. Die Effinger Schichten im Standortgebiet Jura-Südfuss und die Mergel-Formationen im Standortgebiet Wellenberg werden wegen der im Vergleich zum Opalinuston deutlich höheren Festigkeiten als *sehr günstig* bewertet.

Fazit: Obschon die Gesamtbewertung mit *sehr geeignet* (Opalinuston) und *geeignet* (Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger', Effinger Schichten, Mergel-Formationen des Helvetikums) vorteilhaft ausfallen, zeigt die detaillierte Bewertung auf Stufe Indikatoren ein deutlich differenziertes Bild, vergleiche dazu Tab. 3.3-1 und die Histogramme in Fig. 3.3-1. Dort zeigt sich, dass es auf Stufe Kriteriengruppen, Kriterien und Indikatoren bei den Bewertungen erhebliche Unterschiede gibt.

Tab. 3.3-1: (Fortsetzung)

Nr.	Kriteriengruppe / Kriterium / Indikator	Bewertungsobjekt	SMA-SR-OPA	SMA-ZNO-OPA	SMA-NL-OPA	SMA-JO-OPA	SMA-JS-OPA	SMA-ZNO-BD	SMA-NL-BD	SMA-JS-EFF	SMA-WLB-MG
KG3	Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen		4.4	4.4	4.4	4.4	4.4	3.4	3.4	3.1	3.0
3.1	Charakterisierbarkeit der Gesteine		4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	3.6	3.6	2.8	3.3
39	Variabilität der Gesteinseigenschaften im Hinblick auf ihre Charakterisierbarkeit	WG-ss	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.1	4.1	2.5	2.5
40	Erfahrungen	WG	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	3.1	3.1	3.1	4.1
3.2	Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse		4.1	4.3	4.3	4.3	4.1	2.5	2.5	2.5	1.5
43	Explorationsverhältnisse im geologischen Untergrund	WG	4.1	4.3	4.3	4.3	4.1	2.5	2.5	2.5	1.5
3.3	Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen		4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.1	4.1	4.1	4.3
46	Unabhängige Evidenzen der Langzeitisolation	WG	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.1	4.1	4.1	4.3
KG4	Bautechnische Eignung		3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	4.3	4.3
4.1	Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen		3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	4.3	4.3
47	Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften	WG-ss	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	4.3	4.3
KG1-4	Gesamtbewertung		4.0	4.1	4.1	4.1	4.0	3.8	3.8	3.5	3.8

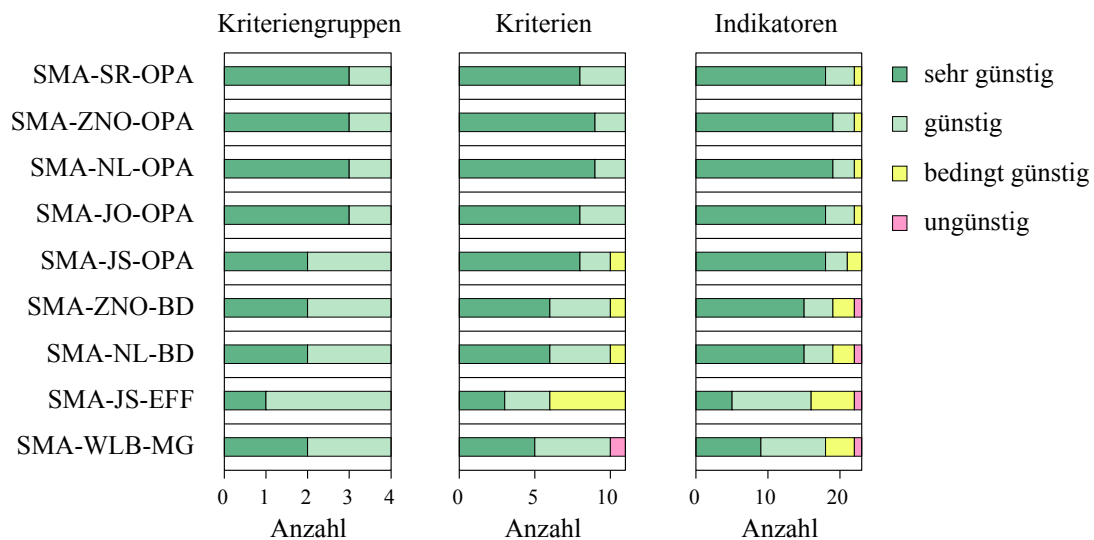


Fig. 3.3-1: Zusammenfassende Darstellung der Bewertungsergebnisse für die Wirtgesteine in den geologischen Standortgebieten für das SMA-Lager (massgebender Fall für die Einengung).

Die Histogramme zeigen die Anzahl Bewertungen für die verschiedenen Bewertungsstufen.

Sensitivität der Gesamtbewertung des 'massgebenden Falls für die Einengung' bezüglich alternativer konzeptueller Annahmen

Die Ergebnisse der Prüfung der Sensitivität bezüglich alternativer konzeptueller Annahmen zur Wasserführung in "harten Bänken" innerhalb der Wirtgesteine sowie zur Barrierenwirkung der Rahmengesteine sind in Anhang C (Tab. C.2-2) aufgeführt.

Die alternativen konzeptuellen Annahmen zur Wasserführung in "harten Bänken" innerhalb der Wirtgesteine betreffen nur die Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger' in den Standortgebieten Zürich Nordost und Nördlich Lägern; für den Opalinuston, die Effinger Schichten (insbesondere bezüglich der "harten Bänke", welche die Kalkmergelabfolge KMA-5 begrenzen, in der die Lagerkammern angeordnet würden) und die Mergel-Formationen des Helvetikums gibt es bezüglich Wasserfluss in "harten Bänken" in den betreffenden Standortgebieten keine wesentlichen Ungewissheiten. Für die Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger' führen die alternativen konzeptuellen Annahmen zur Wasserführung in "harten Bänken" nicht zu einer signifikant anderen Gesamtbewertung.

Die alternativen konzeptuellen Annahmen zur Barrierenwirkung der Rahmengesteine betreffen nur den Opalinuston in den Standortgebieten Nördlich Lägern, Jura Ost und Jura-Südfuss sowie den unteren Teil der Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger' im Standortgebiet Nördlich Lägern. In den Standortgebieten Zürich Nordost und Südranden gibt es bezüglich der Barrierenwirkung der Rahmengesteine keine wesentlichen Ungewissheiten, während die Effinger Schichten im Standortgebiet Jura-Südfuss und die Mergel-Formationen im Standortgebiet Wellenberg gar keine Rahmengesteine mit nennenswerten Beiträgen zur Barrierenwirkung aufweisen. Die alternativen konzeptuellen Annahmen führen in den oben genannten Standortgebieten zu einer etwas niedrigeren Bewertung (Nördlich Lägern) bzw. zu einer etwas höheren Bewertung (Jura Ost und Jura-Südfuss) für den Indikator 'Mächtigkeit', aber nicht zu einer signifikanten Änderung der Gesamtbewertung.

Fazit

Auch unter Berücksichtigung der alternativen Konzeptualisierungen zur Berücksichtigung der vorhandenen Ungewissheiten erreichen alle Wirtgesteine bei der qualitativen Gesamtbewertung mindestens die Bewertung *geeignet*. Damit qualifizieren sich alle Wirtgesteine in den SMA-Standortgebieten mit mehr als einem Wirtgestein (Opalinuston, Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger', Effinger Schichten) für den weiteren Bewertungsschritt (Bewertung anhand der entscheidungsrelevanten Merkmale und Identifikation von eindeutigen Nachteilen) im Hinblick auf die Festlegung der prioritären Wirtgesteine in Kap. 3.4.

3.3.6 Charakterisierung und qualitative Bewertung des Opalinustons für das HAA-Lager

Die Hauptmerkmale des Opalinustons sowie zahlreiche Argumente und Aussagen zur wirtgesteinsspezifischen Bewertung wurden bereits in Kap. 3.3.1 im Rahmen der Bewertung des Opalinustons für das SMA-Lager diskutiert. Im Folgenden werden nur abweichende Argumente und Aussagen aufgeführt, insbesondere:

- wenn sich die Randbedingungen bezüglich lagerbedingter Einflüsse für das SMA- und HAA-Lager unterscheiden (so bei den Indikatoren 'Auflockerungszone im Nahbereich der Untertagebauten', 'Chemische Wechselwirkungen', 'Verhalten des Wirtgesteins bezüglich Gas', 'Verhalten des Wirtgesteins bezüglich Temperatur' und 'Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften'), und

- wenn sich die Parameterwerte in den Standortgebieten bzw. zugehörigen Lagerperimetern für das SMA- und HAA-Lager unterscheiden (so bei den Indikatoren 'Mächtigkeit' und 'Länge der massgebenden Freisetzungspfade').

In den nachfolgenden Abschnitten werden vor allem die BE/HAA-Lagerstollen bewertet, nicht jedoch die wenigen LMA-Lagerkammern. Letztere sind vergleichbar mit den Lagerkammern des SMA-Lagers, und die entsprechende Bewertung ist in Kap. 3.3.1 dokumentiert.

Bei der Charakterisierung und Bewertung liegt der Schwerpunkt auf dem "massgebenden Fall für die Einengung". Die Sensitivität der Einengungsentscheide bezüglich alternativer konzeptueller Annahmen zu den "harten Bänken" wird zwar geprüft; es zeigt sich aber, dass die "harten Bänke" in den Rahmengesteinen des Opalinustons die Gesamtbewertungen des Opalinustons nicht signifikant beeinflussen.

A) Eigenschaften des Opalinustons

Räumliche Ausdehnung (Kriterium 1.1)

Für die räumliche Ausdehnung (Mächtigkeit) des Opalinustons gibt es für das HAA-Lager keine strengeren Anforderungen. Die Bewertung des Indikators 'Mächtigkeit' für die Standortgebiete Zürich Nordost, Nördlich Lägern und Jura Ost ist deshalb gleich wie für die entsprechenden Standortgebiete des SMA-Lagers, obschon die Lagerperimeter für das SMA- und HAA-Lager nicht deckungsgleich sind. Daher fällt die Bewertung des Indikators 'Mächtigkeit' in den Standortgebieten Zürich Nordost und Nördlich Lägern *sehr günstig* und im Standortgebiet Jura Ost *günstig* aus.

Wie beim SMA-Lager gibt es jedoch für die Standortgebiete Nördlich Lägern und Jura Ost Ungewissheiten bezüglich der Qualität der oberen Rahmengesteine. Diese Ungewissheiten werden durch alternative Konzeptualisierungen erfasst⁹⁶.

Fazit: Die Bewertung des Kriteriums 'Räumliche Ausdehnung' für den Opalinuston wird durch die Bewertung des Indikators 'Mächtigkeit' bestimmt und fällt in den Standortgebieten Zürich Nordost und Nördlich Lägern *sehr günstig* und im Standortgebiet Jura Ost *günstig* aus.

Hydraulische Barrierenwirkung (Kriterium 1.2)

Aufgrund der sehr guten hydraulischen Barrierenwirkung des Opalinustons kann der Indikator 'Hydraulische Durchlässigkeit' auch für das HAA-Lager mit *sehr günstig* bewertet werden. Auch unter Berücksichtigung der Resultate der Dosisberechnungen zur Barrierenwirksamkeit bleibt die Bewertung sehr günstig.

Fazit: Das Kriterium 'Hydraulische Barrierenwirkung' wird für den Opalinuston insgesamt als *sehr günstig* beurteilt.

⁹⁶ Für die alternative ungünstigere Konzeptualisierung der oberen Rahmengesteine ergibt sich für das Standortgebiet Nördlich Lägern (Fall *HAA-NL-mLE-r-oRG*) eine *günstige* Bewertung und für die alternative günstigere Konzeptualisierung der oberen Rahmengesteine für das Standortgebiet Jura Ost (Fall *HAA-JO-mLE-r-oRG*) eine *sehr günstige* Bewertung (vgl. auch Kap. 4.4).

Geochemische Bedingungen (Kriterium 1.3)

Bei den geochemischen Bedingungen gibt es für das HAA-Lager keine strengeren Anforderungen. Die Bewertung der einzelnen Indikatoren ist deshalb gleich wie für das SMA-Lager (alle *sehr günstig*, mit Ausnahme der Salinität, welche als *günstig* bewertet wird).

Fazit: Das Kriterium 'Geochemische Bedingungen' wird für den Opalinuston insgesamt als *sehr günstig* beurteilt.

Freisetzungspfade (Kriterium 1.4)

Aufgrund der Eigenschaften der Freisetzungspfade im Opalinuston (das Wirtgestein kann als poröses Medium behandelt werden) kann der Indikator 'Art der Transportpfade und Ausbildung des Porenraums' auch für das HAA-Lager mit *sehr günstig* bewertet werden. Auch unter Berücksichtigung der Resultate der Dosisberechnungen zur Barrierenwirksamkeit bleibt die Bewertung sehr günstig.

Ebenso wird der Indikator 'Transmissivität präferenzierter Freisetzungspfade' mit *sehr günstig* bewertet. Auch unter Berücksichtigung der Resultate der Dosisberechnungen zur Barrierenwirksamkeit bleibt die Bewertung sehr günstig.

Ferner werden auch die Indikatoren 'Selbstabdichtungsvermögen' und 'Homogenität des Gesteinsaufbaus' in Übereinstimmung mit dem SMA-Lager als *sehr günstig* bewertet.

Für die Länge des Freisetzungspfads innerhalb des Opalinustons gibt es für das HAA-Lager keine strengeren Anforderungen. Die Bewertung des Indikators 'Länge der massgebenden Freisetzungspfade' für die Standortgebiete Zürich Nordost, Nördlich Lägern und Jura Ost ist deshalb gleich wie für die entsprechenden Standortgebiete des SMA-Lagers, obschon die vertikale Ausdehnung der HAA-Lagerstollen (ca. 5 m, inkl. Auflockerungszone) kleiner ist als diejenige der SMA-Lagerkammern (ca. 20 m, inkl. Auflockerungszone) und die Lagerperimeter für das SMA- und HAA-Lager nicht deckungsgleich sind (alle *sehr günstig*). Auch unter Berücksichtigung der Resultate der Dosisberechnungen zur Barrierenwirksamkeit bleibt die Bewertung sehr günstig.

Fazit: Das Kriterium 'Freisetzungspfade' wird für den Opalinuston insgesamt als *sehr günstig* beurteilt.

Gesamtbewertung der Kriteriengruppe 'Eigenschaften des Wirtgesteins' für den Opalinuston in allen Standortgebieten: *sehr günstig*.

B) Langzeitstabilität des Opalinustons

Beständigkeit der Gesteinseigenschaften (Kriterium 2.1)

Die Beständigkeit der Wirtgesteinseigenschaften über lange Zeiträume, insbesondere die Verkarstungsfähigkeit des Wirtgesteins, wird auch für das HAA-Lager als sehr günstig beurteilt, da der Opalinuston keine nennenswerten Kalkeinschlüsse aufweist. Der Indikator 'Potenzial zur Bildung neuer Wasserwegsamkeiten (Verkarstung)' wird deshalb wie beim SMA-Lager mit *sehr günstig* bewertet.

Fazit: Das Kriterium 'Beständigkeit der Gesteinseigenschaften' wird für den Opalinuston insgesamt als *sehr günstig* beurteilt.

Lagerbedingte Einflüsse (Kriterium 2.3)

Während beim SMA-Lager ausschliesslich die Auflockerungszone im Nahbereich der Versiegelungszone relevant ist, wird beim HAA-Lager die Auflockerungszone im Nahbereich der BE/HAA-Lagerstollen betrachtet. Auch bei Verwendung von Spritzbeton für die Lagerstollen wirkt sich der Quelldruck der Bentonitverfüllung insgesamt positiv auf die Selbstabdichtung der Auflockerungszone aus. Durch die Platzierung von Zwischensiegeln (bei Bedarf in Bereichen ohne Spritzbeton) innerhalb der BE/HAA-Lagerstollen wird die Wasserführung in der Auflockerungszone entlang der Achse der Lagerstollen stark reduziert. Abgestimmt auf die Lagertiefe kann zudem die Auflockerungszone mit zahlreichen baulichen Massnahmen kontrolliert werden. Unter Berücksichtigung des ausgeprägten Selbstabdichtungsvermögens des Opalinustons fällt die Beurteilung des Indikators 'Auflockerungszone im Nahbereich der Untertagebauten' für die BE/HAA-Lagerstollen bei Beschränkung der Tiefenlage in allen Standortgebieten *sehr günstig* aus.

Aufgrund der Verwendung von Spritzbeton für die BE/HAA-Lagerstollen und die LMA-Lagerkammern sind die wichtigsten geochemischen Effekte – analog zu den SMA-Lagerkammern – Langzeitauswirkungen von alkalischen Zementporenwässern auf das Umfeld und die Oxidation des Wirtgesteins während der Bau- und Betriebsphase (vgl. Kap. 3.3.1); die Effekte werden als unproblematisch beurteilt. Der Indikator 'Chemische Wechselwirkungen' darf deshalb in allen Standortgebieten mit *sehr günstig* bewertet werden.

Die Gasproduktionsrate (infolge Korrosion der Stahl-Endlagerbehälter) ist bei den HAA deutlich geringer als bei den SMA. Die Gasfreisetzung wurde in Untertage- und Laborexperimenten untersucht. Die bisherigen Ergebnisse zeigen, dass die Gasfreisetzung bei geeigneter Auslegung des Lagers keine kritische Beeinträchtigung der Barriereigenschaften des Opalinustons bewirkt (vgl. auch Nagra 2014a und Berichterstattung zum Entsorgungsnachweis in Nagra 2002a und b sowie Nagra 2004). Vorsichtshalber wird für den Indikator 'Verhalten des Wirtgesteins bezüglich Gas' in allen Standortgebieten die gleiche Bewertung verwendet wie bei SMA, nämlich *bedingt günstig*. Die Wahl eines anderen Behältermaterials (z.B. Endlagerbehälter mit Kupfermantel) würde für sehr lange Zeiten zu deutlich geringeren Gasproduktionsraten führen. Für LMA ist die Situation vergleichbar mit SMA.

Da die BE und HAA über längere Zeit Wärme erzeugen, wurde die Auswirkung des Wärmeeintrags auf den Opalinuston untersucht. Die maximale Temperatur an der Stollenwand ist nach einigen hundert Jahren erreicht und beträgt für die BE-Lagerstollen ca. 85°C bis 95°C, abhängig von der In situ-Temperatur, Wärmeleistung der Endlagerbehälter, den thermischen Eigenschaften der technischen Barrieren und der effektiven Wärmeleitfähigkeit des Wirtgesteins (Nagra 2014a). Auswirkungen auf die Mineralogie sind bei einer solchen Temperaturerhöhung vernachlässigbar, da der Opalinuston während seiner Versenkungsgeschichte schon ähnlich hohe Temperaturen über sehr viel längere Zeiträume erfahren hat. Hingegen kann der Temperaturanstieg zu einer signifikanten Erhöhung des Porenwasserdrucks führen. Die Einlagerungsdichten bzw. die Wärmeleistungen der Endlagerbehälter werden so gewählt, dass es nicht zu einer inakzeptablen Entwicklung kommt. Der Indikator 'Verhalten des Wirtgesteins bezüglich Temperatur' wird wegen des möglichen signifikanten Einflusses der Temperaturerhöhung auf die Porenwasserdrucke in allen Standortgebieten mit *bedingt günstig* bewertet.

Die Aussagen in Bezug auf die Auswirkung der thermischen Belastung auf das mechanische Verhalten des Opalinustons sind heute noch mit grösseren Ungewissheiten behaftet; die Beschreibung der komplexen Vorgänge aufgrund der thermisch-hydraulisch-mechanischen (THM) Kopplung der Prozesse mit Experimenten und numerischen Modellen ist sehr anspruchsvoll. Sollten neuere Erkenntnisse aus Langzeitexperimenten (THM In situ- oder Laborexperimente) zeigen, dass – entgegen den heutigen Erfahrungen – die Auflockerungszone und damit Bereiche mit erhöhter Durchlässigkeit im Stollennahfeld durch die relativ kurzzeitige thermische Belastung unverhältnismässig vergrössert oder im Fernfeld zu hohe Porendrucke entstehen würden, so könnte der Wärmeeintrag durch technische Massnahmen (z.B. Verringerung der Wärmeleistung durch andere Beladung der Endlagerbehälter) reduziert werden.

Fazit: Das Kriterium 'Lagerbedingte Einflüsse' wird für den Opalinuston in allen Standortgebieten insgesamt als *günstig* beurteilt.

Nutzungskonflikte (Kriterium 2.4)

Wie für das SMA-Lager wird der Indikator 'Rohstoffvorkommen innerhalb des Wirtgesteins' auch für das HAA-Lager in allen Standortgebieten mit *sehr günstig* bewertet.

Fazit: Das Kriterium 'Nutzungskonflikte' wird für den Opalinuston in allen Standortgebieten insgesamt als *sehr günstig* beurteilt.

Gesamtbewertung der Kriteriengruppe 'Langzeitstabilität' für den Opalinuston in allen Standortgebieten: *sehr günstig*.

C) Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen zum Opalinuston

Sämtliche Kriterien und zugehörigen Indikatoren der Kriteriengruppe 'Zuverlässigkeit der Aussagen' werden für das HAA-Lager gleich bewertet wie für das SMA-Lager (gleiche Bewertungsskala, gleich geartete Lagerperimeter): Die Indikatoren zu den Kriterien 'Charakterisierbarkeit der Gesteine', 'Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse' und 'Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen' werden alle mit *sehr günstig* bewertet.

Gesamtbewertung der Kriteriengruppe 'Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen' für den Opalinuston in allen Standortgebieten: *sehr günstig*.

D) Bautechnische Eignung des Opalinustons

Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen (Kriterium 4.1)

Erfahrungen über mehr als hundert Jahre mit Untertagebauten zeigen, dass die Eisenbahn- und Strassentunnel im Opalinuston (vor allem im Faltenjura) meist ohne grössere Schwierigkeiten bei Überlagerungen von bis zu 800 m realisiert werden konnten. Dies gilt auch bei vergleichsweise starker tektonischer Überprägung mit zahlreichen Störungen, wie dies im Faltenjura der Fall ist. In Tunnelabschnitten mit erhöhter Frequenz von Scherzonen erfolgten aber zum Teil grössere Ausbrüche.

Die einaxialen Druckfestigkeiten parallel und senkrecht zur Schichtung liegen je nach lithologischer Ausprägung, Konsolidierung und Wassergehalt zwischen 10 und 45 MPa (vgl. Nagra 2014b, Dossier IV), wobei die sandige Fazies eher im oberen und die tonige Fazies im unteren

Festigkeitsbereich liegt. Der Opalinuston hat aufgrund seiner Ablagerungs- und Kompaktionsgeschichte anisotrope (transversal isotrope) Eigenschaften, die zu deutlich reduzierten Festigkeiten in der Schichtung führen.

Die HAA-Lagerstollen werden voraussichtlich in allen Standortgebieten mit einem vollflächigen Ausbau gesichert, allerdings ist es – anders als im Falle der SMA-Lagerkammern – aus sicherheitstechnischen Gründen vorteilhaft, den Einbau von zementhaltigen Materialien (speziell Portlandzement) auf das notwendige Mass zu beschränken. Die bautechnische Machbarkeit des HAA-Lagers ist generell gewährleistet; beim Bau der Lagerkammern sind allerdings in grösseren Tiefen und in Gebieten mit erheblicher tektonischer Überprägung signifikante Erschwernisse, welche anspruchsvolle Bauverfahren mit entsprechendem Zeitaufwand und Kosten erforderlich machen, nicht auszuschliessen.

Der Indikator 'Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften' wird daher in allen Standortgebieten insgesamt als *günstig* eingestuft. Diese Einstufung berücksichtigt den Grundsatz, dass bei der Bewertung ausschliesslich die Sicherheit und Machbarkeit eine Rolle spielen sollen, nicht aber der Aufwand. Um die geotechnischen Bedingungen zu verbessern, wird je nach tektonischer Überprägung bzw. erwartetem Trennflächengefüge eine Reduktion der maximalen Tiefenlage der Lagerkammern von 900 m u.T. (verschärfte Anforderung aus Etappe 1) auf ≤ 700 m u.T. angestrebt (vgl. Kap. 4.2). Die Beurteilung der maximalen Tiefenlage der Lagerkammern erfolgt in Kap. 4.4.

Fazit: Das Kriterium 'Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen' wird für den Opalinuston in allen Standortgebieten insgesamt als *günstig* beurteilt.

Gesamtbewertung der Kriteriengruppe 'Bautechnische Eignung' für den Opalinuston in allen Standortgebieten: *günstig*.

Prüfung der Sensitivität der Bewertungen für den Opalinuston

Zur Prüfung der Sensitivität der oben für den "massgebenden Fall" durchgeführten Bewertungen werden diese mit den Bewertungen für alternative konzeptuelle Annahmen zur Barrierenwirkung der oberen Rahmengesteine verglichen, vgl. dazu die Bewertungen in Anhang C.3.1.2. Die alternativen Bewertungen ergeben für den Indikator 'Mächtigkeit' für das Standortgebiet Nördlich Lägern anstelle einer sehr günstigen Bewertung eine *günstige* Bewertung und für das Standortgebiet Jura Ost anstelle einer günstigen Bewertung eine *sehr günstige* Bewertung, vgl. dazu auch Kap. 4.4. Die Veränderung der Bewertung in den Standortgebieten Nördlich Lägern und Jura Ost ist für die Gesamtbewertung des Wirtgesteins Opalinuston wenig bedeutend.

Fazit: Die alternative Bewertung des Indikators 'Mächtigkeit' führen nicht zu einer signifikant anderen Gesamtbewertung.

3.3.7 Zusammenfassung der qualitativen Bewertung des Opalinustons für das HAA-Lager

Bewertung des 'massgebenden Falls für die Einengung'

Der Opalinuston wurde für das HAA-Lager in den geologischen Standortgebieten Zürich Nordost, Nördlich Lägern und Jura Ost in den vorhergehenden Kapiteln auf der Hierarchiestufe der Indikatoren, Kriterien und Kriteriengruppen qualitativ bewertet. Eine Zusammenfassung der Bewertungsergebnisse für den "massgebenden Fall für die Einengung" findet sich in Tab. 3.3-2 und in Fig. 3.3-2.

Tab. 3.3-2: Zusammenfassende Darstellung der Bewertungsergebnisse für den Opalinuston in den geologischen Standortgebieten für das HAA-Lager (massgebender Fall für die Einengung).

Legende: Farben (abgestuft) bzw. Zahlen: rosa: ungünstig ($1 \leq x < 2$); gelb: bedingt günstig ($2 \leq x < 3$); hellgrün: günstig ($3 \leq x < 4$); dunkelgrün: sehr günstig ($4 \leq x \leq 5$).

Die Bewertung der Kriterien und Kriteriengruppen erfolgt durch Aggregation der 5-stufigen Bewertung der zugehörigen Indikatoren (für Aggregation, vgl. Erläuterungen in Anhang C.1).

Nr.	Kriteriengruppe / Kriterium / Indikator	Bewertungsobjekt	HAA-ZNO-OPA	HAA-NL-OPA	HAA-JO-OPA
KG1	Eigenschaften des WG/EG		4.4	4.4	4.2
1.1	Räumliche Ausdehnung		4.5	4.5	3.5
5	Mächtigkeit	EG	4.5	4.5	3.5
1.2	Hydraulische Barrierenwirkung		4.5	4.5	4.5
9	Hydraulische Durchlässigkeit	WG-ss	4.5	4.5	4.5
1.3	Geochemische Bedingungen		4.3	4.3	4.3
11	Mineralogie	WG-ss	4.5	4.5	4.5
12	pH	WG-ss	4.5	4.5	4.5
13	Redox-Bedingungen	WG-ss	4.5	4.5	4.5
14	Salinität	WG-ss	3.5	3.5	3.5
15	Mikrobielle Prozesse	WG-ss	4.1	4.1	4.1
16	Kolloide	WG-ss	4.5	4.5	4.5
1.4	Freisetzungspfade		4.5	4.5	4.5
17	Art der Transportpfade und Ausbildung des Porenraums	WG-ss	4.5	4.5	4.5
20	Transmissivität präferenzierter Freisetzungspfade	WG-ss	4.5	4.5	4.5
22	Selbstabdichtungsvermögen	WG-ss	4.5	4.5	4.5
18	Homogenität des Gesteinsaufbaus	WG	4.5	4.5	4.5
19	Länge der massgebenden Freisetzungspfade	WG-ss	4.5	4.5	4.5
KG2	Langzeitstabilität		4.2	4.2	4.2
2.1	Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften		4.5	4.5	4.5
27	Potenzial zur Bildung neuer Wasserwegsamkeiten (Verkarstung)	WG	4.5	4.5	4.5
2.3	Lagerbedingte Einflüsse		3.5	3.5	3.5
29	Auflockerungszone im Nahbereich der Untertagebauten	WG-ss	4.3	4.3	4.3
30	Chemische Wechselwirkungen	WG-ss	4.5	4.5	4.5
31	Verhalten des Wirtgesteins bzgl. Gas	WG-ss	2.5	2.5	2.5
32	Verhalten des Wirtgesteins bzgl. Temperatur	WG-ss	2.7	2.7	2.7
2.4	Nutzungskonflikte		4.5	4.5	4.5
33	Rohstoffvorkommen innerhalb des Wirtgesteins	WG	4.5	4.5	4.5

Tab. 3.3.-2: (Fortsetzung)

Nr.	Kriteriengruppe / Kriterium / Indikator	Bewertungsobjekt	HAA-ZNO-OPA	HAA-NL-OPA	HAA-JO-OPA
KG3	Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen		4.4	4.4	4.4
3.1	Charakterisierbarkeit der Gesteine		4.5	4.5	4.5
39	Variabilität der Gesteinseigenschaften im Hinblick auf ihre Charakterisierbarkeit	WG-ss	4.5	4.5	4.5
40	Erfahrungen	WG	4.5	4.5	4.5
3.2	Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse		4.3	4.3	4.3
43	Explorationsverhältnisse im geologischen Untergrund	WG	4.3	4.3	4.3
3.3	Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen		4.5	4.5	4.5
46	Unabhängige Evidenzen der Langzeitisolation	WG	4.5	4.5	4.5
KG4	Bautechnische Eignung		3.5	3.5	3.5
4.1	Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen		3.5	3.5	3.5
47	Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften	WG-ss	3.5	3.5	3.5
KG1-4	Gesamtbewertung		4.1	4.1	4.1

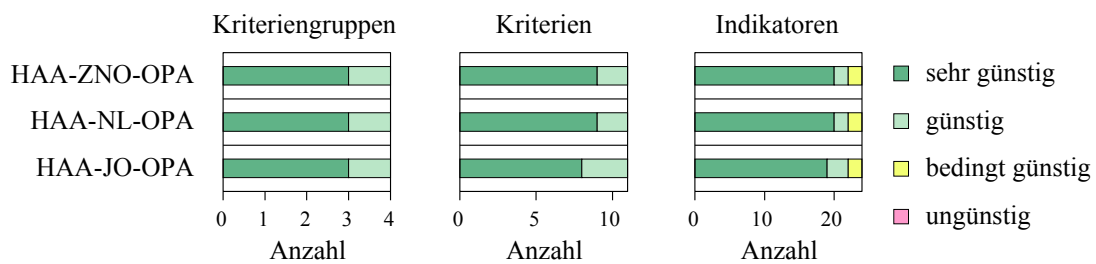


Fig. 3.3-2: Zusammenfassende Darstellung der Bewertungsergebnisse für den Opalinuston in den geologischen Standortgebieten für das HAA-Lager (massgebender Fall für die Einengung).

Die Histogramme zeigen die Anzahl von Bewertungen für die verschiedenen Bewertungsstufen.

Die **Gesamtbewertung** für den Opalinuston ergibt in allen Standortgebieten (Zürich Nordost, Nördlich Lägern, Jura Ost) die Bewertung *sehr geeignet*. Diese Bewertung ergibt sich aus den Bewertungen auf den Hierarchiestufen der Kriteriengruppen bzw. Kriterien und den detaillierten Bewertungen der zugehörigen Indikatoren.

Für die **Kriteriengruppe 'Eigenschaften des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs'** ergibt sich für den Opalinuston mit seinen Rahmengesteinen in allen Standortgebieten die Bewertung *sehr günstig*. Diese Bewertung ergibt sich aus der Bewertung der zu dieser Kriteriengruppe gehörenden Kriterien und Indikatoren. Die Bewertung des Kriteriums 'Räumliche Ausdehnung', welches durch den Indikator 'Mächtigkeit' (für den einschlusswirksamen Gebirgsbereich) bestimmt wird, fällt für den Opalinuston in den Standortgebieten Zürich Nordost und Nördlich Lägern *sehr günstig* und im Standortgebiet Jura Ost *günstig* aus wegen Unterschieden bei den Rahmengesteinen. Der Opalinuston wird wegen seiner sehr kleinen hydraulischen Durchlässigkeit bezüglich des Kriteriums 'Hydraulische Barrierenwirkung' als *sehr günstig* bewertet und auch die Bewertung des Kriteriums 'Geochemische Bedingungen' fällt *sehr günstig* aus. Das Kriterium 'Freisetzungspfade' wird für den Opalinuston in allen Standortgebieten insgesamt als *sehr günstig* bewertet.

Die **Kriteriengruppe 'Langzeitstabilität'** wird für den Opalinuston als *sehr günstig* bewertet, basierend auf der Bewertung der zugehörigen Kriterien und Indikatoren. Das Kriterium 'Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften' wird als *sehr günstig* bewertet, denn eine Verkarstung kann ausgeschlossen werden. Bei entsprechenden technischen Massnahmen (insbesondere bezüglich der Freisetzung von im Lager gebildetem Gas⁹⁷ sowie der Möglichkeiten zur Reduktion der Gasbildung bzw. der Gasbildungsraten) wird das Kriterium 'Lagerbedingte Einflüsse' für den Opalinuston in allen Standortgebieten insgesamt als *günstig* beurteilt. Bezüglich des Kriteriums 'Nutzungskonflikte' (Nutzung des Wirtgesteins als Rohstoff) wird der Opalinuston *sehr günstig* bewertet; die gebietsspezifischen Aspekte (z.B. Rohstoffvorkommen in tiefer liegenden Schichten) werden in Kap. 4.4 bewertet.

Für die **Kriteriengruppe 'Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen'** ergibt sich für den Opalinuston in allen Standortgebieten die Bewertung *sehr günstig*. Dies ergibt sich aus der Bewertung der zu dieser Kriteriengruppe gehörenden Kriterien und Indikatoren: Die Kriterien 'Charakterisierbarkeit der Gesteine' und 'Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse' werden für den Opalinustons *sehr günstig* bewertet; die Bedeutung dieser Bewertung ist jedoch in Zusammenhang mit den effektiven geometrischen Verhältnissen zu analysieren (vgl. dazu Kap. 4.4). Das Kriterium 'Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen' wird für den Opalinuston mit *sehr günstig* bewertet; es gibt mehrere klare Evidenzen bezüglich seiner Fähigkeit zur Langzeitisolation.

Die **Kriteriengruppe 'Bautechnische Eignung'** ergibt für den Opalinuston die Bewertung *günstig*; diese ist jedoch nur beschränkt aussagekräftig, da die Tiefenlage der Lagerebene noch nicht einbezogen ist (vgl. dazu Kap. 4.4). Diese Bewertung ergibt sich aus folgenden Überlegungen: Die felsmechanischen Eigenschaften erlauben bei Beschränkung der Tiefe der Lagerebene und unter Berücksichtigung der verschiedenen technischen Möglichkeiten für den Ausbruch und die Sicherung der Untertagebauten – unter Inkaufnahme eines erhöhten technischen Aufwands (Kosten, Zeitbedarf) – die zuverlässige Erstellung der untertägigen Bauten, ohne dass die Barriereigenschaften des Opalinustons grösserräumig beeinträchtigt würden; deshalb wird der Opalinuston bezüglich des Kriteriums 'Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen' in allen Standortgebieten als *günstig* beurteilt.

⁹⁷ Vergleiche dazu die Evaluation der Gasfreisetzung für das HAA-Lager (Nagra 2014a).

Fazit: Die Gesamtbewertung fällt für den Opalinuston in allen Standortgebieten mit der Gesamtbewertung *sehr geeignet* sehr vorteilhaft aus. Die detaillierte Bewertung auf Stufe Indikatoren zeigt beim Opalinuston nur minimale Unterschiede zwischen den verschiedenen Standortgebieten.

Sensitivität der Gesamtbewertung des 'massgebenden Falls für die Einengung' bezüglich alternativer konzeptueller Annahmen

Die Ergebnisse der Prüfung der Sensitivität bezüglich alternativer konzeptueller Annahmen zur Barrierenwirkung der Rahmengesteine des Opalinustons sind in Anhang C (Tab. C.3-2) aufgeführt.

Die alternativen konzeptuellen Annahmen zur Barrierenwirkung der Rahmengesteine des Opalinustons betreffen die Standortgebiete Nördlich Lägern und Jura Ost, im Standortgebiet Zürich Nordost gibt es hierzu keine wesentlichen Ungewissheiten. Die alternativen konzeptuellen Annahmen führen in den oben genannten Standortgebieten zu einer etwas höheren Bewertung (Jura Ost) bzw. zu einer etwas niedrigeren Bewertung (Nördlich Lägern) für den Indikator 'Mächtigkeit', aber nicht zu einer signifikanten Änderung der Gesamtbewertung.

3.4 Bewertung der Wirtgesteine für das SMA-Lager anhand der entscheidungsrelevanten Merkmale und Identifikation von eindeutigen Nachteilen

Die Identifikation möglicher (eindeutiger) Nachteile von Wirtgesteinen in Standortgebieten mit mehr als einem Wirtgestein erfolgt durch Vergleich der Wirtgesteine pro Standortgebiet anhand der in ENSI (2013a) vorgegebenen entscheidungsrelevanten Merkmale und der von der Nagra abgeleiteten zugehörigen Indikatoren. Für die Bewertung der entscheidungsrelevanten Merkmale der Wirtgesteine wird eine Aggregation der Bewertungen der zugehörigen Indikatoren durchgeführt, wobei die Bewertungen unverändert aus der qualitativen Bewertung (Kap. 3.3) übernommen werden. Bei der Aggregation wird wie folgt vorgegangen:

- Bei den Merkmalen 'Wirksamkeit der geologischen Barriere' und 'Explorier- und Charakterisierbarkeit der geologischen Barriere im Standortgebiet' werden die Bewertungen der zugehörigen wirtgesteinsspezifischen Indikatoren jeweils durch arithmetische, gleich gewichtete Mittelung aggregiert. Dies ist deshalb gerechtfertigt, weil die entsprechenden Indikatoren kompensierbare Beiträge zum übergeordneten Merkmal leisten.
- Beim Merkmal 'Langzeitstabilität der geologischen Barriere' wird jeweils das Minimum der Bewertungen der zugehörigen Indikatoren übernommen. Dies ist deshalb gerechtfertigt, weil die zugehörigen Indikatoren nicht-kompensierbare Beiträge zum übergeordneten Merkmal leisten (z.B. können die Auswirkungen einer möglichen Verkarstung auf die Langzeitsicherheit nicht durch eine günstigere Ausprägung von lagerbedingten Einflüssen kompensiert werden).
- Das Merkmal 'Bautechnische Machbarkeit eines Tiefenlagers unter Berücksichtigung der vorgeschlagenen Standortareale' wird beim sicherheitstechnischen Vergleich der Wirtgesteine nicht verwendet; hingegen spielt dieses Merkmal beim Vergleich der geologischen Standortgebiete eine wichtige Rolle, insbesondere unter Berücksichtigung der standortspezifischen Tiefenlage (vgl. Kap. 5).

Aufgrund seiner grossen Bedeutung für die Barrierenwirkung und für die Langzeitstabilität wird der Indikator 'Selbstabdichtungsvermögen' bei den Merkmalen 'Wirksamkeit der geologischen Barriere' und 'Langzeitstabilität der geologischen Barriere' als entscheidend relevant eingestuft. Dadurch erhält dieser Indikator ein grösseres Gewicht.

Für den Vergleich werden drei verschiedene Verfahren verwendet, welche die eindeutigen Nachteile der jeweiligen Wirtgesteine klarer hervorheben und welche sich im Vergleich mit der qualitativen Bewertung durch einen geringeren Kompensationsgrad der Bewertungen auszeichnen (direkter Vergleich der Bewertung der entscheidend relevanten Merkmale und Indikatoren, 'Outranking-Methode', Malus-Bilanzierung; vgl. Anhang D)⁹⁸.

In der nachfolgenden Diskussion liegt der Schwerpunkt auf den Ergebnissen des direkten Vergleichs der Bewertung der entscheidend relevanten Merkmale und zugehörigen Indikatoren. Zunächst werden anhand des direkten Vergleichs alle Hinweise auf eindeutige Nachteile ausgewiesen und es wird argumentativ dargelegt, welche dieser Hinweise tatsächlich als eindeutige Nachteile eingestuft werden. Danach wird anhand der alternativen Vergleichs-Methoden ('Outranking-Methode', Malus-Bilanzierung) geprüft, ob sie weitere Hinweise auf eindeutige Nachteile zutage fördern und ob diese gegebenenfalls als eindeutige Nachteile einzustufen sind (Differenzanalyse).

3.4.1 Bewertungsergebnisse

Die Bewertungen für die entscheidend relevanten Merkmale und zugehörigen Indikatoren sind in Tab. 3.4-1 für den massgebenden Fall zusammengefasst. Aus den Bewertungen können Hinweise auf eindeutige Nachteile (von unterschiedlicher Ausprägung) durch einen direkten Vergleich der Wirtgesteine pro Standortgebiet wie folgt bestimmt werden: Liegt die Bewertung eines Wirtgesteins für ein entscheidend relevantes Merkmal oder für einen zugehörigen Indikator um mindestens zwei Bewertungsstufen tiefer als die Bewertung des Vergleichs-Wirtgesteins für dasselbe Merkmal oder für denselben Indikator, so wird dies als Hinweis auf einen eindeutigen Nachteil interpretiert; liegt die Bewertung nur um eine Bewertungsstufe tiefer, so besteht ein Hinweis auf einen vertieft zu prüfenden Nachteil.

Die Bewertungen können zusätzlich auch zur Illustration der Stärken und Schwächen der Wirtgesteine verwendet werden, indem aus den Bewertungen Stärken-Schwächen-Profile abgeleitet werden. Dabei wird wie folgt vorgegangen: Die beste Bewertungsstufe (*sehr günstig* / dunkelgrün) wird als *Stärke* interpretiert, die beiden schlechtesten Bewertungsstufen (*bedingt günstig* / gelb und *ungünstig* / rosa) als *Schwächen*. Die mittlere Bewertungsstufe (*günstig* / hellgrün) wird indifferent, d.h. weder als Stärke noch als Schwäche, interpretiert. Der rein visuelle Vergleich der Bewertungen der Wirtgesteine mit dieser Farbgebung zeigt die Unterschiede zwischen den Wirtgesteinen deutlich auf.

⁹⁸ Bei der Festlegung der eindeutigen Nachteile wird dem 'direkten Vergleich der Bewertungen' die höchste Bedeutung gegeben; das 'Outranking' und die 'Malus-Bilanzierung' werden verwendet, um allenfalls vorhandene zusätzliche Hinweise auf eindeutige Nachteile zu identifizieren (Hinweise auf zu prüfende Nachteile).

Bewertungen für den 'massgebenden Fall für die Einengung' und Resultate des diesbezüglichen direkten Vergleichs zwischen den Wirtgesteinen

Die Resultate der Bewertung der entscheiderelevanten Merkmale und der zugehörigen Indikatoren sowie die resultierenden Stärken-Schwächen-Profile und die aus dem Vergleich abgeleiteten Hinweise auf eindeutige Nachteile der Wirtgesteine für diejenigen Standortgebiete für das SMA-Lager, in denen jeweils zwei Wirtgesteine zur Auswahl stehen, sind in Tab. 3.4-1 zusammengefasst. Fig. 3.4-1 zeigt für die verschiedenen Wirtgesteine Histogramme mit der Anzahl Merkmale bzw. Indikatoren pro Bewertungsstufe und gibt auch einen raschen Überblick über die Verteilung der Stärken und Schwächen. Für den massgebenden Fall ergibt sich das folgende Bild:

Der **Opalinuston** weist in den Standortgebieten Zürich Nordost und Nördlich Lägern bezüglich aller entscheiderelevanten Merkmale und Indikatoren Stärken auf. Im Standortgebiet Jura-Südfuss weist der Opalinuston nur bezüglich des entscheiderelevanten Indikators 'Mächtigkeit' eine *bedingt günstige* Bewertung und damit eine Schwäche auf; da der Opalinuston jedoch auch ohne Beitrag der Rahmengesteine eine sehr gute Barrierenwirkung aufweist und die Effinger Schichten bezüglich des Indikators 'Mächtigkeit' auch nur als *bedingt günstig* bewertet werden, ist dies für den Opalinuston im Standortgebiet Jura-Südfuss kein eindeutiger Nachteil. Alle anderen Bewertungen des Opalinustons werden als Stärken interpretiert. Damit ergeben sich für den Opalinuston in den Standortgebieten Zürich Nordost, Nördlich Lägern und Jura-Südfuss keine eindeutigen Nachteile gegenüber den anderen dort vorkommenden Wirtgesteinen.

Die **Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger'** weist in den Standortgebieten Zürich Nordost und Nördlich Lägern klare Schwächen auf bezüglich der Indikatoren 'Homogenität des Gesteinsaufbaus', 'Länge des massgebenden Freisetzungspfads' und 'Explorationsverhältnisse im geologischen Untergrund'. Alle für diese entscheiderelevanten Indikatoren aufgeführten Schwächen werden auch als eindeutige Nachteile des 'Braunen Doggers' gegenüber dem Opalinuston eingestuft⁹⁹.

Die **Effinger Schichten** weisen im Standortgebiet Jura-Südfuss Schwächen bezüglich der Indikatoren 'Mächtigkeit', 'Homogenität des Gesteinsaufbaus', 'Länge des massgebenden Freisetzungspfads', 'Kolloide', 'Potenzial zur Bildung neuer Wasserwegsamkeiten (Verkarstung)', 'Variabilität der Gesteinseigenschaften im Hinblick auf ihre Charakterisierbarkeit' und 'Explorationsverhältnisse im geologischen Untergrund' und damit auch bezüglich aller entscheiderelevanten Merkmale auf. Alle diese Schwächen werden mit Ausnahme des Indikators 'Mächtigkeit'¹⁰⁰ auch als eindeutige Nachteile der Effinger Schichten gegenüber dem Opalinuston eingestuft. Ferner liegen bei fünf weiteren Indikatoren Hinweise aus den vergleichsweise tieferen Bewertungen für die Effinger Schichten vor, die (mit Ausnahme des Indikators 'Hydraulische Durchlässigkeit') wegen ihrer ungünstigen Wirkung auf das Radionuklidrückhaltevermögen auch als eindeutige Nachteile gegenüber dem Opalinuston eingestuft werden.

⁹⁹ Obschon mehrere entscheiderelevante Indikatoren eine ungünstige Bewertung erhalten, führt die Aggregation bei den Merkmalen dazu, dass diese trotzdem eine günstige Bewertung erhalten (vgl. Merkmale 'Wirksamkeit der geologischen Barriere' und 'Explorier- und Charakterisierbarkeit der geologischen Barriere im Standortgebiet').

¹⁰⁰ Der Indikator 'Mächtigkeit' wird im Standortgebiet Jura-Südfuss sowohl bei den Effinger Schichten als auch beim Opalinuston nur als *bedingt günstig* bewertet.

Tab. 3.4-1: Bewertung der entscheidrelevanten Merkmale und der zugehörigen Indikatoren für die Wirtgesteine für das SMA-Lager und die daraus abgeleiteten Hinweise auf eindeutige Nachteile (massgebender Fall für die Einengung).

Legende: rosa: ungünstig; gelb: bedingt günstig; hellgrün: günstig; dunkelgrün: sehr günstig.

(×) bzw. (*) – Hinweis auf eindeutigen bzw. vertieft zu prüfenden Nachteil eines Wirtgesteins gegenüber einem anderen Wirtgestein im gleichen Standortgebiet (Differenz von mindestens zwei bzw. einer Bewertungsstufe).

Die Bewertungen können auch als Stärken-Schwächen-Profile interpretiert werden: Dunkelgrün – *Stärke*, gelb und rosa – *Schwäche*, hellgrüne Felder: *indifferent* (weder Stärke noch Schwäche).

a) Standortgebiet Zürich Nordost

Nr.	Entscheidrelevante Merkmale (EM) / Entscheidrelevante Indikatoren (EI)	SMA- ZNO- OPA	SMA- ZNO- BD
a)	Wirksamkeit der geologischen Barriere	4.5	3.7 (*)
5	Mächtigkeit	4.5	4.1
9	Hydraulische Durchlässigkeit	4.5	4.3
17	Art der Transportpfade und Ausbildung des Porenraums	4.5	4.3
20	Transmissivität präferenzierter Freisetzungspfade	4.5	4.3
22	Selbstabdichtungsvermögen	4.5	4.3
18	Homogenität des Gesteinsaufbaus	4.5	2.5 (×)
19	Länge der massgebenden Freisetzungspfade	4.5	1.5 (×)
16	Kolloide	4.5	4.5
b)	Langzeitstabilität der geologischen Barriere	4.5	4.3
27	Potenzial zur Bildung neuer Wasserwegsamkeiten (Verkarstung)	4.5	4.3
22	Selbstabdichtungsvermögen	4.5	4.3
c)	Explorier- und Charakterisierbarkeit der geologischen Barriere im Standortgebiet	4.4	3.3 (*)
39	Variabilität der Gesteinseigenschaften im Hinblick auf ihre Charakterisierbarkeit	4.5	4.1
43	Explorationsverhältnisse im geologischen Untergrund	4.3	2.5 (×)

Tab. 3.4-1 (Fortsetzung)

b) Standortgebiet Nördlich Lägern

Nr.	Entscheidrelevante Merkmale (EM) / Entscheidrelevante Indikatoren (EI)	SMA- NL- OPA	SMA- NL- BD
a)	Wirksamkeit der geologischen Barriere	4.5	3.8 (*)
5	Mächtigkeit	4.5	4.5
9	Hydraulische Durchlässigkeit	4.5	4.3
17	Art der Transportpfade und Ausbildung des Porenraums	4.5	4.3
20	Transmissivität präferenzierter Freisetzungspfade	4.5	4.3
22	Selbstabdichtungsvermögen	4.5	4.3
18	Homogenität des Gesteinsaufbaus	4.5	2.5 (×)
19	Länge der massgebenden Freisetzungspfade	4.5	1.5 (×)
16	Kolloide	4.5	4.5
b)	Langzeitstabilität der geologischen Barriere	4.5	4.3
27	Potenzial zur Bildung neuer Wasserwegsamkeiten (Verkarstung)	4.5	4.3
22	Selbstabdichtungsvermögen	4.5	4.3
c)	Explorier- und Charakterisierbarkeit der geologischen Barriere im Standortgebiet	4.4	3.3 (*)
39	Variabilität der Gesteinseigenschaften im Hinblick auf ihre Charakterisierbarkeit	4.5	4.1
43	Explorationsverhältnisse im geologischen Untergrund	4.3	2.5 (×)

Tab. 3.4-1 (Fortsetzung)

c) Standortgebiet Jura-Südfuss

Nr.	Entscheidrelevante Merkmale (EM) / Entscheidrelevante Indikatoren (EI)	SMA- JS- OPA	SMA- JS- EFF
a)	Wirksamkeit der geologischen Barriere	4.3	2.8 (×)
5	Mächtigkeit	2.5	2.5
9	Hydraulische Durchlässigkeit	4.5	3.7 (*)
17	Art der Transportpfade und Ausbildung des Porenraums	4.5	3.3 (*)
20	Transmissivität präferenzierter Freisetzungspfade	4.5	3.1 (*)
22	Selbstabdichtungsvermögen	4.5	3.1 (*)
18	Homogenität des Gesteinsaufbaus	4.5	2.5 (×)
19	Länge der massgebenden Freisetzungspfade	4.5	1.5 (×)
16	Kolloide	4.5	2.5 (×)
b)	Langzeitstabilität der geologischen Barriere	4.5	2.5 (×)
27	Potenzial zur Bildung neuer Wasserwegsamkeiten (Verkarstung)	4.5	2.5 (×)
22	Selbstabdichtungsvermögen	4.5	3.1 (*)
c)	Explorier- und Charakterisierbarkeit der geologischen Barriere im Standortgebiet	4.3	2.5 (×)
39	Variabilität der Gesteinseigenschaften im Hinblick auf ihre Charakterisierbarkeit	4.5	2.5 (×)
43	Explorationsverhältnisse im geologischen Untergrund	4.1	2.5 (×)

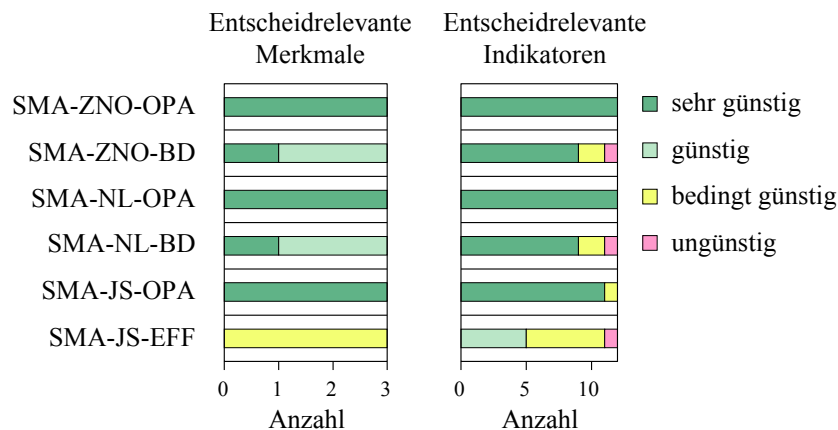


Fig. 3.4-1: Zusammenfassende Darstellung der Bewertungsergebnisse für die Wirtgesteine für das SMA-Lager in den geologischen Standortgebieten mit mehr als einem Wirtgestein (entscheidrelevante Merkmale und Indikatoren, massgebender Fall für die Einengung).

Die Histogramme zeigen die Anzahl Bewertungen für die verschiedenen Bewertungsstufen. Rosa und gelb können als Schwäche interpretiert werden, dunkelgrün als Stärke und hellgrün als indifferent. Damit können die Graphiken auch als Stärken-Schwächen-Profile verwendet werden.

Sensitivität der Bewertungen und des Vergleichs des 'massgebenden Falls für die Einengung' bezüglich alternativer konzeptueller Annahmen

Die Ergebnisse der Prüfung der Sensitivität bezüglich alternativer konzeptueller Annahmen zur Wasserführung in "harten Bänken" innerhalb der Wirtgesteine sowie zur Barrierenwirkung der Rahmengesteine sind in Anhang C (Tab. C.2-4) aufgeführt.

Insgesamt fallen die Bewertungen und die resultierenden Stärken-Schwächen-Profile für die alternativen Konzeptualisierungen und für den "massgebenden Fall für die Einengung" sehr ähnlich aus. Die Unterschiede lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Der **Opalinuston** weist für die alternativen Konzeptualisierungen keine Schwächen auf. Für das Standortgebiet Jura-Südfuss ergibt die alternative Konzeptualisierung mit einer besseren Barrierenwirkung der oberen Rahmengesteine für den Indikator 'Mächtigkeit' eine *günstige* Bewertung und weist diesbezüglich keine Schwäche mehr auf. Diese würde zu einem weiteren eindeutigen Nachteil für die Effinger Schichten führen.

Die **Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger'** weist für die alternativen konzeptuellen Annahmen in den Standortgebieten Zürich Nordost und Nördlich Lägern jeweils mehrere markante Schwächen auf, wobei zwei identisch sind wie im massgebenden Fall (nämlich bezüglich der Indikatoren 'Länge des massgebenden Freisetzungspfads' und 'Explorationsverhältnisse im geologischen Untergrund'). Lediglich für die alternative Annahme zur Wasserführung in "harten Bänken" ergibt sich eine etwas günstigere Bewertung für den Indikator 'Homogenität des Gesteinsaufbaus', dafür muss in diesem alternativen Fall zusätzlich auch der Nachweis der nicht vorhandenen hydraulischen Kontinuität und der Abwesenheit auch von kleinen Versätzen in den "harten Bänken" erbracht werden, sodass die ungünstigere Bewertung für den Indikator 'Variabilität der Gesteinseigenschaften im Hinblick auf ihre Charakterisierbarkeit' als Schwäche zu interpretieren wäre.

Für die **Effinger Schichten** gibt es keine bedeutenden Ungewissheiten bezüglich der Wasserführung in "harten Bänken", welche die Kalkmergelabfolge KMA-5 begrenzen (vgl. Fig. 3.1-3); die im massgebenden Fall identifizierten Schwächen und eindeutigen Nachteile ändern sich nicht.

'Outranking-Methode' für die entscheiderelevanten Merkmale und zugehörigen Indikatoren sowie Hinweise auf eindeutige Nachteile für den massgebenden Fall für die Einengung

Die Schwäche-Präferenzflüsse und die daraus abgeleiteten Hinweise auf eindeutige Nachteile der Wirtgesteine für diejenigen Standortgebiete für das SMA-Lager, in denen jeweils zwei Wirtgesteine zur Auswahl stehen, sind in Tab. C.2-5 für den massgebenden Fall zusammengefasst. Zusätzlich werden in Fig. C.2-1 die Beiträge der entscheiderelevanten Merkmale zu den Schwäche-Präferenzflüssen denjenigen der Stärke-Präferenzflüsse für die drei relevanten Standortgebiete gegenübergestellt. Für den massgebenden Fall ergeben sich bei der 'Outranking-Methode' keine zusätzlichen Hinweise auf eindeutige Nachteile und die Resultate bestätigen die aus dem direkten Vergleich ermittelten eindeutigen Nachteile (vgl. dazu auch Tab. 3.4-2).

Malus-Bilanzierung für die entscheidrelevanten Merkmale und zugehörigen Indikatoren sowie Hinweise auf eindeutige Nachteile für den massgebenden Fall für die Einengung

Die Malus-Bilanzierung und die daraus abgeleiteten Hinweise auf eindeutige Nachteile der Wirtgesteine für diejenigen Standortgebiete für das SMA-Lager, in denen jeweils zwei Wirtgesteine zur Auswahl stehen, sind in Tab. C.2-6 zusammengefasst. Für den massgebenden Fall ergeben sich auch bei der Malus-Bilanzierung keine zusätzlichen Hinweise auf eindeutige Nachteile. Der Indikator 'Mächtigkeit' wird im Standortgebiet Jura-Südfuss sowohl bei den Effinger Schichten als auch beim Opalinuston nur als *bedingt günstig* bewertet, weshalb hier kein eindeutiger Nachteil vorliegt. Die Resultate bestätigen im Wesentlichen die aus dem direkten Vergleich ermittelten eindeutigen Nachteile; es ergeben sich keine zusätzlichen eindeutigen Nachteile (vgl. dazu auch Tab. 3.4-2).

3.4.2 Zusammenfassung der eindeutigen Nachteile der Wirtgesteine für das SMA-Lager

Die Hinweise auf eindeutige Nachteile von Wirtgesteinen für die drei Vergleichs-Methoden sind in Tab. 3.4-2 für den "massgebenden Fall" zusammengefasst. In Kap. 3.4.1 wurde zunächst anhand des direkten Vergleichs der Bewertungen für die entscheidrelevanten Merkmale und zugehörigen Indikatoren argumentativ dargelegt, welche dieser Hinweise tatsächlich als eindeutige Nachteile eingestuft werden. Ferner wurde geprüft, ob die beiden alternativen Vergleichsmethoden ('Outranking-Methode', Malus-Bilanzierung) weitere Hinweise auf eindeutige Nachteile zutage fördern und ob diese gegebenenfalls als eindeutige Nachteile einzustufen sind.

Die Ergebnisse dieser Beurteilung werden für die Wirtgesteins-Paare Opalinuston – Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger' (Standortgebiete Zürich Nordost und Nördlich Lägern) und Opalinuston – Effinger Schichten (Standortgebiet Jura-Südfuss) getrennt aufgeführt. Es ergibt sich das folgende Bild:

- Im Standortgebiet Zürich Nordost ergeben sich für den 'Braunen Dogger' gegenüber dem Opalinuston eindeutige Nachteile für die folgenden Indikatoren: 'Länge der massgebenden Freisetzungspfade', 'Homogenität des Gesteinsaufbaus' und 'Explorationsverhältnisse im geologischen Untergrund'. Ferner ergibt sich ein eindeutiger Nachteil für das entscheidrelevante Merkmal 'Explorier- und Charakterisierbarkeit der geologischen Barriere im Standortgebiet'.
- Im Standortgebiet Nördlich Lägern ergeben sich für den 'Braunen Dogger' gegenüber dem Opalinuston mehrere eindeutige Nachteile, welche mit denjenigen im Standortgebiet Zürich Nordost identisch sind.

- Im Standortgebiet Jura-Südfuss ergeben sich für die Effinger Schichten bei allen Merkmalen und bei fast allen Indikatoren eindeutige Nachteile gegenüber dem Opalinuston. Bezüglich des Merkmals 'Wirksamkeit der geologischen Barriere' ergibt sich ein eindeutiger Nachteil, der auf eindeutige Nachteile bei fast allen zugehörigen Indikatoren zurückzuführen ist. Eine Ausnahme bildet der Indikator 'Hydraulische Durchlässigkeit', der aufgrund tiefer Durchlässigkeitswerte nicht als eindeutiger Nachteil eingestuft wird und auch für den Indikator 'Mächtigkeit' ergibt sich für den "massgebenden Fall" kein eindeutiger Nachteil, da der Opalinuston und die Effinger Schichten gleich bewertet werden. Andererseits ergibt sich bezüglich des Merkmals 'Langzeitstabilität der geologischen Barriere' ein eindeutiger Nachteil, der auf eindeutige Nachteile bei den beiden zugeordneten Indikatoren 'Potenzial zur Bildung neuer Wasserwegsamkeiten (Verkarstung)' und 'Selbstabdichtungsvermögen' zurückzuführen ist. Weiter ergibt sich auch bezüglich des Merkmals 'Explorier- und Charakterisierbarkeit der geologischen Barriere im Standortgebiet' ein eindeutiger Nachteil, der auf eindeutige Nachteile bei den beiden zugeordneten Indikatoren 'Variabilität der Gesteinseigenschaften im Hinblick auf ihre Charakterisierbarkeit' und 'Explorationsverhältnisse im geologischen Untergrund' zurückzuführen ist.

Insgesamt lässt sich eine klare Rangierung der Wirtgesteine pro Standortgebiet ausmachen: Der Opalinuston qualifiziert sich in den drei Standortgebieten Zürich Nordost, Nördlich Lägern und Jura-Südfuss klar als prioritäres Wirtgestein, da er keine eindeutigen Nachteile aufweist. In den übrigen Standortgebieten kommt jeweils nur ein einziges Wirtgestein vor: In den Standortgebieten Südranden und Jura Ost der Opalinuston, im Standortgebiet Wellenberg die Mergel-Formationen des Helvetikums. Hier entfällt deshalb ein Wirtgesteinsvergleich.

Tab. 3.4-2: Zusammenfassung der Hinweise auf eindeutige Nachteile und daraus abgeleitete eindeutige Nachteile der Wirtgesteine auf Stufe der entscheiderelevanten Merkmale und der zugehörigen Indikatoren (massgebender Fall für die Einengung).

Legende:

- × – Hinweis auf einen eindeutigen Nachteil eines Wirtgesteins gegenüber einem anderen Wirtgestein im gleichen Standortgebiet aus dem direkten Vergleich der Bewertungen.
- (*) – zusätzlicher Hinweis auf einen eindeutigen Nachteil eines Wirtgesteins gegenüber einem anderen Wirtgestein aus dem direkten Vergleich der Bewertungen.
- # – Hinweis auf zu prüfenden Nachteil eines Wirtgesteins gegenüber einem anderen Wirtgestein aus der Outranking-Methode.
- ° – Hinweis auf zu prüfenden Nachteil eines Wirtgesteins gegenüber einem anderen Wirtgestein aus der Malus-Bilanzierung.

Rosa markierte Felder: als eindeutige Nachteile eingestuft.

Tab. 3.4-2: (Fortsetzung)

Entscheidungsrelevante Merkmale und zugehörige Indikatoren	Hinweise auf eindeutige Nachteile des 'Braunen Doggers' gegenüber dem Opalinuston (Standortgebiet Zürich Nordost)			Hinweise auf eindeutige Nachteile des 'Braunen Doggers' gegenüber dem Opalinuston (Standortgebiet Nördlich Lägern)			Hinweise auf eindeutige Nachteile der Effinger Schichten gegenüber dem Opalinuston (Standortgebiet Jura-Südfuss)		
	Direkter Vergleich	'Outranking- Methode'	Malus- Bilanzierung	Direkter Vergleich	'Outranking- Methode'	Malus- Bilanzierung	Direkter Vergleich	'Outranking- Methode'	Malus- Bilanzierung
Wirksamkeit der geologischen Barriere	(*)			(*)			×	#	○
Mächtigkeit									
Hydraulische Durchlässigkeit							(*)		
Art der Transportpfade und Ausbildung des Porenraums							(*)	#	
Transmissivität präferenzierter Freisetzungspfade							(*)	#	○
Selbstabdichtungsvermögen							(*)	#	○
Länge der massgebenden Freisetzungspfade	×	#	○	×	#	○	×	#	○
Homogenität des Gesteinsaufbaus	×	#	○	×	#	○	×	#	○
Kolloide							×	#	○
Langzeitstabilität der geologischen Barriere							×	#	○
Potenzial zur Bildung neuer Wasserwegsamkeiten (Verkarstung)							×	#	○
Selbstabdichtungsvermögen							(*)	#	○
Explorier- und Charakterisierbarkeit der geologischen Barriere im Standortgebiet	(*)	#		(*)	#		×	#	○
Variabilität der Gesteinseigenschaften im Hinblick auf ihre Charakterisierbarkeit							×	#	○
Explorationsverhältnisse im geologischen Untergrund	×	#	○	×	#	○	×	#	○

3.5 Vergleichende Gesamtbewertung der Wirtgesteine und Auswahl der prioritären Wirtgesteine für das SMA-Lager

Anhand der in den vorhergehenden Kapiteln präsentierten wirtgesteinsspezifischen Dosisintervalle, der Charakterisierung und qualitativen Bewertung der Wirtgesteine sowie der Identifikation eindeutiger Nachteile der Wirtgesteine wird nachfolgend die vergleichende Gesamtbewertung der Wirtgesteine für das SMA-Lager vorgenommen und die Auswahl der prioritären Wirtgesteine für das SMA-Lager getroffen. Für das HAA-Lager entfällt dieser Schritt, da der Entscheid bezüglich der Auswahl des Opalinustons als Wirtgestein für das HAA-Lager bereits im Rahmen der Etappe 1 getroffen wurde. Für die vergleichende Gesamtbewertung werden die Ergebnisse aller Bewertungsschritte hinsichtlich der Frage ausgewertet, welche der Wirtgesteine in den SMA-Standortgebieten mit mehr als einem Wirtgestein in der Gesamtschau am ungünstigsten abschneiden und deshalb zurückzustellen sind. Zu diesem Zweck werden die vier in ENSI (2013a) aufgeführten Fragen verwendet. Sinngemäss auf die Evaluation der Wirtgesteine angewendet, lauten diese Fragen wie folgt (vgl. Fig. 2.1-1):

1. Erfüllt das Wirtgestein das Dosis-Schutzkriterium nicht?
2. Ist das Wirtgestein aufgrund der Ergebnisse der Dosis-Berechnungen eindeutig weniger geeignet?
3. Ist die Gesamtbewertung des Wirtgesteins schlechter als "geeignet"?
4. Können beim Wirtgestein anhand der Kriterien zur Sicherheit und technischen Machbarkeit belastbare eindeutige Nachteile gegenüber anderen Wirtgesteinen im gleichen Standortgebiet festgestellt werden?

Wird für ein Wirtgestein eine oder mehrere dieser vier Fragen mit "ja" beantwortet, dann wird es als *weiteres Wirtgestein* eingestuft. Andernfalls wird es als prioritäres Wirtgestein eingestuft.

Zur Erfüllung des Dosis-Schutzkriteriums durch die Wirtgesteine (Frage 1): Die Resultate in Fig. 3.2-1 und Fig. 3.2-2 zeigen, dass alle Wirtgesteine in den geologischen Standortgebieten mit mehr als einem Wirtgestein sicherheitstechnisch geeignet sind, weil für alle diese Wirtgesteine der obere Rand des charakteristischen Dosisintervalls unterhalb des Schutzkriteriums 1 der Richtlinie G03 (ENSI 2009) von 0.1 mSv/a liegt.

Zur Gleichwertigkeit der Wirtgesteine bezüglich der Dosis-Berechnungen (Frage 2): Die Wirtgesteine sind gemäss ENSI (2010a) als sicherheitstechnisch gleichwertig zu betrachten, weil der obere Rand aller Dosisintervalle unterhalb von 0.01 mSv/a liegt. Bei den Dosisintervallen sind jedoch deutliche Unterschiede auszumachen: So liegt der obere Rand des Dosisintervalls für die Effinger Schichten im Standortgebiet Jura-Südfuss knapp unterhalb von 0.01 mSv/a, während er bei der Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger' in den Standortgebieten Zürich Nordost und Nördlich Lägern um knapp eine Grössenordnung, beim Opalinuston im Standortgebiet Jura-Südfuss um mehr als eine Grössenordnung und beim Opalinuston in den Standortgebieten Zürich Nordost und Nördlich Lägern um mehr als drei Grössenordnungen unterhalb von 0.01 mSv/a liegt¹⁰¹.

Damit werden die Fragen 1 und 2 für alle Wirtgesteine für das SMA-Lager mit "nein" beantwortet, d.h. alle Wirtgesteine qualifizieren sich für die weitere Bewertung (qualitative Bewertung).

¹⁰¹ Die Ableitung des charakteristischen Dosisintervalls für die Mergel-Formationen des Helvetikums erfolgt standortspezifisch (vgl. Kap. 4.3).

Zu den Gesamtbewertungen der Wirtgesteine (Frage 3): Die qualitative Bewertung ergibt für alle Wirtgesteine in den betreffenden Standortgebieten mindestens die Gesamtbewertung "geeignet", im Falle des Opalinustons sogar die Gesamtbewertung "sehr geeignet" (vgl. Tab. 3.3-1). Damit wird Frage 3 ebenfalls für alle Wirtgesteine für das SMA-Lager mit "nein" beantwortet, sodass sich alle Wirtgesteine für die weitere Bewertung qualifizieren (Identifikation eindeutiger Nachteile durch den sicherheitstechnischen Vergleich).

Zu eindeutigen Nachteilen von Wirtgesteinen (Frage 4): Wie in Kap. 3.4 detailliert aufgezeigt, weisen die Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger' in den Standortgebieten Zürich Nordost und Nördlich Lägern sowie die Effinger Schichten im Standortgebiet Jura-Südfuss gegenüber dem dort vorkommenden Opalinuston eindeutige Nachteile auf. Die Frage, welche sich auf das Vorhandensein von eindeutigen Nachteilen bezieht, kann deshalb für diese Wirtgesteine in den betreffenden Standortgebieten mit "ja" beantwortet werden. Dies führt dazu, dass die Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger' und die Effinger Schichten als Wirtgesteine für das SMA-Lager in den betreffenden Standortgebieten nicht als prioritäre Wirtgesteine sondern nur als *weitere Wirtgesteine* eingestuft werden¹⁰².

Zusammenfassend werden im Hinblick auf die Abgrenzung der untertägigen Lagerperimeter in den Standortgebieten für das SMA-Lager die folgenden prioritären Wirtgesteine festgelegt (in Klammern: *weitere Wirtgesteine*):

- Standortgebiet Südranden: **Opalinuston**
- Standortgebiet Zürich Nordost: **Opalinuston** (Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger')
- Standortgebiet Nördlich Lägern: **Opalinuston** (Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger')
- Standortgebiet Jura Ost: **Opalinuston**
- Standortgebiet Jura-Südfuss: **Opalinuston** (Effinger Schichten)
- Standortgebiet Wellenberg: **Mergel-Formationen des Helvetikums**

Für das HAA-Lager wurde der Entscheid bezüglich der Auswahl des Opalinustons als prioritäres Wirtgestein bereits im Rahmen der Etappe 1 getroffen.

Neben den für die Festlegung der prioritären Wirtgesteine verwendeten Fragen gemäss ENSI (2013a) werden die prioritären Wirtgesteine nachfolgend auch anhand der Fragen der KNS und der Hinweise der AG SiKa/KES beurteilt, die in ENSI (2013b) wie folgt formuliert wurden:

- Sind geringdurchlässige homogene Wirtgesteinskörper von ausreichender Mächtigkeit und lateraler Ausdehnung vorhanden? Liegen diese Wirtgesteinskörper in geeigneter Tiefe?
- Gibt es unmittelbar angrenzend an diese Wirtgesteinskörper Aquifere?
- Besteht eine Gefährdung der Langzeitsicherheit durch Neotektonik oder Erosion?
- Was sind die Schlussfolgerungen der Nagra aus der Analyse der neugewonnenen Seismikmessungen?
- Sind die Mindestanforderungen und die verschärften Anforderungen aus Etappe 1 SGT in den Standortgebieten immer noch erfüllt?

¹⁰² "Weiteres Wirtgestein" bedeutet, dass dieses Wirtgestein zwar bei der in Etappe 2 durchgeführten Analyse und Einengung nicht weiter betrachtet wird, grundsätzlich aber als Wirtgestein für Abfälle, welche tiefe Anforderungen an die Barrierenwirkung stellen, zur Verfügung steht, falls ein entsprechendes Standortgebiet in Etappe 3 weiter betrachtet wird.

- Was ist der Einfluss von sicherheitsrelevanten Ungewissheiten auf das Systemverhalten eines Tiefenlagers?
- Sind die den sicherheitstechnischen Analysen zugrunde gelegten geologischen Modelle gesichert?

Die durchgeführte Bewertung der Unterlagen führt bezüglich dieser Fragen zu folgenden Schlussfolgerungen:

Der in Standortgebieten mit mehr als einem Wirtgestein als prioritäres Wirtgestein bezeichnete Opalinuston mit seinen Rahmengesteinen ist ein homogenes Wirtgestein, welches in den in Etappe 1 gewählten Standortgebieten in geeigneter Tiefe liegt und eine ausreichende Mächtigkeit sowie eine genügende laterale Ausdehnung hat. In den in Etappe 1 gewählten Standortgebieten gibt es mit Ausnahme des Standortgebiets Jura-Südfuss angrenzend an den Opalinuston immer gering durchlässige Rahmengesteine. Es gibt aber Unterschiede in den Rahmengesteinen zwischen den Standortgebieten, die in Kap. 4 behandelt werden. Unterschiede in den Rahmengesteinen gibt es auch bei der Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger', während die Effinger Schichten im Standortgebiet Jura-Südfuss keine barrierenwirksamen Rahmengesteine aufweisen. Die Frage zur Gefährdung der Langzeitsicherheit durch Neotektonik oder Erosion wird in Kap. 4 behandelt. Die für Etappe 2 durchgeführten Untersuchungen (2D-Seismik, Auswertung von Daten aus Bohrungen Dritter, Kartierung etc.) haben zu einer deutlich kritischeren Bewertung der Effinger Schichten und der Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger' als in Etappe 1 geführt.

Der in Standortgebieten mit mehr als einem Wirtgestein als prioritäres Wirtgestein bezeichnete Opalinuston mit seinen Rahmengesteinen erfüllt die Mindestanforderungen und die verschärften Anforderungen aus Etappe 1 SGT, soweit die diesbezügliche Bewertung hier schon erfolgt ist; die in Kap. 3 noch nicht bewerteten Indikatoren werden in Kap. 4 bewertet.

Die für die Analysen und die Beurteilung der Wirtgesteine verwendeten geologischen Modelle sind aus Sicht der Nagra genügend gut gesichert; die vorhandenen Ungewissheiten wurden bei den Analysen und der Entscheidungsfindung berücksichtigt.

Die Beurteilung der bezeichneten prioritären Wirtgesteine anhand der Fragen der KNS und der Hinweise der AG SiKa/KES führt nicht dazu, die Festlegung der prioritären Wirtgesteine anpassen zu müssen; diese bleibt bestehen.

4 Abgrenzung optimierter Lagerperimeter und deren Bewertung

4.1 Vorgehen und verwendete Grundlagen

Übersicht

Die in Etappe 2 verwendete Methodik zur Abgrenzung der untertägigen Lagerperimeter und zu ihrer Bewertung geht von den behördlichen Vorgaben aus (BFE 2008, ENSI 2010a und ENSI 2013a) und ist in Kap. 2.3 näher beschrieben. Sie wird im Folgenden kurz zusammengefasst. Die Abgrenzung optimierter Lagerperimeter gliedert sich in zwei Teilschritte: Im ersten Teilschritt werden für jedes geologische Standortgebiet Lagerperimeter mit den Mindest- und verschärften Anforderungen gemäss Etappe 1 abgegrenzt¹⁰³. Im zweiten Teilschritt folgt eine Optimierung der Lagerperimeter. Diese hat zum Ziel, durch gezielt gewählte erhöhte Anforderungen (sogenannte Optimierungsanforderungen) im GIS-Schneideprozess für jedes geologische Standortgebiet optimierte Lagerperimeter zu bestimmen (getrennt für das SMA-Lager und das HAA-Lager). Wo sinnvoll, wird bei der Abgrenzung im Rahmen von Sensitivitätsbetrachtungen geprüft, wie empfindlich die resultierenden Lagerperimeter auf alternative Annahmen bezüglich Optimierung und auf Ungewissheiten in den geologischen Unterlagen (insbesondere Tiefenlage des Wirtgesteins) reagieren. Die Abgrenzung der Lagerperimeter wird in Kap. 4.2 dargestellt und führt zu einem "massgebenden Fall" und zu alternativen Lagerperimetern. Die optimierten Lagerperimeter (der jeweils pro Standortgebiet "massgebende Fall") werden anschliessend bewertet. Die Bewertung umfasst einerseits Dosisberechnungen und die davon abgeleiteten charakteristischen Dosisintervalle (vgl. Kap. 4.3) und andererseits eine qualitative Bewertung anhand der 13 Kriterien des Sachplans (vgl. Kap. 4.4). Die Dosisberechnungen beinhalten breite Parametervariationen, und für die Bewertung werden in Kap. 4.4 wo nötig neben dem "massgebenden Fall" auch alternative Lagerperimeter und alternative Konzeptualisierungen der Rahmengesteine bewertet. Die Resultate von Kap. 4 werden anschliessend in Kap. 5 verwendet für den sicherheitstechnischen Vergleich und die Festlegung der Vorschläge für die in Etappe 3 weiter zu untersuchenden Standortgebiete für das SMA- und das HAA-Lager.

Die wichtigsten Grundlagen für diese Arbeitsschritte sind die geologischen Unterlagen, die in Nagra (2014b) dokumentiert sind. Diese berücksichtigen neben den schon für Etappe 1 verfügbaren geologischen Unterlagen auch die in der Zwischenzeit neu erarbeiteten Unterlagen. Für die Abgrenzung und teilweise auch für die Charakterisierung bzw. Bewertung der Lagerperimeter sind dies neben den in Kap. 3 diskutierten Unterlagen zu den Wirtgesteinen die regionalen geologischen Elemente (regionale Störungszonen, zu meidende tektonische Zonen), die Tiefenlage der Wirtgesteinsschichten (inkl. Rahmengesteine) bezüglich verschiedener Bezugshorizonte, die tektonischen Regimes und der lokale tektonische Baustil sowie Konzepte und Modellvorstellungen zur Geodynamik und Langzeitentwicklung (inkl. der dazu gehörenden Parameter), die alle in Nagra (2014b) dokumentiert sind. Im Vergleich zu den Unterlagen für Etappe 1 (Nagra 2008b und c) stehen zusätzlich Unterlagen zu Verfügung, welche für die Beurteilung des Kenntnisstands (Nagra 2010) und für die jetzt durchgeführte Einengung neu erarbeitet wurden. Ein Teil der seit Nagra (2010) erarbeiteten Unterlagen wurden bei den Zwischenhalt-Fachsitungen frühzeitig dem ENSI sowie weiteren Behörden und Experten vorgestellt.

¹⁰³ Im Gegensatz zu Etappe 1 werden in Etappe 2 die 'diffus gestörten Zonen' nicht mehr verwendet; diese fallen entweder weg oder werden basierend auf den detaillierteren Informationen aus der Seismik neu über die 'regionalen Störungszonen' bzw. über die 'zu meidenden tektonischen Zonen' berücksichtigt.

Das in der abschliessenden Zwischenhalt-Fachsitzung vom ENSI gezogene positive Fazit bezüglich des Kenntnisstands ist im entsprechenden Sitzungsprotokoll (ENSI 2014) dokumentiert.

Gegenüber Etappe 1 sind zusätzliche Informationen vorhanden aus Ergänzungen zur Gravimetrie (ergänzende Messungen und eine neue Auswertung), aus den neu aufgenommenen 2D-Seismiklinien, aus der reprozessierten Seismik, aus Bohrungen Dritter (Erdwärmesonden, Bohrung Schlattingen-1 und -2, Tiefbohrung Gösgen SB4), aus Feld- und Luftaufnahmen (Strukturgeologie, LiDAR etc.) sowie aus vertieften Auswertungen und Analysen (vgl. Fig. 4.1-1). Diese Informationen erlauben es, für die relevanten geologischen Prozesse und Elemente Konzepte und zugehörige Datensätze abzuleiten, die Ungewissheiten in Konzepten und Parameterwerten anzugeben sowie die Möglichkeit der Reduktion der Ungewissheiten zu beurteilen. Aus Sicht der Nagra ist deshalb der Kenntnisstand ausreichend, um optimierte Lagerperimeter abzugrenzen, den Einfluss von Ungewissheiten durch Darstellung alternativer Varianten zu erfassen und somit eine zuverlässige Bewertung der Standortgebiete vorzunehmen.

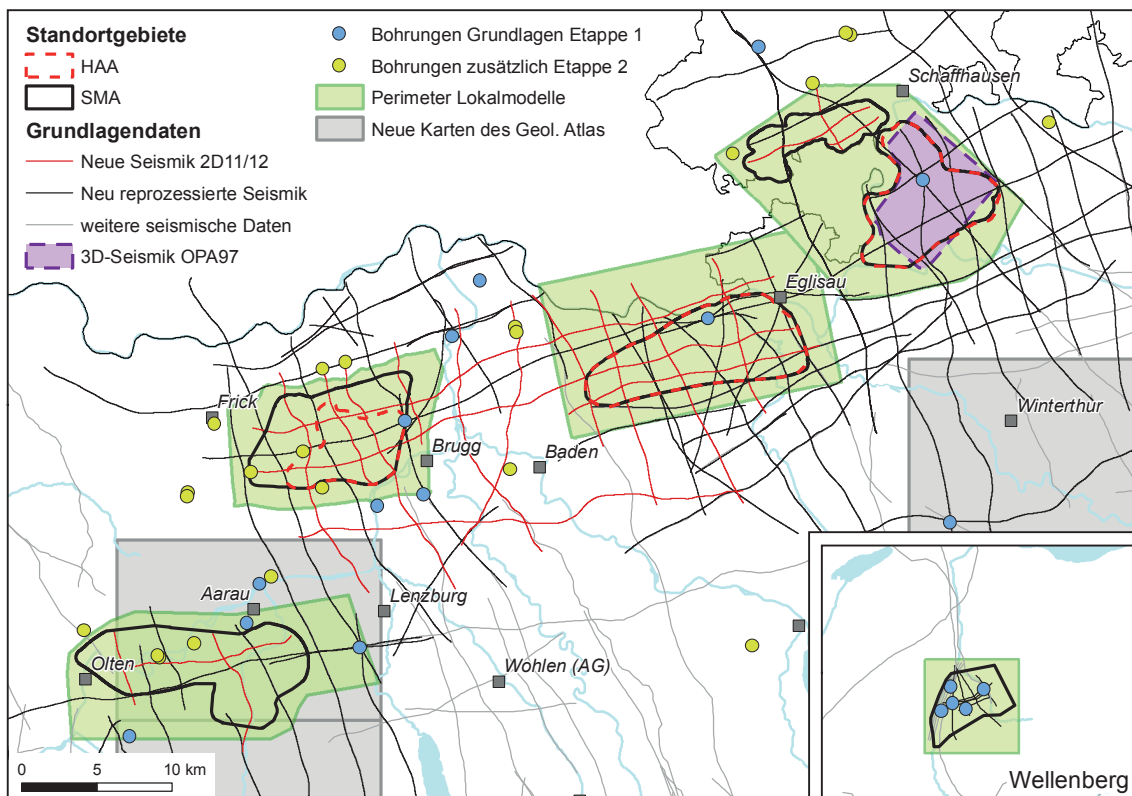


Fig. 4.1-1: Datenlage: Darstellung der bei der Erstellung der Unterlagen für SGT Etappe 1 vorhandenen Daten und der nachher erhobenen Daten (Seismik, Bohrungen (Auswahl)).

Raumwirksame Elemente zur Abgrenzung der Lagerperimeter

Nachfolgend werden die wichtigsten raumwirksamen Elemente besprochen, die für die Abgrenzung optimierter Lagerperimeter relevant sind und die teilweise auch bei der Bewertung verwendet werden¹⁰⁴. Weiter wird aufgezeigt, wie diese Elemente bei der Abgrenzung der Lagerperimeter zum Tragen kommen. Die Unterlagen zu den raumwirksamen Elementen finden sich in Nagra (2014b, Dossier II und III). Diese werden nachfolgend kurz zusammengefasst; für das detaillierte Verständnis sind die Unterlagen und Erläuterungen in den Dossiers II und III zu konsultieren.

Neben den **regionalen geologischen Elementen** (regionale Störungszonen, zu meidende tektonische Zonen gemäss Fig. 4.1-2; vgl. Nagra 2014b, Dossier II) sind für die Abgrenzung wegen Dekompaktion bzw. Erosion die minimale Tiefenlage des Wirtgesteins bezüglich verschiedener Bezugshorizonte (Terrain, lokale Erosionsbasis, Top Fels; vgl. Nagra 2014b, Dossier III) und für geotechnische Aspekte die maximale Tiefenlage der Lagerebene unter Terrain von Bedeutung¹⁰⁵.

Bezüglich der **minimalen Tiefenlage** sind verschiedene Prozesse und Phänomene zu beachten (vgl. Fig. 4.1-3), die in Nagra (2014b, Dossier III) im Detail beschrieben sind und nachfolgend kurz zusammengefasst werden. Bei den Anforderungen zur Gesteins-Dekompaktion (Indikator 'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteins-Dekompaktion') wird grundsätzlich gleich vorgegangen wie in Etappe 1. In Etappe 2 wird jedoch in den Standortgebieten in der Nordschweiz im Rahmen der Optimierung angestrebt, neben dem Wirtgestein anfänglich zusätzlich zumindest 50 m der oberen Rahmengesteine als Barriere zu nutzen; am Ende des Betrachtungszeitraums ist ein reduzierter Beitrag des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs akzeptabel. Unter Berücksichtigung der zur Vermeidung von Dekompaktionseffekten notwendigen Überdeckung der Rahmengesteine von mindestens 300 m¹⁰⁶ (vgl. Nagra 2014b, Dossier IV und VI bzw. Nagra 2008d) bedeutet dies, dass für das SMA-Lager eine Überdeckung von Top Opalinuston von mindestens 350 m vorhanden sein sollte, damit ein signifikanter Anteil der Rahmengesteine als Barriere genutzt werden kann; für das HAA-Lager ergibt sich bei einem Zuschlag von 100 m für Erosion¹⁰⁷ eine Überdeckung von 450 m. Wo möglich, wird eine grössere Überdeckung und ein grösserer Beitrag der oberen Rahmengesteine als Barriere angestrebt. Für das Standortgebiet Wellenberg wird neu eine Überdeckung von 600 m angestrebt im

¹⁰⁴ Bei den in Kap. 4 durchgeführten raumbezogenen Analysen ist zu beachten, dass bzgl. der Anwendung der Daten mit auf 50 m-Schritte gerundeten Zahlen gearbeitet wird; dies kann gegenüber den in Nagra (2014b) aufgeführten Zahlen zu kleineren Abweichungen führen, da dort teilweise mit weniger stark gerundeten Zahlen gearbeitet wurde.

Generell ist zu beachten, dass die Abgrenzung optimierter Lagerperimeter und deren Bewertung im Hinblick auf die Einengung einen "Design-Prozess" bildet und in diesem Sinn von Zielwerten ausgeht. Diese Zielwerte orientieren sich stark an der wissenschaftlichen Basis gemäss Nagra (2014b), können aber für die operative Umsetzung teilweise etwas davon abweichen.

¹⁰⁵ Bei der Lagerebene für das SMA-Lager werden in Abweichung zu Etappe 1 im Sinne der Optimierung die gleichen Vorgaben wie für das HAA-Lager verwendet (etwa mittige Anordnung im Opalinuston).

¹⁰⁶ Diese Überdeckung gilt für Schichten mit beschränktem Tonmineralgehalt (≤ 40 Gew.-%). Im Fall von tonreichen Rahmengesteinen (> 40 Gew.-%) reicht grundsätzlich eine Überdeckung von 200 m (vgl. dazu auch das Vorgehen in Etappe 1 (Nagra 2008d) sowie die Angaben in Nagra 2014b, Dossier IV und VI). Bei der Abgrenzung der Lagerperimeter sind jedoch in der Regel die Schichten mit beschränktem Tonmineralgehalt und somit die Überdeckung von 300 m massgebend.

¹⁰⁷ Der Zuschlag von 100 m deckt nicht den ganzen Betrachtungszeitraum von 1 Million Jahren ab im Gegensatz zum Wert von 125 m für die Absenkung der lokalen Erosionsbasis in 1 Million Jahre.

Vergleich zu Etappe 1 mit 400 m Überdeckung¹⁰⁸. Für diese Anforderung sind Informationen zur Tiefenlage der Wirtgesteine bzw. der Rahmengesteine unter Terrain erforderlich (vgl. dazu Fig. 4-1.4 mit den entsprechenden Angaben für die Nordschweiz¹⁰⁹).

Bei der Erosion wird gegenüber Etappe 1 differenzierter vorgegangen (vgl. Fig. 4.1-3 und Beschreibung in Nagra 2014b, Dossier III). Einerseits wird das zukünftige Einschneiden des Hauptflussnetzes betrachtet (unter Berücksichtigung möglicher Änderungen des Entwässerungsnetzes (z.B. Anbindung an ein Flusssystem mit tieferem Erosionsniveau), der Hebung und weiterer Prozesse). Hier wird von der vorsichtigen Annahme ausgegangen, dass innerhalb des Betrachtungszeitraums für das SMA-Lager (100'000 Jahre) eine Eintiefung von ca. 25 m stattfindet. Für das HAA-Lager wird für den Betrachtungszeitraum von 1 Million Jahre eine Eintiefung von 125 m angenommen¹¹⁰.

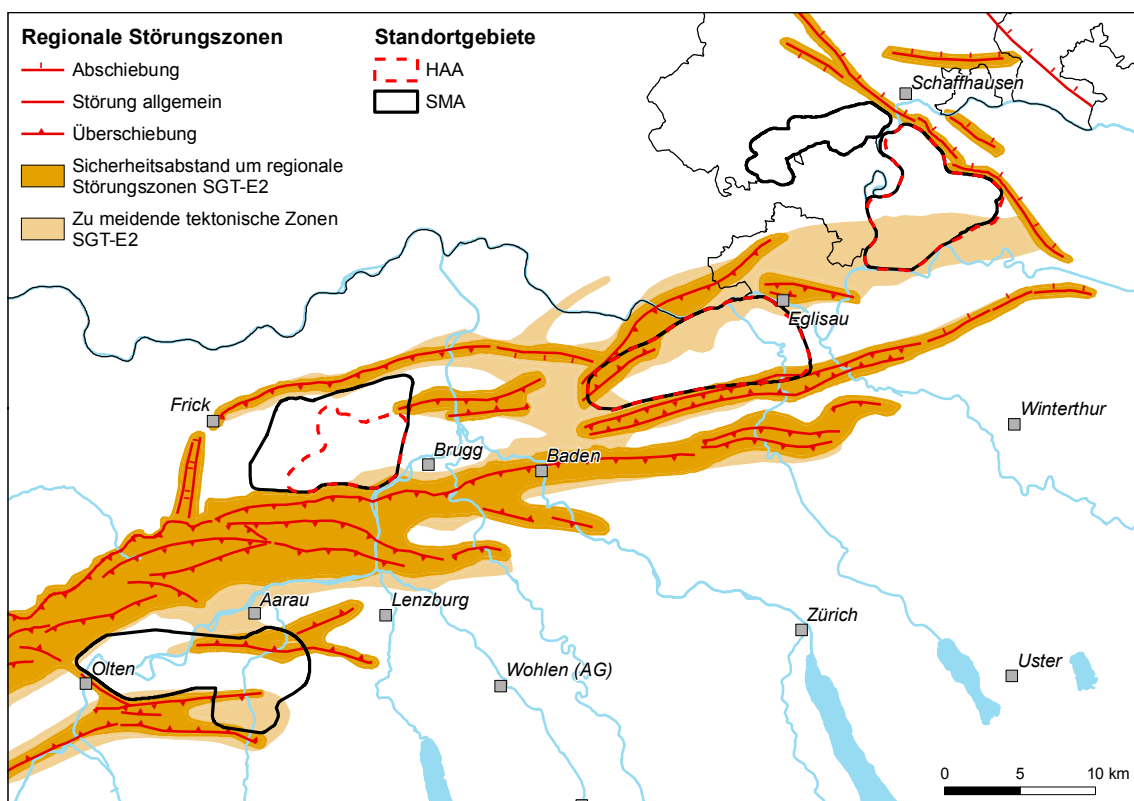


Fig. 4.1-2: Karte der regionalen tektonischen Elemente (regionale Störungszone und zu meidende tektonische Zonen) in der Nordschweiz (vgl. Nagra 2014b, Dossier II).

¹⁰⁸ Für die schwachaktiven Abfälle mit tieferen Anforderungen an die Barrierenwirkung wird eine Überdeckung von 400 m angestrebt.

¹⁰⁹ Für das Standortgebiet Wellenberg finden sich die Darstellungen zur Tiefenlage und zur Erosion in Kap. 4.2.4.

¹¹⁰ Der Extremfall für das HAA-Lager mit einer Eintiefung im Westen von rund 175 m und einer Eintiefung im Osten von ca. 200 m (vgl. Nagra 2014b, Dossier III) wird bei der Abgrenzung nicht verwendet, kommt aber bei der Bewertung zum Tragen.

Weiter ist der flächenhafte Abtrag der Topographie (Abtrag der Hochzonen) bezogen auf das Hauptflussnetz zu beachten. Für das HAA-Lager wird angenommen, dass dieser Abtrag im Betrag im Mittel etwa parallel zur Eintiefung des Hauptflussnetzes verläuft (d.h. rund 125 m in 1 Million Jahre); für das SMA-Lager wird die gleiche Annahme gemacht (d.h. rund 25 m in 100'000 Jahren), was aber mit Ausnahme der Ränder der Hochzonen als sehr pessimistisch betrachtet wird. Im Hinblick auf das Ziel, im Betrachtungszeitraum für den Opalinuston keine oder nur eine unerhebliche Wirkung der Dekompaktion als Folge des flächenhaften erosiven Abtrags auf das Wirtgestein (d.h. den Opalinuston in der Nordschweiz) zu haben, ergibt dies als Anforderung eine anfängliche Mindestüberdeckung des Top Opalinuston von 225 m für das SMA-Lager und von 325 m für das HAA-Lager, was durch die Vorgaben zur Dekompaktion bezüglich Rahmengesteine schon abdeckt ist (vgl. oben)¹¹¹.

Zusätzlich wird als möglicher Erosionsprozess in Etappe 2 neu auch die Bildung von Durchbruchsrinnen als Folge von Flussumlenkungen in Zusammenhang mit zukünftigen Vergletscherungen explizit betrachtet; dazu wird der neu eingeführte Indikator 'Tiefenlage unter lokaler Erosionsbasis im Hinblick auf die Bildung neuer Rinnen' verwendet. Dies bedeutet, dass es zwischen zwei Punkten des Hauptflussnetzes bei Vorliegen entsprechender Bedingungen (Topographie, Vergletscherung) zu einer Durchbruchsrinne kommen könnte, und damit die dazwischen liegende Erhebung bis auf das Niveau des Hauptflussnetzes abgetragen würde. Die durch das Hauptflussnetz aufgespannte Fläche wird als "lokale Erosionsbasis" bezeichnet¹¹². Bei der Bildung einer Durchbruchsrinne kommt es lokal zu einem Einschnitt bis auf das Niveau dieser Fläche. Damit kann es in kurzer Zeit zu einem weit grösseren Erosionsbetrag kommen als durch flächenhafte Erosion.

Um auch nach Bildung einer Durchbruchsrinne noch eine genügende Barrierenwirkung zu haben¹¹³, wird für das SMA-Lager im Rahmen der Optimierung angestrebt, dass der Top Opalinuston in den Standortgebieten Südranden und Jura-Südfuss mindestens 100 m unter der heutigen Erosionsbasis liegt (25 m Absenkung der lokalen Erosionsbasis und eine Reserve von 75 m Überdeckung des Top Opalinuston für eine glaziale Übertiefung) und in den Standortgebieten Zürich Nordost und Nördlich Lägern 150 m unter der heutigen Erosionsbasis (25 m Absenkung der lokalen Erosionsbasis und eine Reserve von 125 m Überdeckung des Top Opalinuston für eine glaziale Übertiefung). Für das Standortgebiet Jura Ost entfällt diese Anforderung für das SMA-Lager, da dort im Betrachtungszeitraum von 100'000 Jahren die Bildung einer Durchbruchsrinne ausgeschlossen werden kann (vgl. Nagra 2014b, Dossier III)¹¹⁴.

Für das HAA-Lager wird wegen der Unterschiede in der Intensität der erwarteten zukünftigen Vergletscherung zwischen den Standortgebieten Zürich Nordost und Nördlich Lägern und dem Standortgebiet Jura Ost unterschieden: Für die Standortgebiete Zürich Nordost und Nördlich Lägern wird verlangt, dass der Top Opalinuston rund 350 m unter der heutigen Erosionsbasis

¹¹¹ Dies bedeutet, dass mit dem Indikator 'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteins-Dekompaktion' auch der in Etappe 1 verwendete Indikator 'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf flächenhafte Erosion' unter Berücksichtigung der jetzt verwendeten Abtragsraten abgedeckt ist; dieser in Etappe 1 verwendete Indikator wird in Etappe 2 nicht mehr verwendet; an seine Stelle tritt der Indikator 'Tiefenlage unter lokaler Erosionsbasis im Hinblick auf die Bildung neuer Rinnen' (vgl. nächster Abschnitt).

¹¹² Streng genommen geht es dabei nicht um das heutige Hauptflussnetz, sondern um das Paläoflussnetz (vgl. Nagra 2014b, Dossier III).

¹¹³ Beispielsweise zur Gewährleistung einer genügenden Überdeckung im Falle einer moderaten glazialen Übertiefung einer Durchbruchsrinne.

¹¹⁴ In der Nordschweiz besteht für die Standortgebiete Südranden, Zürich Nordost, Nördlich Lägern in den nächsten 100'000 Jahren die Möglichkeit einer zumindest partiellen Vergletscherung, gemäss neuesten Publikationen frühestens nach 60'000 Jahren (vgl. Nagra 2014b, Dossier III). Im Falle der Standortgebiete Jura Ost und Jura-Südfuss ist die Wahrscheinlichkeit viel geringer.

liegt (pessimistische Annahme einer Absenkung der Erosionsbasis von 200 m und rund 150 m Überdeckung des Top Opalinuston für eine glaziale Übertiefung bzw. eine realistische Absenkung der Erosionsbasis von 125 m und eine Reserve von rund 225 m Überdeckung für eine glaziale Übertiefung) verlangt; für das Standortgebiet Jura Ost soll der Top Opalinuston rund 200 m unter der heutigen Erosionsbasis liegen (pessimistische Annahme einer Absenkung der Erosionsbasis von 175 m und eine Reserve von 25 m Überdeckung für eine glaziale Übertiefung bzw. eine realistische Absenkung der Erosionsbasis von 125 m und eine Reserve von 75 m Überdeckung für eine glaziale Übertiefung). Damit würde sichergestellt, dass auch am Ende des Betrachtungszeitraums eine für das jeweilige Standortgebiet angemessene glaziale Übertiefung möglich ist, bis Top Opalinuston erreicht wird¹¹⁵.

Die Fläche der lokalen Erosionsbasis als wichtige Bezugsgrösse für die Erosion ist für die Nordschweiz in Fig. 4.1-5 dargestellt; die Tiefe des Top Opalinuston unter der heutigen Erosionsbasis in Fig. 4.1-6. Die standortspezifischen Voraussetzungen zur Bildung einer Durchbruchsrinne (Topographie, Vergletscherung)¹¹⁶ sowie weitere Unterlagen zu den Durchbruchsrinnen und den dazugehörigen Prozessen und Parametern finden sich in Nagra (2014b, Dossier III) sowie in den dort aufgeführten Referenzberichten.

Schliesslich ist wie in Etappe 1 die Vertiefung bestehender übertiefer Rinnen als Folge der glazialen Tiefenerosion zu betrachten, wobei in Etappe 2 bei der Abgrenzung der Lagerperimeter auch eine Verbreiterung der Rinnen unterstellt wird, vgl. Nagra (2014b, Dossier III). Dazu wird die Tiefe des Top Opalinuston unter Top Fels benötigt (vgl. Fig. 4.1-7). Die Möglichkeit der Bildung neuer Rinnen (inkl. Vertiefung von neu gebildeten Durchbruchsrinnen) wird im Rahmen der Bildung neuer Rinnen behandelt (vgl. Abschnitt oben).

Die **maximale Tiefenlage** der Lagerebene (mittig im Opalinuston) ist massgebend für die Beurteilung der geotechnischen Bedingungen und die damit verbundene mögliche Schädigung der Barrieren (Störung bzw. Schädigung des Wirtgesteins in Umgebung der Lagerkammern; Beeinträchtigung der technischen Barrieren im Falle von grossen Mengen an für die technischen Barrieren ungünstigen Materialien für den Ausbau der Lagerkammern). Im Rahmen der Abgrenzung der Lagerperimeter wird angestrebt, die Tiefe der Lagerebene auf 600 m u.T. (SMA-Lager) bzw. 700 m u.T. (HAA-Lager) zu beschränken (vgl. Nagra 2014f). Die Karte mit der Tiefe der Lagerebene unter Terrain ist in Fig. 4.1-8 abgebildet.

Das Ziel bei der Abgrenzung optimierter Lagerperimeter ist es, ein **genügendes Platzangebot** zur Anordnung der untertägigen Lagerbauten für das umhüllende Abfallinventar bereit zu stellen. Dieses umhüllende Abfallinventar (200'000 m³ SMA, 7'500 m³ LMA und 20'000 m³ BE/HAA; vgl. Nagra 2008b) wurde in Etappe 1 verwendet für die Festlegung der geologischen Standortgebiete und ist Bestandteil der vom Bundesrat genehmigten Unterlagen. Der erforderliche Platzbedarf leitet sich ab aus dem Platzbedarf für ideale Bedingungen (ideale Geometrie ohne anordnungsbestimmende geologische Elemente und SMA-Kavernen der Grösse K09) und den erforderlichen Flächenzuschlägen zur Berücksichtigung von anordnungsbestimmenden geologischen Elementen (Aufteilung der untertägigen Lagerbauten auf mehrere voneinander durch anordnungsbestimmende geologische Elemente abgetrennte Lagerfelder), für ungünstige Geometrie der Lagerfelder und für Zuschläge aus geomechanischen Gründen (Zuschläge für die Abgrenzung der Lagerfelder und für kleinere Kavernenquerschnitte für das SMA-Lager sowie

¹¹⁵ Wird die Anforderung bzgl. Tiefe unter lokaler Erosionsbasis erfüllt, führt dies für den entsprechenden Lagerperimeter zu einer *günstigen* Bewertung (vgl. Kap. 4.4).

¹¹⁶ Voraussetzung für die Bildung einer Durchbruchsrinne ist eine starke Vorlandvergletscherung, bei welcher das Wasser unter Berücksichtigung der Topographie lateral ausbrechen kann und sich einen neuen Weg bahnt, indem es sich an der tiefsten Stelle der begrenzenden Hügelkette durch Erosion in den Fels einfrisst.

für nicht nutzbare (Teile der) Lagerkammern wegen übermässiger Ausbrüche). Unter Berücksichtigung der erwarteten Dichte an anordnungsbestimmenden geologischen Elementen und der erwarteten geotechnischen Bedingungen (Tiefe der Lagerebene, tektonische Überprägung) und der Mächtigkeit und der Neigung des Opalinustons ergeben sich als Richtwerte für den Platzbedarf folgende Werte (vgl. Nagra 2014f): Südanden: 3 – 4 km², Zürich Nordost: ca. 6 km² (HAA-Lager) und ca. 3 km² (SMA-Lager), Nördlich Lägern: 8 – 12 km² (HAA-Lager) und 4 – 5 km² (SMA-Lager), Jura Ost: 6 – 9 km² (HAA-Lager) und 3 – 4 km² (SMA-Lager); Jura-Südfuss: 6 – 8 km², Wellenberg: ca. 3 km² (auf mehreren Lagerebenen).

Bezüglich der Tiefenlage des Opalinustons gibt es Ungewissheiten¹¹⁷, die bei der Abgrenzung der Lagerperimeter berücksichtigt werden, um deren Einfluss auf die Entscheidungsfindung zu untersuchen. Die diesbezüglichen Karten sind in Fig. 4.1-9 und 4.1-10 dargestellt. Für diese Ungewissheiten werden grosszügige Werte eingesetzt (grosszügige Erhöhung bzw. Vertiefung der Tiefenlage). Damit wird sichergestellt, dass bei der Abgrenzung für alternative Tiefenlagen auch Lagerperimeter resultieren, die bezüglich Tiefenlage eher zu günstig bewertet werden. Das heisst, dass die zugehörigen Standortgebiete, welche sich bezüglich Tiefenlage in einem kritischen Bereich befinden, im entsprechenden Bewertungsfall eher zu günstig bewertet und somit nicht zurückgestellt werden. Dieser Ansatz ist also vorsichtig bezüglich frühzeitigen Zurückstellens.

Bewertung der abgegrenzten Lagerperimeter

Für die Bewertung der abgegrenzten Lagerperimeter in Kap. 4.4 sind neben den für die Abgrenzung betrachteten Unterlagen weitere Informationen notwendig. Dies betrifft die Wirtgesteins-eigenschaften, die grösstenteils in Kap. 3.3 diskutiert wurden. Zusätzlich sind bezüglich Beständigkeit der Standort- und Gesteins-eigenschaften sowie bezüglich Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen die Modellvorstellungen zur Langzeitentwicklung, die Seismizität sowie verschiedene Aspekte bezüglich Nutzungskonflikten zu bewerten. Weiter sind auch die Bedingungen für den Zugang nach Untertag anzusprechen, wo auch die Resultate der bautechnischen Risikoanalysen (Nagra 2014c) berücksichtigt werden. Das detaillierte Vorgehen und die dabei verwendeten Unterlagen werden in Kap. 4.4 erläutert.

¹¹⁷ Die Ungewissheiten in der Tiefenlage der verschiedenen Horizonte werden in Nagra (2014b, Dossier II) behandelt.

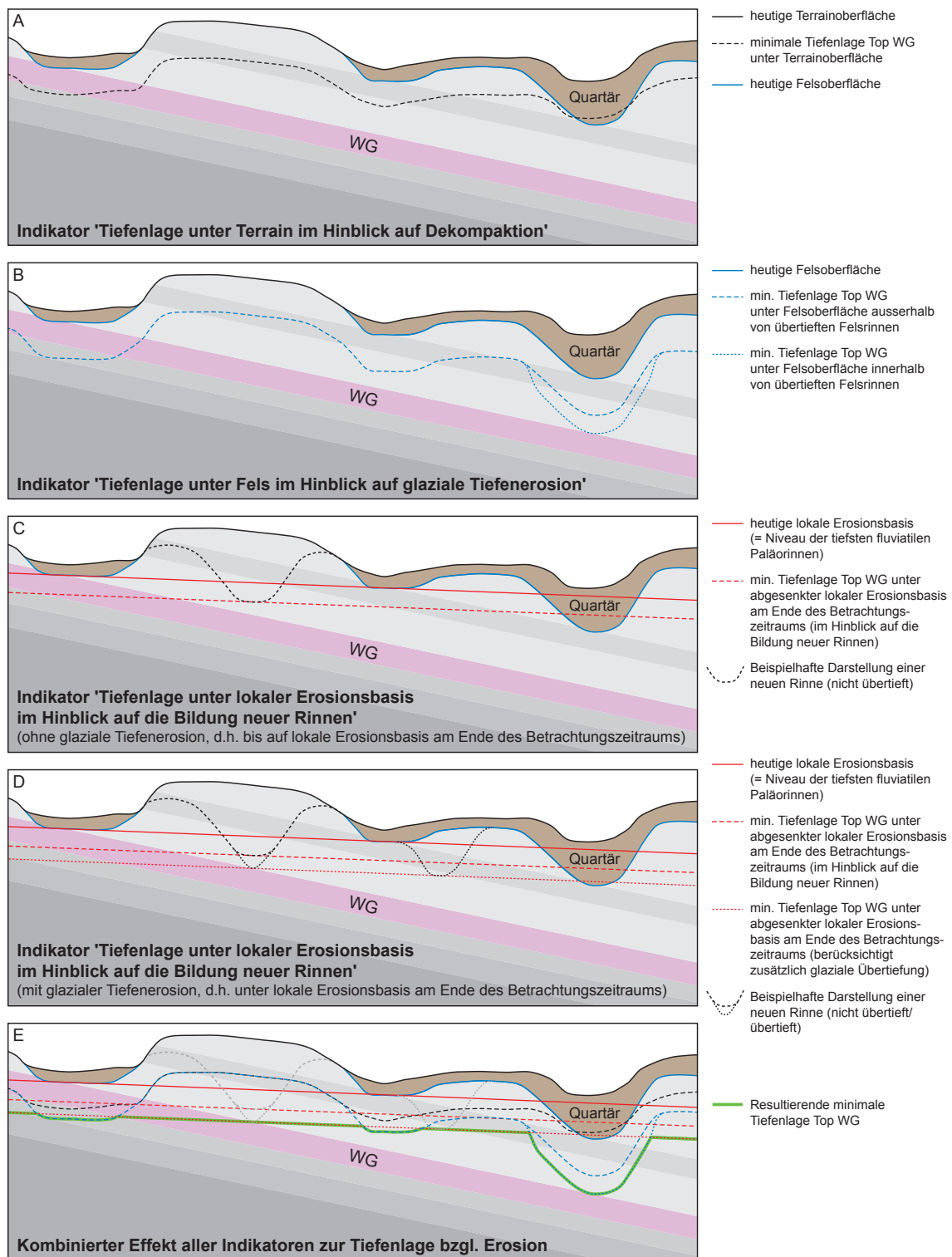


Fig. 4.1-3: Die bei der Abgrenzung optimierter Lagerperimeter und ihrer Bewertung betrachteten Erosionsmechanismen (Nagra 2014b, Dossier III).

Visualisierung der für die Erosion relevanten Aspekte und der dazu gehörenden Bezugshorizonte zur Beurteilung der minimalen Tiefenlage des Wirtgesteins.

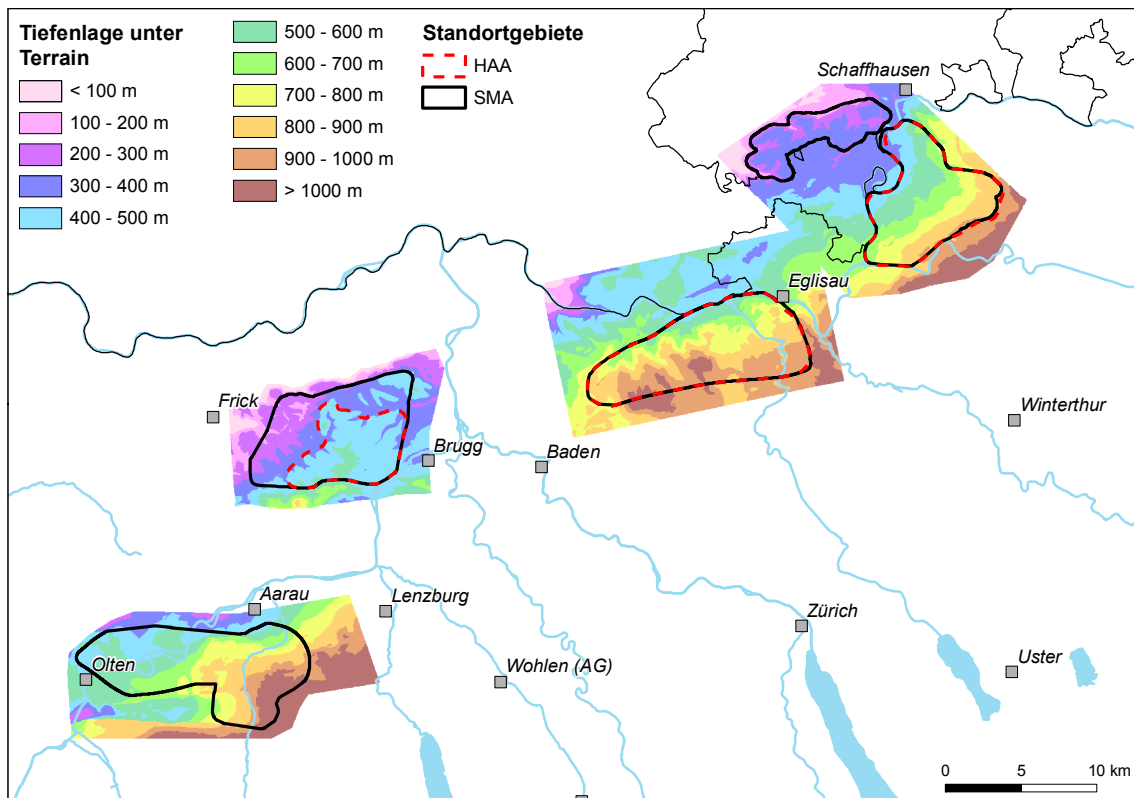


Fig. 4.1-4: Karte der Tiefenlage von Top Opalinuston (Basis OPA minus 100 m) unter Terrain in der Nordschweiz (Nagra 2014b, Dossier III).

Diese Karte ist massgebend für die Dekompaktion und deckt auch die flächenhafte Erosion ab.

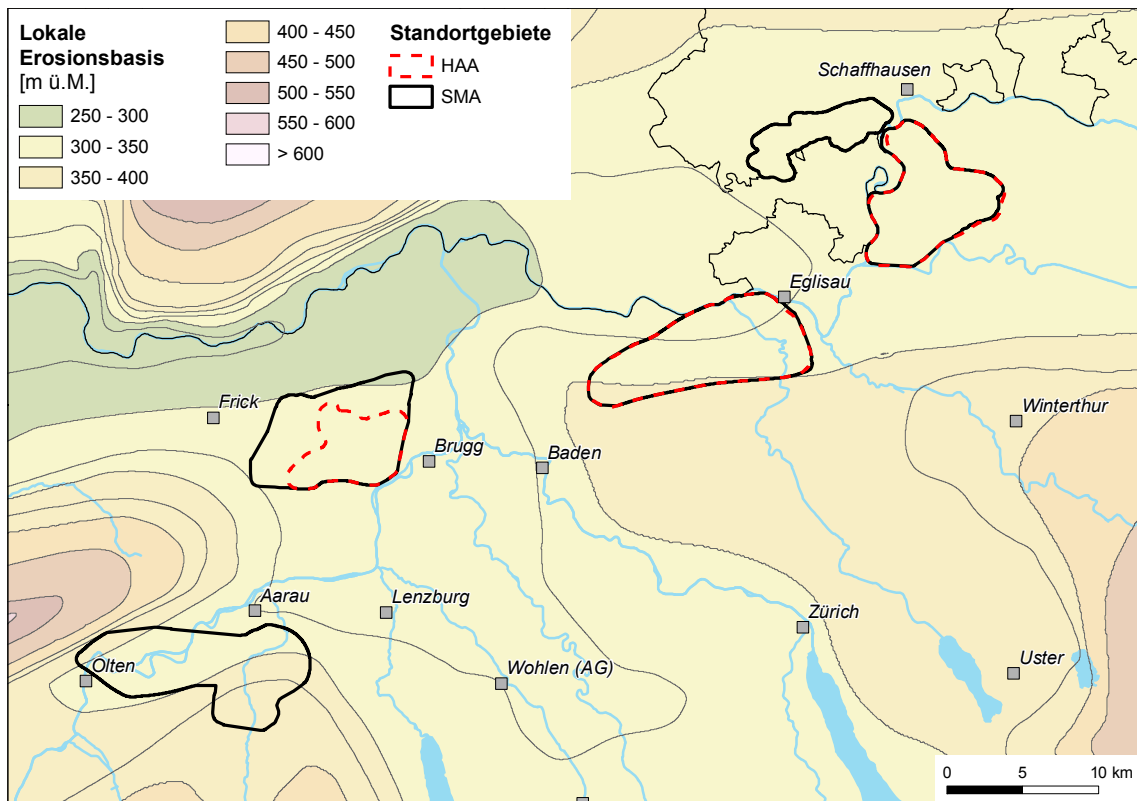


Fig. 4.1-5: Karte der lokalen Erosionsbasis in der Nordschweiz (Nagra 2014b, Dossier III).

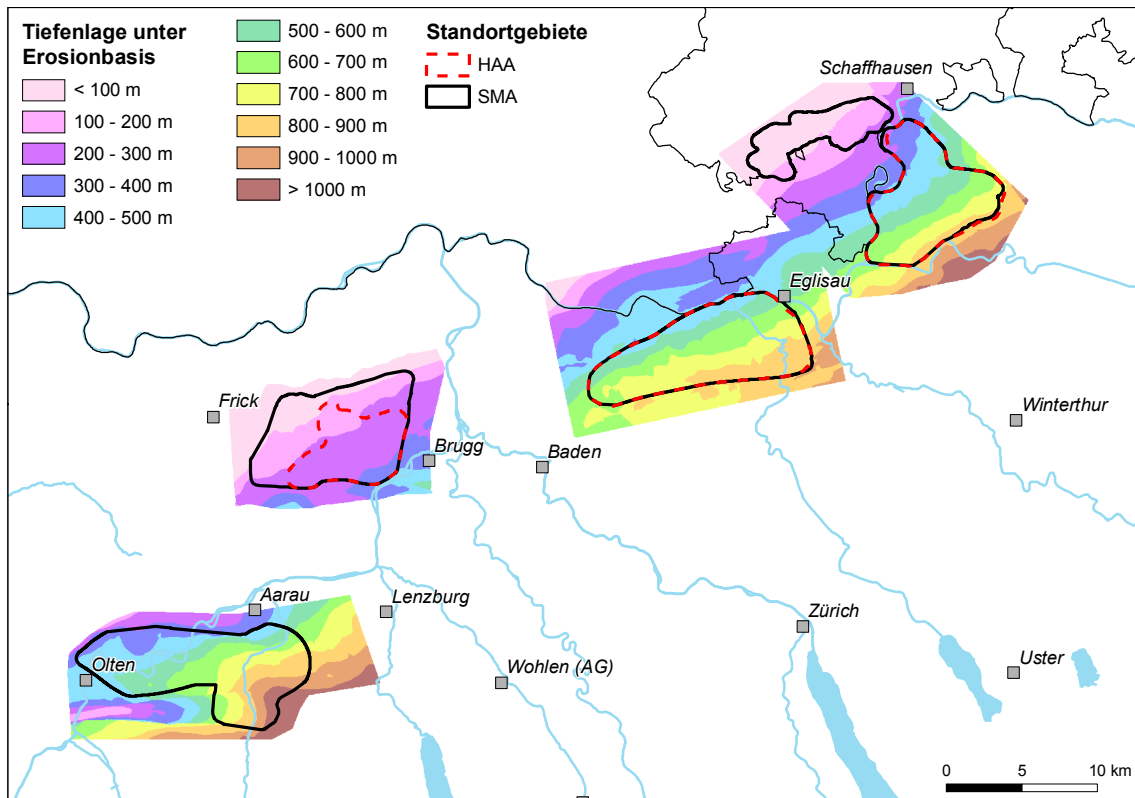


Fig. 4.1-6: Karte der Tiefenlage von Top Opalinuston (Basis OPA minus 100 m) unter lokaler Erosionsbasis in der Nordschweiz (Nagra 2014b, Dossier III).

Diese Karte ist massgebend für Gebiete, in denen es durch Flussumlenkungen zu Durchbruchsrinnen kommen kann. Diese können bei entsprechenden Bedingungen durch glaziale Tiefenerosion zu unter die Erosionsbasis reichenden übertieften Rinnen werden.

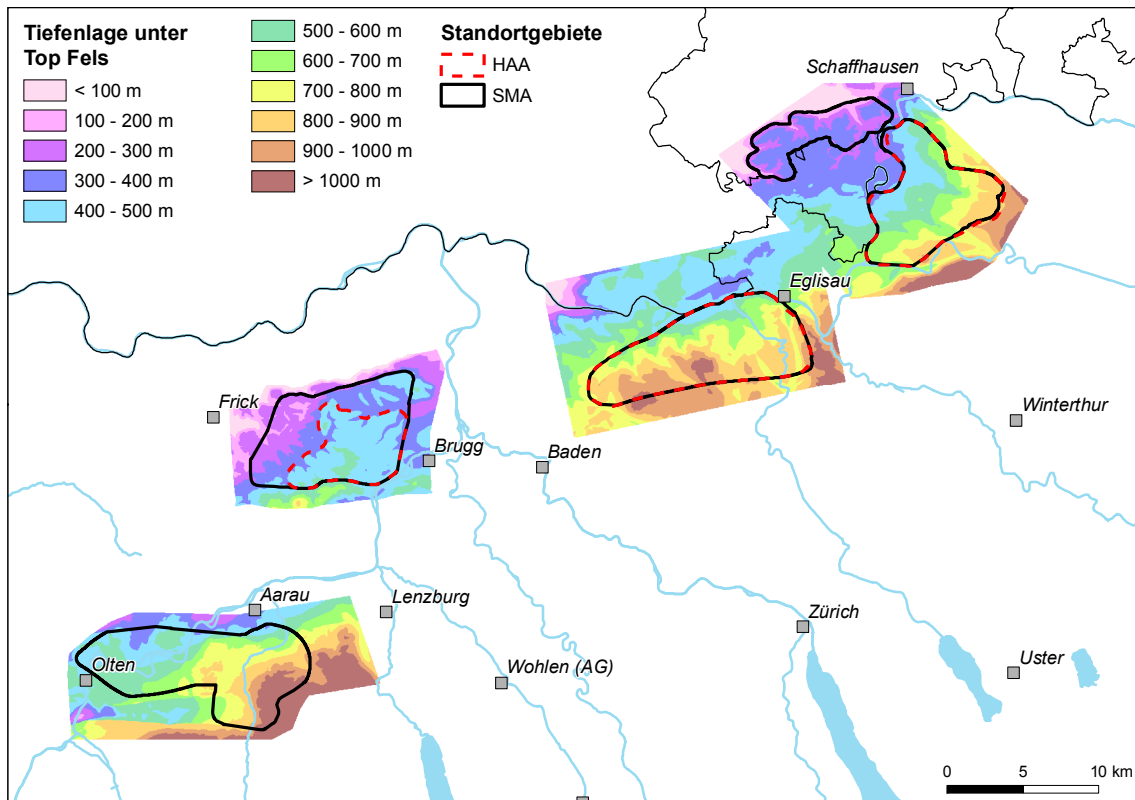


Fig. 4.1-7: Karte der Tiefenlage von Top Opalinuston (Basis OPA minus 100 m) unter Top Fels in der Nordschweiz (Nagra 2014b, Dossier III).

Diese Karte ist massgebend für die glaziale Tiefenerosion (Übertiefung bzw. Verbreiterung bestehender übertiefer Felsrinnen).

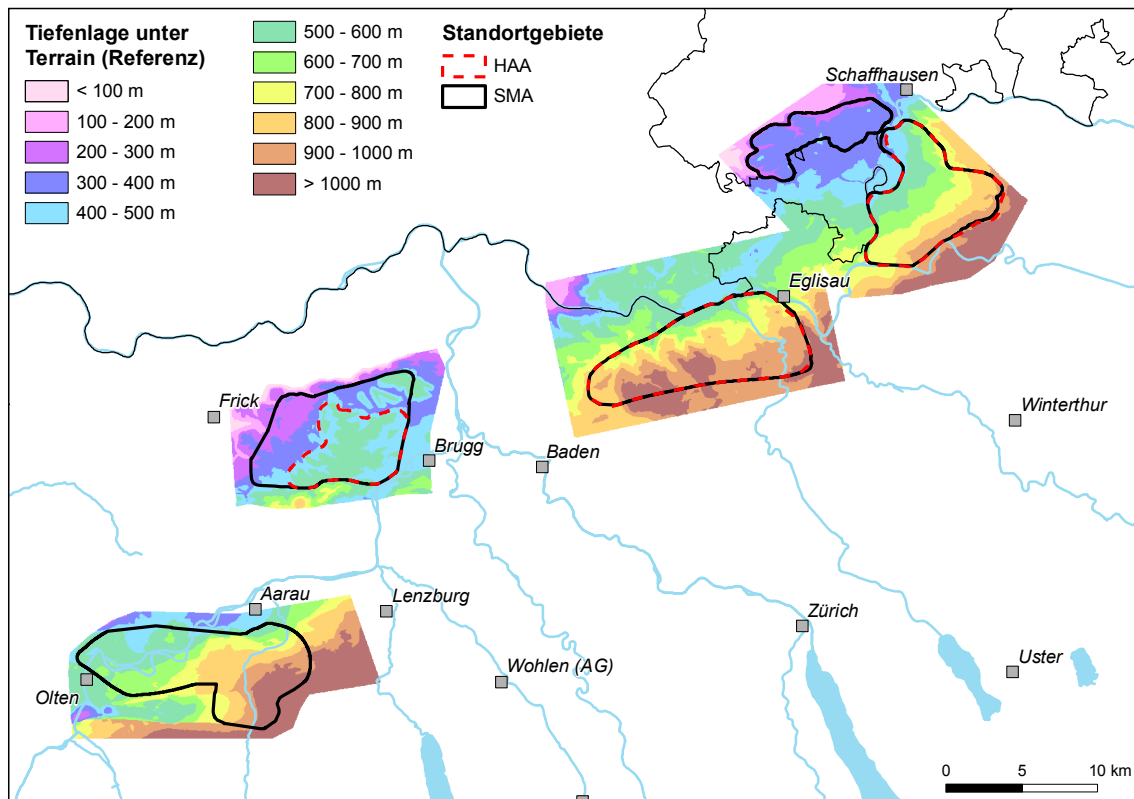


Fig. 4.1-8: Karte der Tiefenlage der Lagerebene unter Terrain in der Nordschweiz – Referenzfall.

Diese Karte ist massgebend für die Beurteilung der geotechnischen Bedingungen auf Lagerebene und die damit angestrebte Beschränkung der Schädigung der Barrieren.

Die Karte basiert auf Unterlagen aus Nagra (2014b, Dossier II).

Diese Karte bildet den Referenzfall bezüglich Tiefenlage des Wirtgesteins ab (angefügtes Kürzel "...-r").

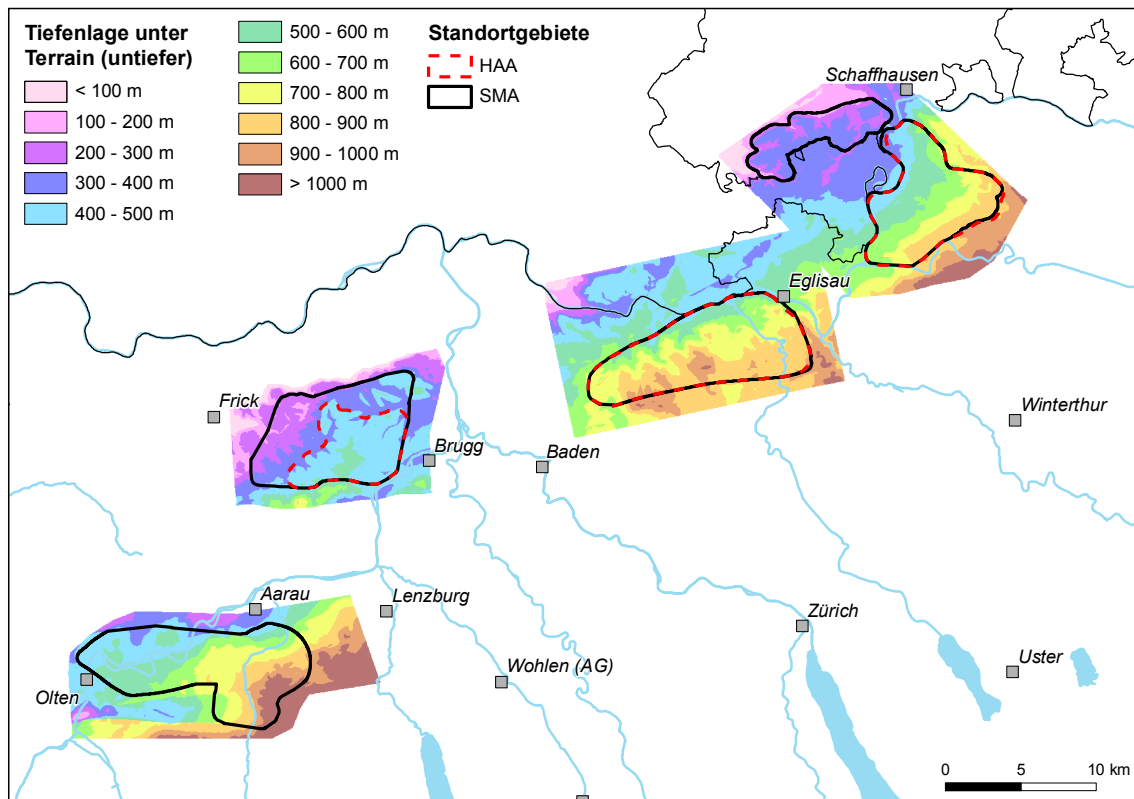


Fig. 4.1-9: Karte der Tiefenlage der Lagerebene unter Terrain in der Nordschweiz – untiefere Lage des Wirtgesteins.

Zur Berücksichtigung der Ungewissheiten in Zusammenhang mit der Tiefenlage des Wirtgesteins wird neben dem Referenzfall (angefügtes Kürzel "...-r") auch eine untiefere Tiefenlage des Wirtgesteins berücksichtigt (angefügtes Kürzel "...-u"). Die Karte für die Lagerebene ist massgebend für die Beurteilung der geotechnischen Bedingungen auf Lagerebene und die damit angestrebte Beschränkung der Schädigung der Barrieren.

Die Angaben zu den Ungewissheiten in der Tiefenlage des Opalinuston und zur Ableitung dieser Karte stammen aus Nagra (2014b, Dossier II).

Karten mit untieferer Lage des Wirtgesteins wurden für alle Bezugshorizonte hergestellt.

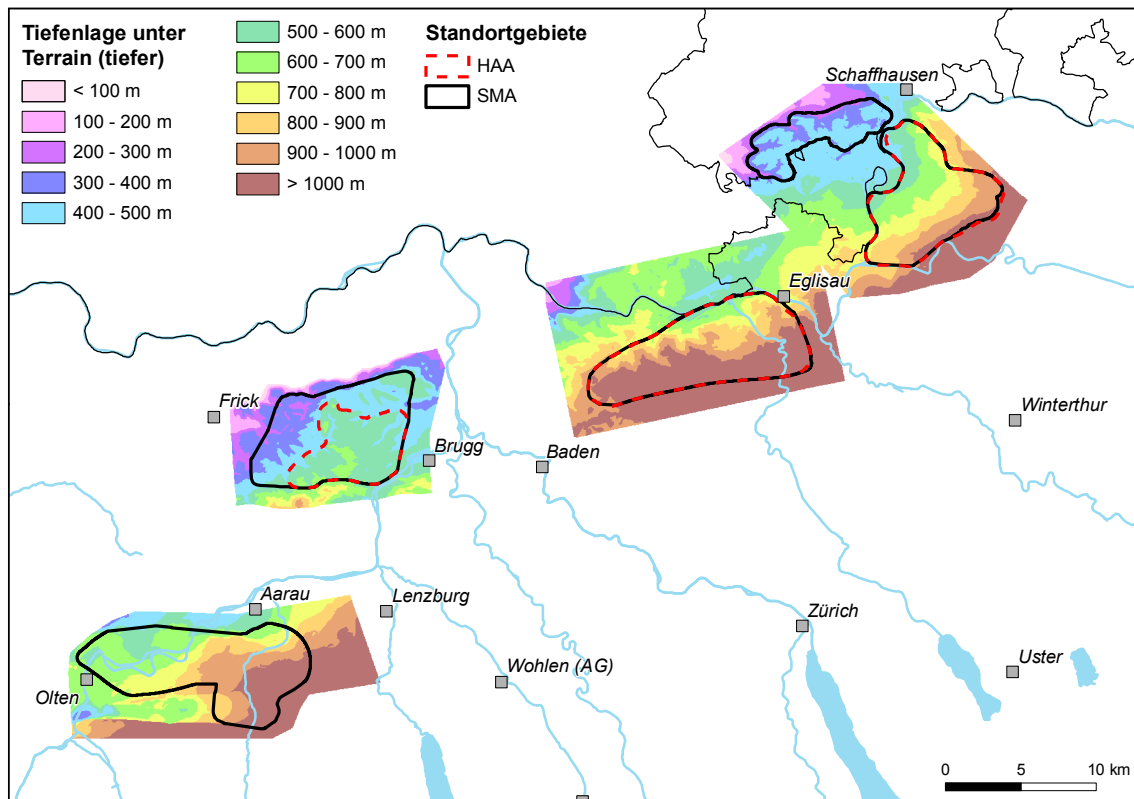


Fig. 4.1-10: Karte der Tiefenlage der Lagerebene unter Terrain in der Nordschweiz – tiefere Lage des Wirtgesteins.

Zur Berücksichtigung der Ungewissheiten in Zusammenhang mit der Tiefenlage des Wirtgesteins wird neben dem Referenzfall (angefügtes Kürzel "...-r") auch eine tiefere Lage des Wirtgesteins berücksichtigt (angefügtes Kürzel "...-t"). Die Karte für die Lagerebene ist massgebend für die Beurteilung der geotechnischen Bedingungen auf Lagerebene und die damit angestrebte Beschränkung der Schädigung der Barrieren.

Die Angaben zu den Ungewissheiten in der Tiefenlage des Opalinuston und zur Ableitung dieser Karte stammen aus Nagra (2014b, Dossier II).

Karten mit tieferer Lage des Wirtgesteins wurden für alle Bezugshorizonte hergestellt.

4.2 Abgrenzung von untertägigen Lagerperimetern in den geologischen Standortgebieten

4.2.1 Vorgehen und verwendete Grundlagen

In diesem Kapitel werden die optimierten Lagerperimeter (massgebender Lagerperimeter für die Einengung; kurz: mLE) und zusätzlich alternative optimierte Lagerperimeter abgegrenzt. Die massgebenden Lagerperimeter bilden die Basis für die anschliessenden Bewertungen. Mit den alternativen Lagerperimetern wird geprüft, wie sensitiv die Abgrenzung auf alternative Annahmen und Ungewissheiten reagiert. Die qualitative Bewertung der optimierten Lagerperimeter und der alternativen Lagerperimeter anhand der 13 Kriterien des Sachplans erfolgt in Kap. 4.4.

Um den Text lesbar zu halten, ist der grösste Teil der Figuren mit den abgegrenzten Lagerperimetern in Anhang B aufgeführt. Eine tabellarische Zusammenstellung der abgegrenzten Lagerperimeter findet sich in Tab. 4.2-3 und in Tab. B-1 (im Anhang).

Wie in Kap. 4.1 diskutiert, wird die Abgrenzung in zwei Teilschritten durchgeführt: In Teilschritt 1 (Kap. 4.2.2) werden Lagerperimeter anhand der Mindestanforderungen (MA) und verschärften Anforderungen (VA) aus Etappe 1 abgegrenzt¹¹⁸; in Teilschritt 2 (Kap. 4.2.3) wird dann die Abgrenzung optimiert. Diese optimierten Lagerperimeter werden in einem letzten Schritt mit Expertenwissen geprüft und bei Bedarf noch spezifisch bezüglich raumwirksamer Elemente, die nicht systematisch im GIS enthalten sind, angepasst. Dies betrifft z.B. detaillierte geologische Informationen oder spezifische Infrastrukturanlagen an der Oberfläche. Bei grossen Lagerperimetern wird unabhängig vom Vorhandensein von raumwirksamen Elementen modellhaft aufgezeigt, wie diese genutzt werden könnten (z.B. im Hinblick auf ein Kombilager).

In Teilschritt 2 werden neben den massgebenden Lagerperimetern für die Einengung auch alternative Lagerperimeter abgegrenzt. Mit diesen alternativen Lagerperimetern wird untersucht, welchen Einfluss alternative Annahmen bezüglich konzeptioneller geologischer Ungewissheiten (Bildung Durchbruchsrinnen) und alternative Optimierungsanforderungen auf die Grösse und die Eigenschaften der Lagerperimeter haben und wie gross die Auswirkungen der Ungewissheiten in der Tiefenlage des Wirtgesteins auf die abgegrenzten Lagerperimeter sind¹¹⁹.

Auch wenn das Vorgehen beim Standortgebiet Wellenberg grundsätzlich gleich ist wie bei den Standortgebieten in der Nordschweiz, ist das Vorgehen im Detail wegen der unterschiedlichen geometrischen Bedingungen etwas anders. Deshalb wird die Abgrenzung der Lagerperimeter für das Standortgebiet Wellenberg (inkl. Darstellung der verwendeten Unterlagen) separat in Kap. 4.2.4 abgehandelt.

¹¹⁸ In Etappe 2 wird der in Etappe 1 zur Abgrenzung verwendete Indikator 'Diffus gestörte Zonen' nicht mehr verwendet und kommt deshalb hier nicht zur Anwendung. Als Ergänzung zu den nachfolgend im Text gezeigten Figuren sind im Anhang B für jedes Standortgebiet *i* Lagerperimeter dargestellt, wo für Teilschritt 1 zusätzlich die 'zu meidenden tektonischen Zonen' zur Abgrenzung verwendet werden (Fig. B.i-2).

Weiter werden bei der Anwendung der Mindestanforderungen bzw. verschärften Anforderungen für die glaziale Tiefenerosion glazial übertiefte Felsrinnen neu definiert als quartäre Übertiefungen von mehr als 50 m unter Erosionsbasis inkl. eines seitlichen Randstreifens von 200 m. Damit wird auch ein Hinweis des ENSI bzw. eines seiner Experten zu Etappe 1 berücksichtigt.

Schliesslich werden in Etappe 2 die Anforderungen an die Breite der nutzbaren Flächen für die Lagerung gelockert. Neu wird für das SMA-Lager 0.7 km (Etappe 1: 1 km) und für das HAA-Lager 1.0 km (Etappe 1: 1.5 km) verwendet, um eine bessere räumliche Nutzung der Standortgebiete zu ermöglichen.

¹¹⁹ Für die Tiefenlage des Wirtgesteins werden grosszügige Abschätzungen bzgl. Ungewissheiten verwendet. Dies stellt sicher, dass Standortgebiete bei Ungewissheiten in der Tiefenlage diesbezüglich nicht frühzeitig zurückgestellt werden.

Für die Abgrenzung der Lagerperimeter kommen raumwirksame Unterlagen zur Anwendung, die in Kap. 4.1 kurz diskutiert wurden und die im Detail in Nagra (2014b, Dossiers II und III) beschrieben sind.

4.2.2 Lagerperimeter vor der Optimierung, Grobcharakterisierung der Lagerperimeter sowie Festlegung der Optimierungsstrategie

Abgrenzung von Lagerperimetern mit den Mindestanforderungen und verschärften Anforderungen gemäss Etappe 1 (Teilschritt 1)

Entsprechend den Vorgaben des ENSI (2013b)¹²⁰ soll sichergestellt werden, dass die Lagerperimeter die Anforderungen gemäss Etappe 1 erfüllen. Diese Anforderungen sind in Anhang 1 von Nagra (2008d) aufgeführt. Dies wird mit Teilschritt 1 sichergestellt, wo Lagerperimeter mit den Mindestanforderungen und verschärften Anforderungen gemäss Etappe 1 abgegrenzt werden; diese Lagerperimeter bilden den Ausgangspunkt für die Optimierung. Die Lagerperimeter gemäss Teilschritt 1 sind in Fig. 4.2-1 bis 4.2-8 dargestellt. Gegenüber Etappe 1 ergeben sich bezüglich der geologischen Unterlagen folgende Abweichungen: Im Standortgebiet Südranden wird durch die im Rahmen der 2D-Seismik erhaltete Neuhauserwald-Rinne der östliche Teil des Standortgebiets verkleinert bzw. abgetrennt¹²¹. In den Standortgebieten Nördlich Lägern und Südranden (und in weniger starkem Umfang auch in den anderen Standortgebieten, vgl. Nagra 2014b, Dossier II) hat die Analyse der Seismik zu deutlichen Änderungen in der Tiefenlage des Wirtgesteins geführt¹²², was dort zu einer Verkleinerung der nutzbaren Fläche führt (das Wirtgestein liegt im Standortgebiet Nördlich Lägern tiefer und im Standortgebiet Südranden¹²³ höher im Vergleich zu den Unterlagen in Etappe 1). Insgesamt zeigt sich für alle geologischen Standortgebiete, dass diese in Etappe 1 genügend gross ausgeschieden wurden¹²⁴.

¹²⁰ Dabei handelt es sich um einen Hinweis der KNS und der AG SiKa/KES.

¹²¹ Würden die Anforderungen gemäss Etappe 1 strikt umgesetzt, würde die Rinne das ganze Standortgebiet durchschneiden; dies ist aber unter Beachtung der Gegebenheiten nicht gerechtfertigt.

¹²² Die Änderung liegt im Bereich von rund 50 und 100 m, vgl. Nagra (2014b, Dossier II).

¹²³ Die jetzt verwendete Tiefenlage des Wirtgesteins im Standortgebiet Südranden liegt tendenziell immer noch zu tief.

¹²⁴ In Etappe 1 wurden für die Abgrenzung der geologischen Standortgebiete die Begrenzungen der bevorzugten Bereiche erweitert, um vorhandene Ungewissheiten in den räumlichen Informationen abzudecken.

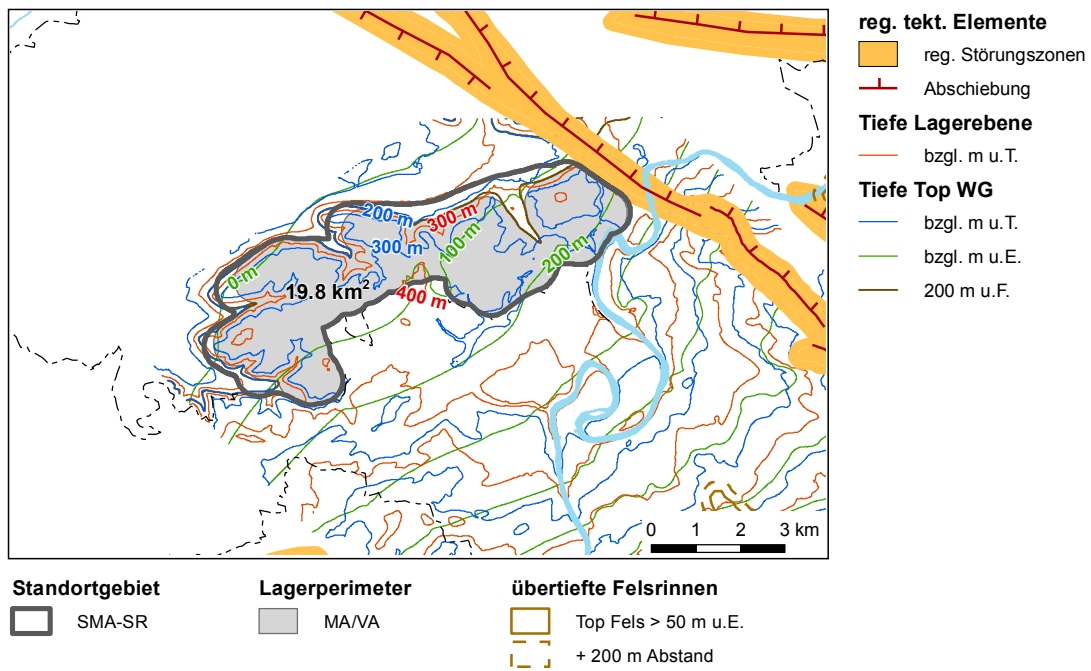


Fig. 4.2-1: Lagerperimeter für das SMA-Lager im geologischen Standortgebiet Südranden (SR): Lagerperimeter vor der Optimierung (Resultat von Teilschritt 1).

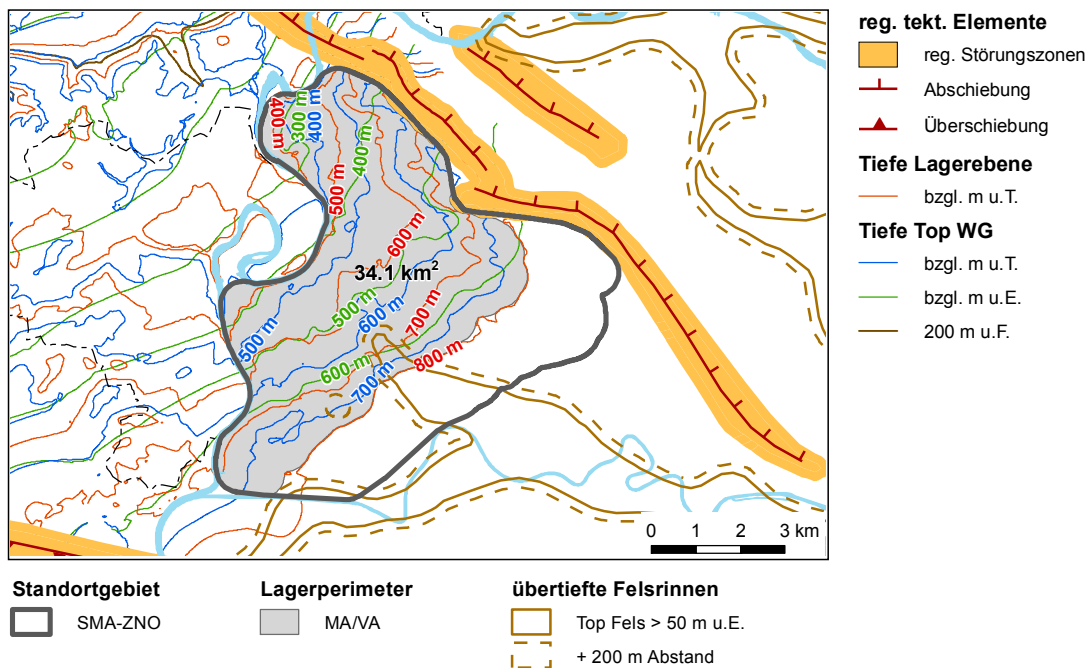


Fig. 4.2-2: Lagerperimeter für das SMA-Lager im geologischen Standortgebiet Zürich Nordost (ZNO): Lagerperimeter vor der Optimierung (Resultat von Teilschritt 1).

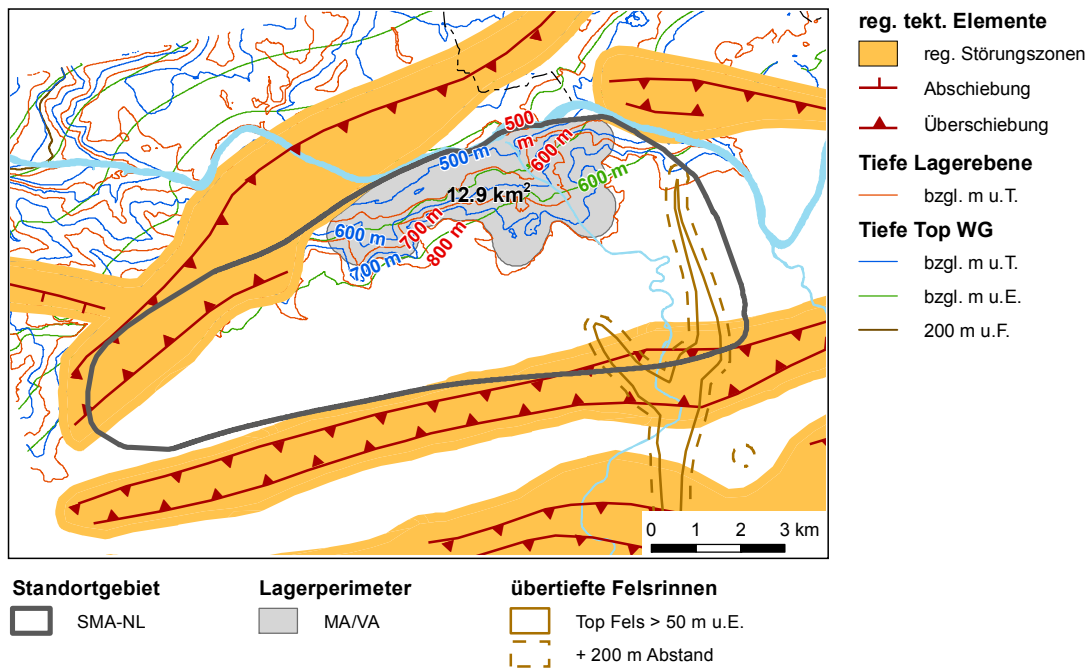


Fig. 4.2-3: Lagerperimeter für das SMA-Lager im geologischen Standortgebiet Nördlich Lägern (NL): Lagerperimeter vor der Optimierung (Resultat von Teilschritt 1).

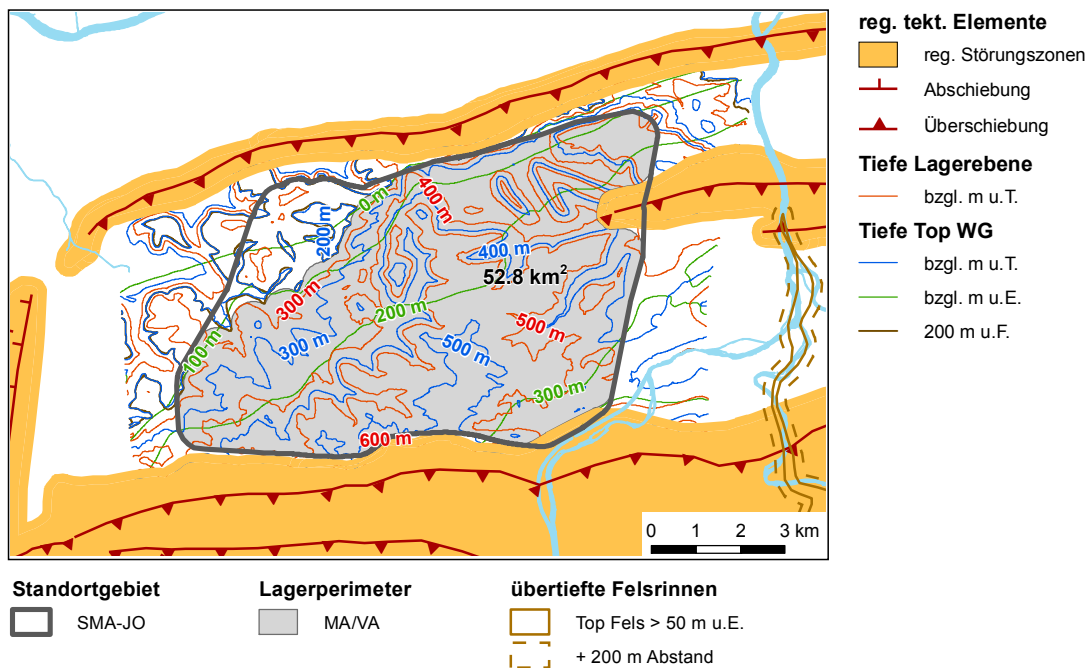


Fig. 4.2-4: Lagerperimeter für das SMA-Lager im geologischen Standortgebiet Jura Ost (JO): Lagerperimeter vor der Optimierung (Resultat von Teilschritt 1).

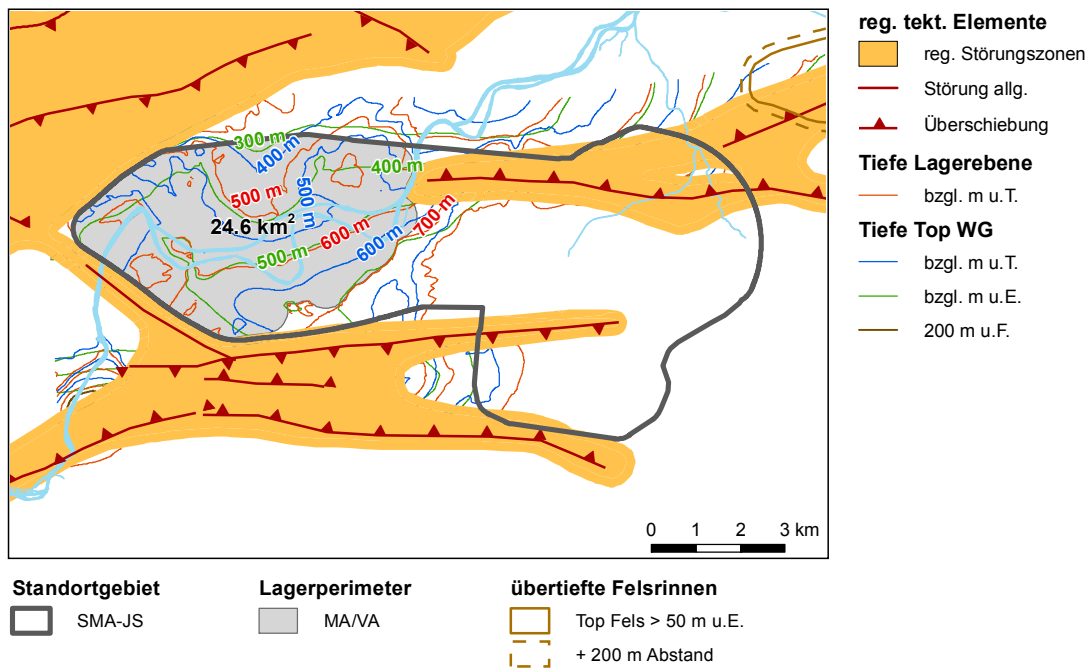


Fig. 4.2-5: Lagerperimeter für das SMA-Lager im geologischen Standortgebiet Jura-Südfuss (JS): Lagerperimeter vor der Optimierung (Resultat von Teilschritt 1).

Der östliche Teil des Standortgebiets wurde in Etappe 1 für die Effinger Schichten aus-
 geschieden. Nur für den Opalinuston alleine wäre das Standortgebiet kleiner gewesen.

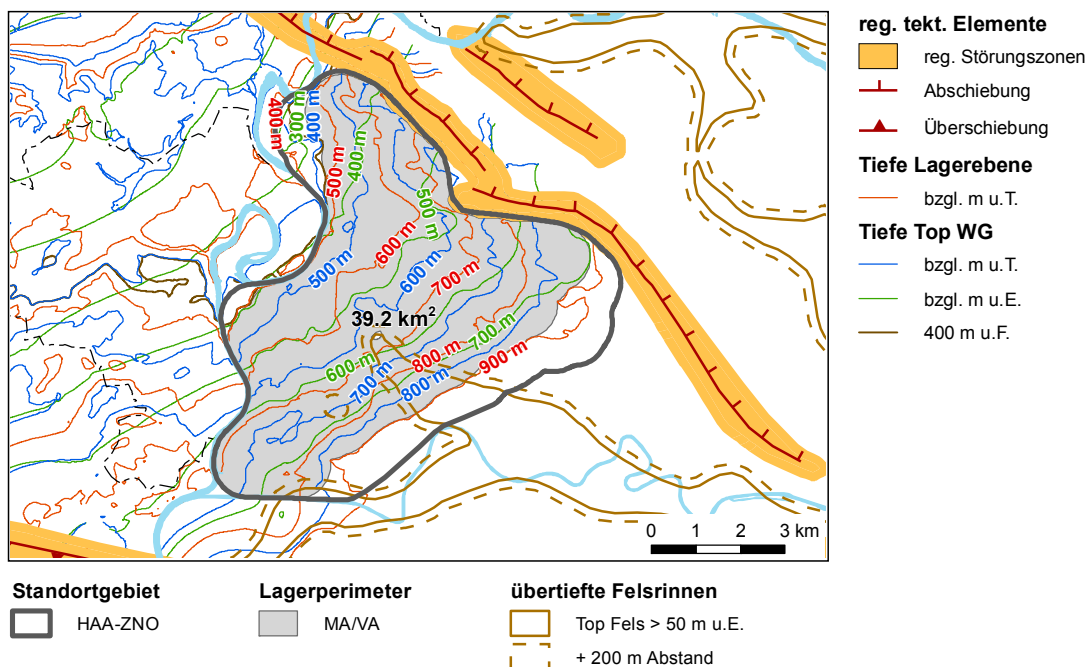


Fig. 4.2-6: Lagerperimeter für das HAA-Lager im geologischen Standortgebiet Zürich Nord-
 ost (ZNO): Lagerperimeter vor der Optimierung (Teilschritt 1).

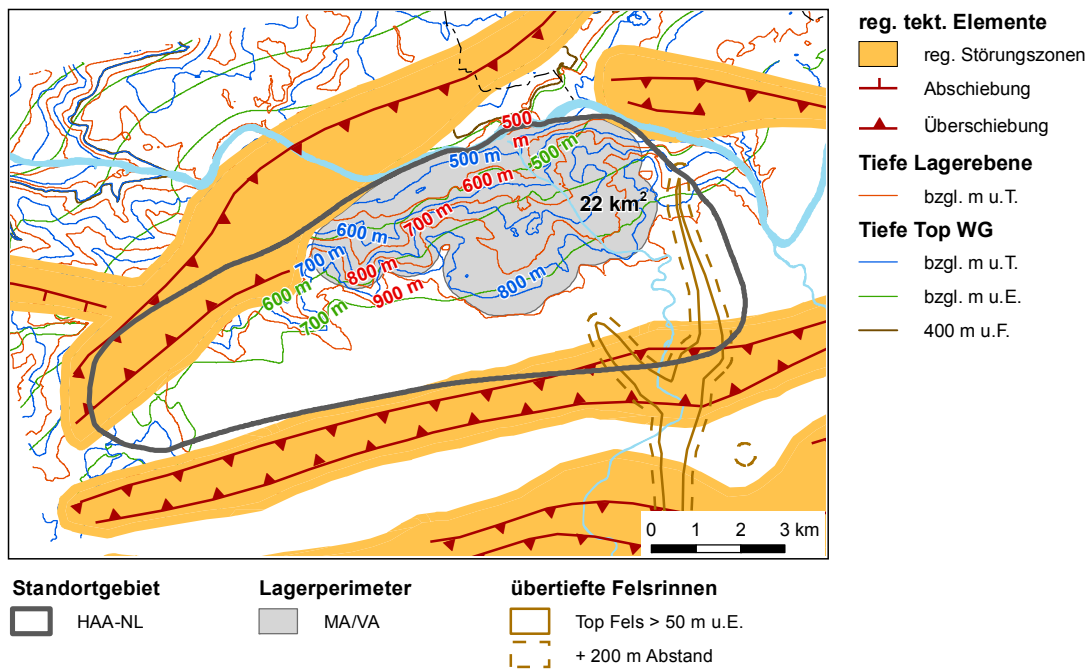


Fig. 4.2-7: Lagerperimeter für das HAA-Lager im geologischen Standortgebiet Nördlich Lägern (NL): Lagerperimeter vor der Optimierung (Resultat von Teilschritt 1).

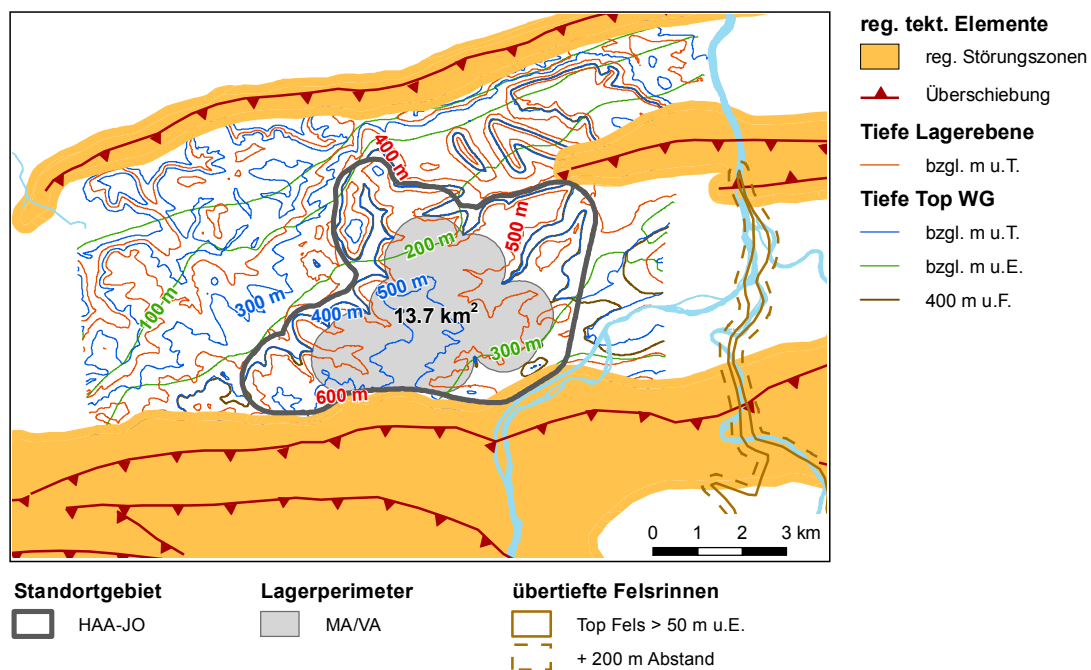


Fig. 4.2-8: Lagerperimeter für das HAA-Lager im geologischen Standortgebiet Jura Ost (JO): Lagerperimeter vor der Optimierung (Resultat von Teilschritt 1).

Grobcharakterisierung der Lagerperimeter und Festlegung der Optimierungsstrategie

Für die in Teilschritt 1 abgegrenzten Lagerperimeter wird eine Grobcharakterisierung durchgeführt, die aufzeigt, welche Schwachpunkte bestehen, die im Rahmen der Optimierung reduziert werden sollen. Die Grobcharakterisierung bzw. die Identifikation von Schwachpunkten führt zu den nachfolgend diskutierten Beobachtungen.

Bezüglich der regionalen geologischen Elemente, welche die Lagerperimeter beranden, sind bei der Optimierung als Erstes die 'zu meidenden tektonischen Zonen' zu berücksichtigen. Dann sind die Tiefenlagen zu beachten. Die geologischen Schichten des Wirtgesteins in der Nordschweiz fallen in der Regel von Norden nach Süden ein und erstrecken sich über einen gewissen Tiefenbereich. In einigen Fällen ist es die Tiefe, welche die Abgrenzung des Lagerperimeters bestimmt (die minimale Tiefe im Norden bzw. die maximale Tiefe im Süden).

Unter Berücksichtigung der in Kap. 4.1 diskutierten Anforderungen ergibt sich in der Nordschweiz für das SMA-Lager ein bevorzugtes Tiefenfenster¹²⁵ mit einer minimalen Tiefenlage des Top Wirtgesteins von 350 m unter Terrain (Vermeidung der Dekompaktion eines Teils des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs)¹²⁶ bzw. einer minimalen Tiefenlage des Top Wirtgesteins von 100 m unter der Erosionsbasis (Gewährleistung einer minimalen Geosphärentransportbarriere im Falle der Bildung einer Durchbruchsrinne)¹²⁷ für die Standortgebiete Südranden und Jura-Südfuss bzw. 150 m unter Erosionsbasis für die Standortgebiete Zürich Nordost und Nördlich Lägern und einer maximalen Tiefenlage der Lagerebene von 600 m unter Terrain (geeignete geotechnische Bedingungen). Dieses Tiefenfenster soll im Rahmen der Optimierung möglichst gut eingehalten werden.

Für das HAA-Lager liegt das bevorzugte Tiefenfenster bei einer minimalen Tiefenlage des Top Wirtgesteins von 450 m unter Terrain (Dekompaktion) bzw. bei einer minimalen Tiefenlage des Top Wirtgesteins von 350 m unter lokaler Erosionsbasis für das Standortgebiet Zürich Nordost und Nördlich Lägern wegen der unterstellten mehrfachen erheblichen Vergletscherungen; für das Standortgebiet Jura Ost ist es wegen reduzierter Vergletscherung eine minimale Tiefenlage des Top Wirtgesteins von 200 m unter Erosionsbasis. Für die maximale Tiefe der Lagerebene wird für das HAA-Lager ein Wert von 700 m unter Terrain angestrebt (geotechnische Bedingungen).

Zusätzlich existieren in allen geologischen Standortgebieten in der Nordschweiz mit Ausnahme des Standortgebiets Südranden 'zu meidende tektonische Zonen', die bei der Optimierung strikte zu meiden sind. Schliesslich ist bei der Optimierung zu prüfen, ob der resultierende optimierte Lagerperimeter ein genügendes Platzangebot bietet. Der Platzbedarf berücksichtigt neben dem Platzbedarf unter idealen Bedingungen auch Reserven zur Berücksichtigung der anordnungs- und einlagerungsbestimmenden geologischen Elemente und zur Berücksichtigung geotechnischer Erschwernisse. Der pro Standortgebiet abgeleitete Platzbedarf wurde in Kap. 4.1 erwähnt und ist in Tab. 4.2-1 aufgeführt.

¹²⁵ Das bevorzugte Tiefenfenster ist im Sinne eines Zielwerts zu verstehen. Falls sich der Zielwert nicht erreichen lässt, werden Lagerperimeter mit suboptimalen Eigenschaften bzgl. Tiefe abgegrenzt.

¹²⁶ Für Bereiche in direkter Nähe von Geländekanten (z.B. Nordgrenze des Standortgebiets Südranden) ist wegen möglicher erhöhter lokaler Erosion eine grössere Überdeckung anzustreben.

¹²⁷ Dies gilt für den Fall, wo die Bildung einer Durchbruchsrinne nicht ausgeschlossen werden kann, d.h. es gilt nicht für das SMA-Lager im Standortgebiet Jura Ost, wo im Betrachtungszeitraum für das SMA-Lager nicht mit einer Durchbruchsrinne gerechnet wird (vgl. Tab. 4.2-2).

Unter Berücksichtigung dieser Zielwerte ergibt sich aus der Grobcharakterisierung folgendes Bild für die Optimierung (vgl. Tab. 4.2-1)¹²⁸: Für das SMA-Lager ist im geologischen Standortgebiet Südanden für die Abgrenzung die minimale Tiefenlage kritisch¹²⁹ und weiter ist auch die Neuhauserwald-Rinne zu berücksichtigen; die Fläche östlich der Rinne ist sehr beschränkt in ihrer Grösse und hat deshalb bei der Einengung nur eine untergeordnete Bedeutung¹³⁰. Auch im Standortgebiet Jura Ost ist bei der Optimierung die minimale Tiefenlage zu beachten, wobei dies dort einfach möglich ist. Bezüglich der maximalen Tiefenlage ist das Standortgebiet Nördlich Lägern kritisch¹²⁹. In den Standortgebieten Zürich Nordost und Jura-Südfuss ist die maximale Tiefenlage im Rahmen der Optimierung ebenfalls zu beachten, was jedoch gut möglich ist.

Für das HAA-Lager sind im geologischen Standortgebiet Jura Ost die minimale Tiefenlage und im geologischen Standortgebiet Nördlich Lägern die maximale Tiefenlage kritisch¹²⁹. Im geologischen Standortgebiet Zürich Nordost sind beide Tiefenlagen einzubeziehen, und zwar die minimale im Nordwesten und die maximale im Südosten; dies ist jedoch problemlos möglich.

¹²⁸ Die folgenden Ausführungen gelten für die geologischen Standortgebiete in der Nordschweiz. Sie sind sinngemäss auch auf das Standortgebiet Wellenberg anwendbar, vgl. Kap. 4.2.4.

¹²⁹ Der Begriff "kritisch" wird verwendet, weil im diskutierten Fall das Optimierungsziel wegen ungenügendem Platzangebot nicht erreicht wird (vgl. Kap. 4.1.3).

¹³⁰ Im Fall, wo bei einer spezifischen Abgrenzungskonfiguration innerhalb des Standortgebiets zwei Lagerperimeter resultieren, die nicht vernünftig gemeinsam genutzt werden können, wird die bevorzugte, bei der Einengung weiter betrachtete Teilfläche als prioritärer Lagerperimeter (bzw. in den Figuren mit der Zusatzbezeichnung "prioritär") bezeichnet (vgl. dazu auch die Figuren zu den entsprechenden Lagerperimetern in Anhang B).

Tab. 4.2-1: Hinweise aus der Grobcharakterisierung der geologischen Standortgebiete in der Nordschweiz hinsichtlich der Indikatoren, die für die Optimierung der Lagerperimeter wichtig und daher prioritär zu berücksichtigen sind.

Die mit der Grobcharakterisierung identifizierten Schwachpunkte werden im Rahmen der Optimierung so weit möglich reduziert. Dazu werden für die aufgeführten Indikatoren erhöhte Anforderungen (sogenannte Optimierungsanforderungen) gestellt. Die Optimierungsanforderungen sind gebietsspezifisch. In der letzten Spalte sind Richtwerte für den Platzbedarf aufgeführt (vgl. Nagra 2014j).

Geologisches Standortgebiet	Zu meidende tektonische Zonen¹⁾	Minimale Tiefenlage²⁾	Maximale Tiefenlage³⁾	Platzbedarf [km²]
SMA				
Südranden (SR)		× ⁴⁾		3 – 4
Zürich Nordost (ZNO)	×		×	ca. 3
Nördlich Lägern (NL)	×		×	4 – 5
Jura Ost (JO)	×	×		3 – 4
Jura-Südfuss (JS)	×		×	6 – 8
Wellenberg (WLB)	-			ca. 3
HAA				
Zürich Nordost (ZNO)	×	×	×	ca. 6
Nördlich Lägern (NL)	×		×	8 – 12
Jura Ost (JO)	×	×		6 – 9

¹⁾ Berücksichtigt die Anforderungen des Indikators 'Regionale tektonische Elemente: Zu meidende tektonische Zonen'.

²⁾ Berücksichtigt die Anforderungen der Indikatoren 'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteins-Dekompaktion', 'Tiefenlage unter lokaler Erosionsbasis im Hinblick auf die Bildung neuer Rinnen' und 'Tiefenlage unter Fels im Hinblick auf glaziale Tiefenerosion'.

³⁾ Berücksichtigt die Anforderungen des Indikators 'Tiefenlage im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit (u.B. Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften)'.

⁴⁾ Hier ist auch die Neuhauserwald-Rinne zu berücksichtigen, welche das Standortgebiet Südranden de facto in zwei Teilflächen teilt, wovon die östliche Teilfläche sehr klein ist und deshalb bei der Bewertung in der Regel nicht berücksichtigt wird.

4.2.3 Abgrenzung optimierter Lagerperimeter (Teilschritt 2)

Massgebende Fälle für die Einengung

Das Resultat des zweiten Teilschritts gemäss Kap. 4.1 sind Lagerperimeter nach der Optimierung für das SMA-Lager und das HAA-Lager gemäss den in Tab. 4.2-1 aufgeführten Optimierungszielen. Wie in Kap. 4.1 erwähnt, werden diese optimierten Lagerperimeter in einem letzten Schritt mit Expertenwissen geprüft und bei Bedarf noch spezifisch bezüglich raumwirksamer Elemente, die nicht systematisch im GIS enthalten sind, angepasst. Im Fall des Standortgebiets Zürich Nordost wird in diesem Schritt das auf der 3D-Seismik Zürcher Weinland basierende detaillierte Störungsinventar (Birkhäuser et al. 2001) berücksichtigt, und es werden auch lokale Störungszonen und Gebiete unruhiger Schichtlagerung gemieden. Im Standortgebiet Jura-Südfuss werden damit ungünstige Situationen bezüglich Explorierbarkeit (westlicher Teil im

Bereich Bahnhof Olten) vermieden. Bei sehr grossen Lagerperimetern (SMA-ZNO und SMA-JO) wird zudem modellhaft aufgezeigt, wie diese genutzt werden könnten (z.B. im Hinblick auf ein Kombilager). Dies ergibt noch eine zusätzliche Abbildung, die als "modellhaft modifiziert" bzw. "manuell angepasst" bezeichnet wird.

Fig. 4.2-9 und Fig. 4.2-10 liefern eine Übersicht über die "massgebenden Lagerperimeter für die Einengung" (kurz: mLE-r¹³¹); eine Darstellung jedes einzelnen massgebenden Lagerperimeters findet sich in Fig. 4.2-11 bis 4.2-23; wo vorhanden, ist auch der modellhaft modifizierte Lagerperimeter abgebildet (Fig. 4.2-13, 4.2-16, 4.2-18, 4.2-20 und 4.2-23).

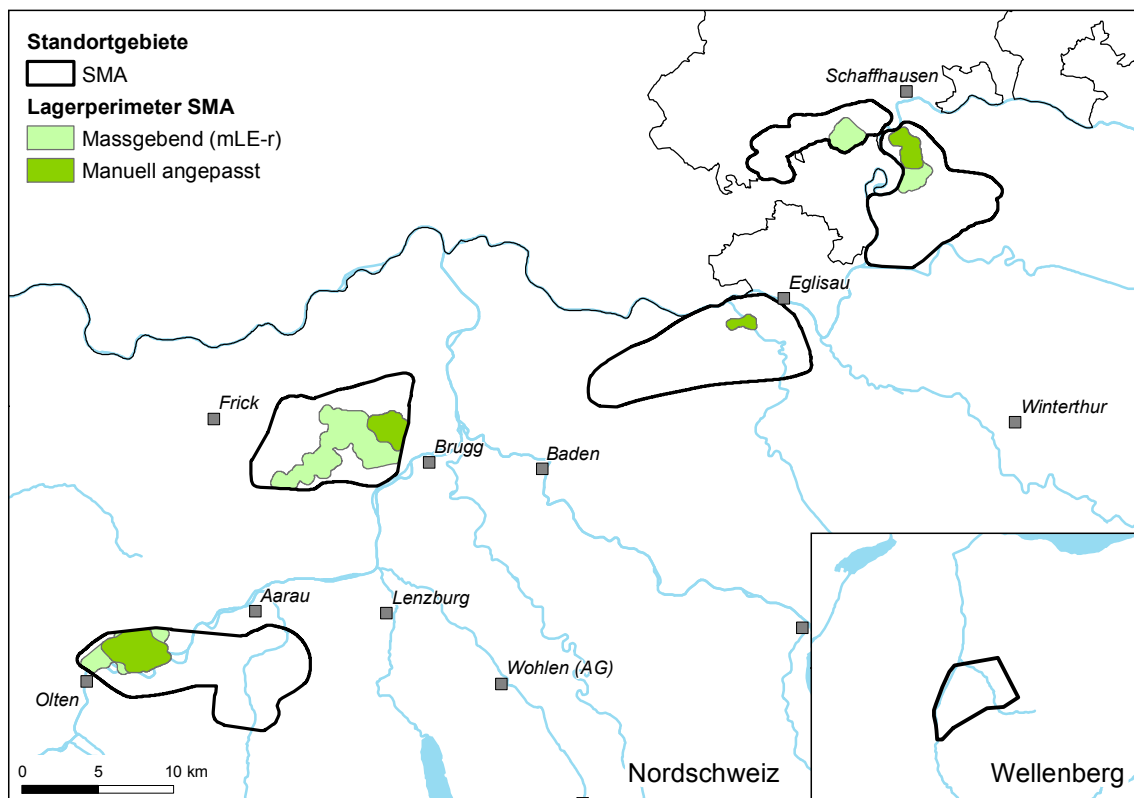


Fig. 4.2-9: Übersicht über die geologischen Standortgebiete mit den zugehörigen Lagerperimetern für das SMA-Lager: Ergebnisse aus Teilschritt 2 (Lagerperimeter nach der Optimierung, resultierend in "massgebende Lagerperimeter für die Einengung"), teilweise zusätzlich mit "modellhaft modifizierten" Lagerperimetern.

¹³¹ Das Kürzel xxx-r steht für die realistische Tiefenlage des Wirtgesteins im Vergleich zu Lagerperimetern, welche mit alternativen Tiefenlagen des Wirtgesteins abgegrenzt werden (xxx-u: untiefe Wirtgesteinslage; xxx-t: tiefe Wirtgesteinslage).

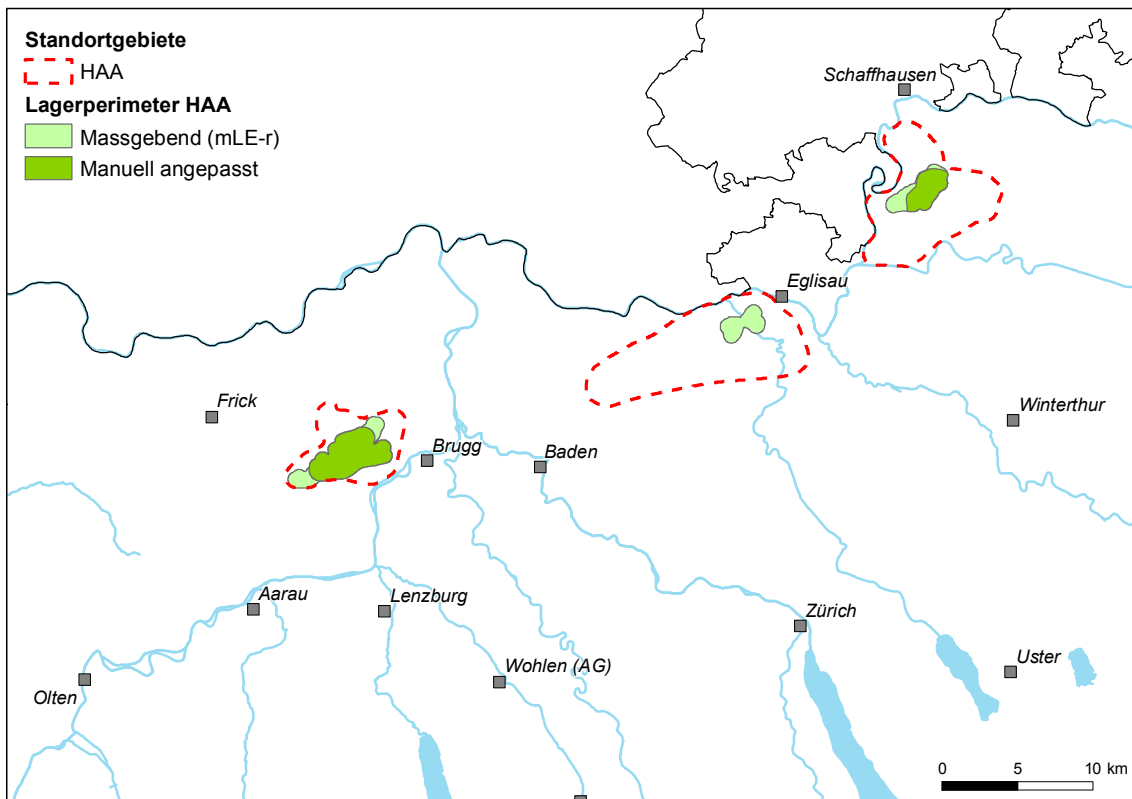


Fig. 4.2-10: Übersicht über die geologischen Standortgebiete mit den zugehörigen Lagerperimetern für das HAA-Lager: Ergebnisse aus Teilschritt 2 (Lagerperimeter nach der Optimierung, resultierend in "massgebende Lagerperimeter für die Einengung"), teilweise zusätzlich mit "modellhaft modifizierten" Lagerperimetern.

Für das Kombilager werden keine separaten Lagerperimeter festgelegt. Die Varianten für das Kombilager ergeben sich als Kombination der Varianten für das SMA- und HAA-Lager, wenn im betreffenden geologischen Standortgebiet beide Lagertypen in Frage kommen und wenn zudem das Platzangebot ausreicht, um beide Lager aufnehmen zu können (siehe Kap. 2.2.3 und Kap. 2.3.3). Dies wird in Kap. 5 nach Durchführung der Bewertung und des sicherheitstechnischen Vergleichs diskutiert.

Nachfolgend sind für die verschiedenen Standortgebiete die optimierten Lagerperimeter dargestellt, welche die Basis bilden für die Bewertung in Kap. 4.4. Die Figuren mit weiteren Lagerperimetern finden sich in Anhang B.

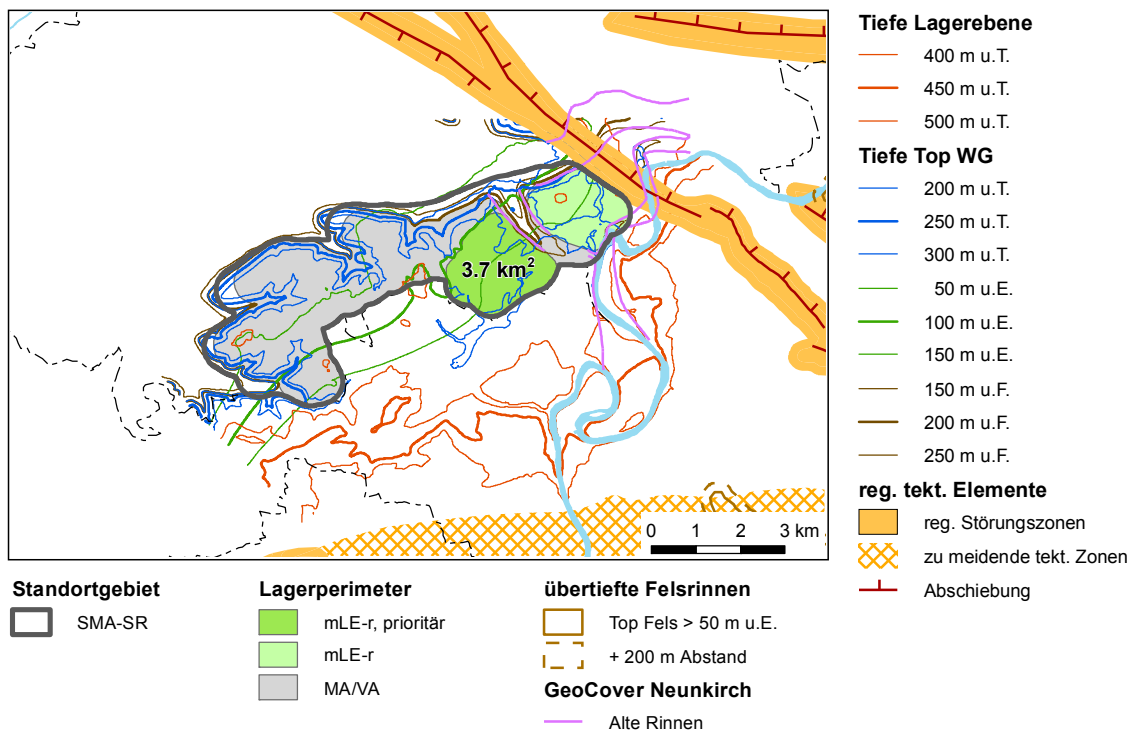


Fig. 4.2-11: Lagerperimeter für das SMA-Lager im geologischen Standortgebiet Südranden (SR): Lagerperimeter nach der Optimierung (ohne östlichen Teil); massgebender Lagerperimeter für die Einengung (Teilschritt 2)¹³².

Durch die Neuhauserwald-Rinne wird das Standortgebiet de facto in zwei Teile geteilt; der östliche Teil ist sehr beschränkt in seiner Grösse und wird in der Bewertung nicht berücksichtigt. Der für die Einengung massgebende westliche Teil wird auch als prioritäre Fläche bezeichnet.

¹³² Alle Lagerperimeter ("massgebende Lagerperimeter für die Einengung" und alternative Lagerperimeter) sind in Anhang B dargestellt.

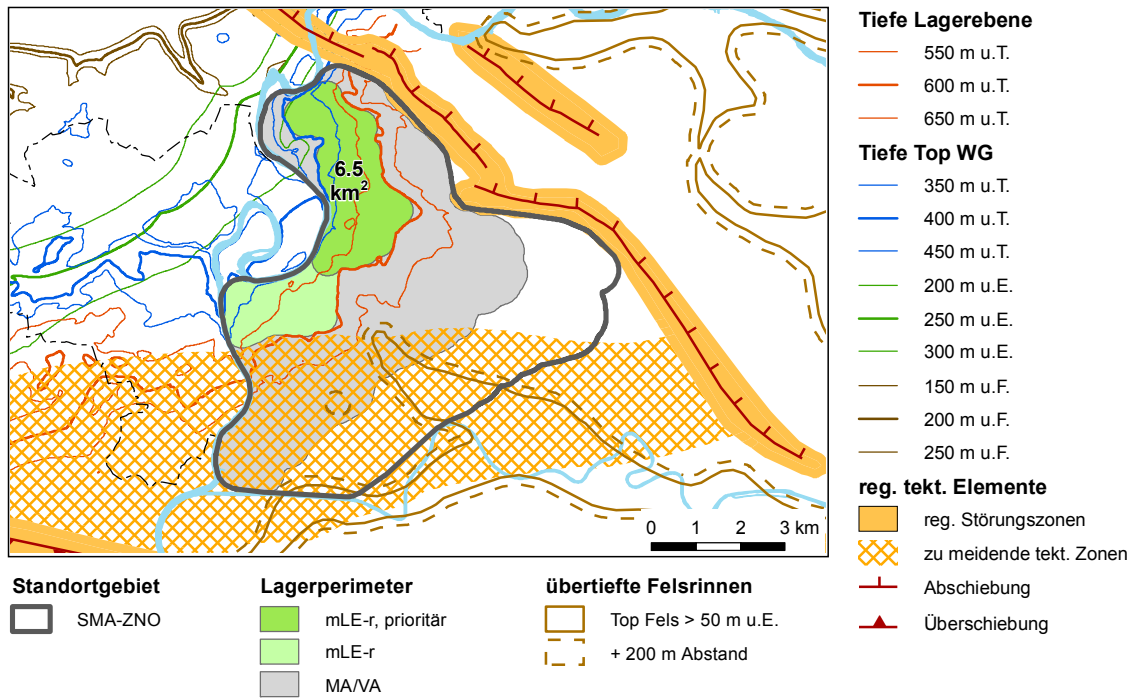


Fig. 4.2-12: Lagerperimeter für das SMA-Lager im geologischen Standortgebiet Zürich Nordost (ZNO): Lagerperimeter nach der Optimierung; massgebender Lagerperimeter für die Einengung (Teilschritt 2).

Durch die Einschnürung im südlichen Drittel der Fläche drängt sich eine Aufteilung des Lagerperimeters auf. Die nördliche prioritäre Fläche bildet den für die Einengung massgebenden Lagerperimeter.

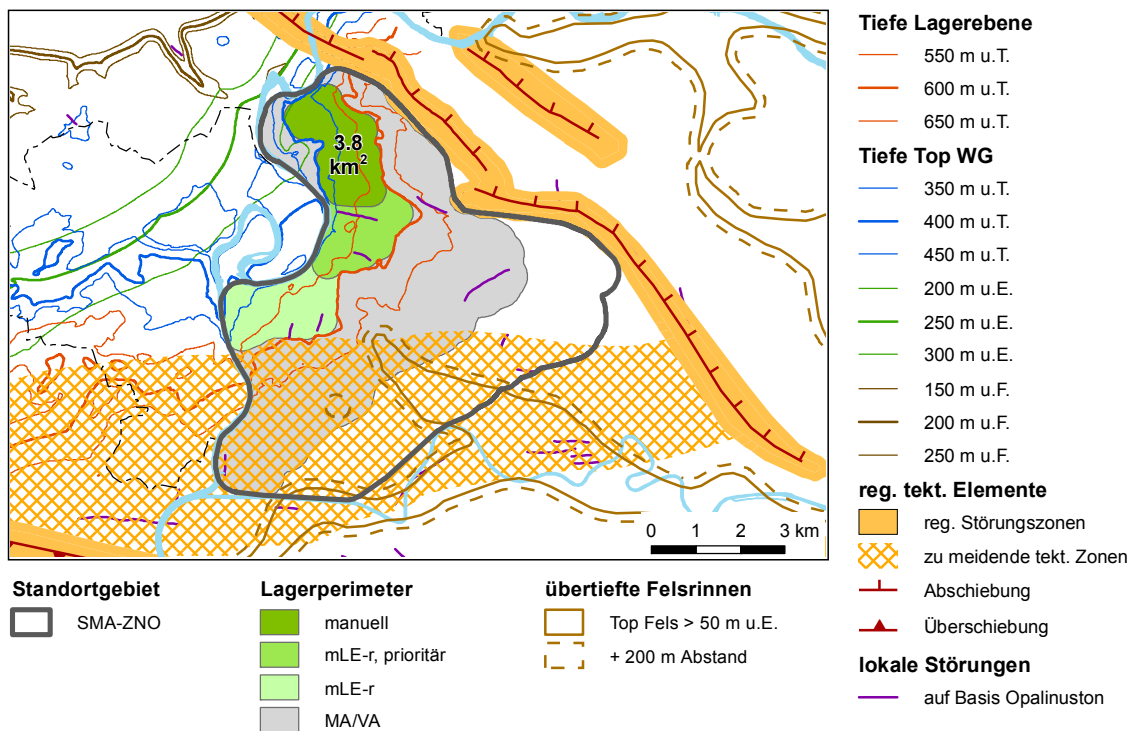


Fig. 4.2-13: Lagerperimeter für das SMA-Lager im geologischen Standortgebiet Zürich Nordost (ZNO): Lagerperimeter nach der Optimierung; massgebender Lagerperimeter für die Einengung (Teilschritt 2); modellhaft modifiziert.

Ausgehend vom massgebenden Lagerperimeter zeigt dieser modellhaft modifizierte Lagerperimeter wie das detaillierte Störungsinventar (lokale Störungszonen und Gebiete unruhiger Schichtlagerung; vgl. Birkhäuser et al. 2001) berücksichtigt bzw. gemieden werden könnte.

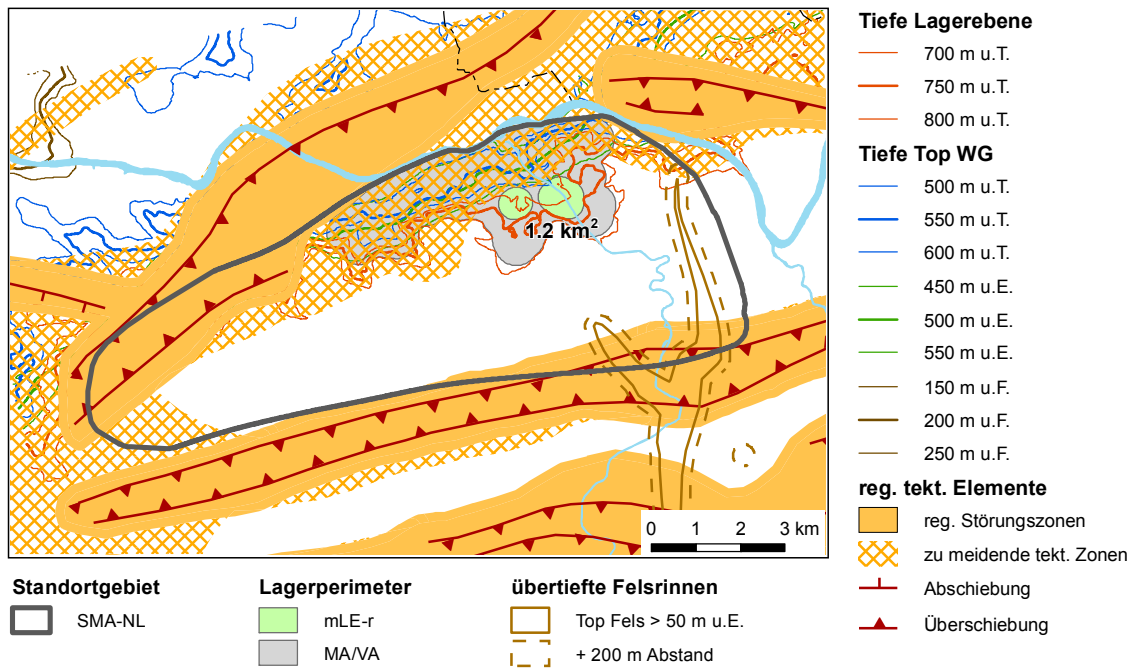


Fig. 4.2-14: Lagerperimeter für das SMA-Lager im geologischen Standortgebiet Nördlich Lägern (NL): Lagerperimeter nach der Optimierung; massgebender Lagerperimeter für die Einengung (Teilschritt 2).

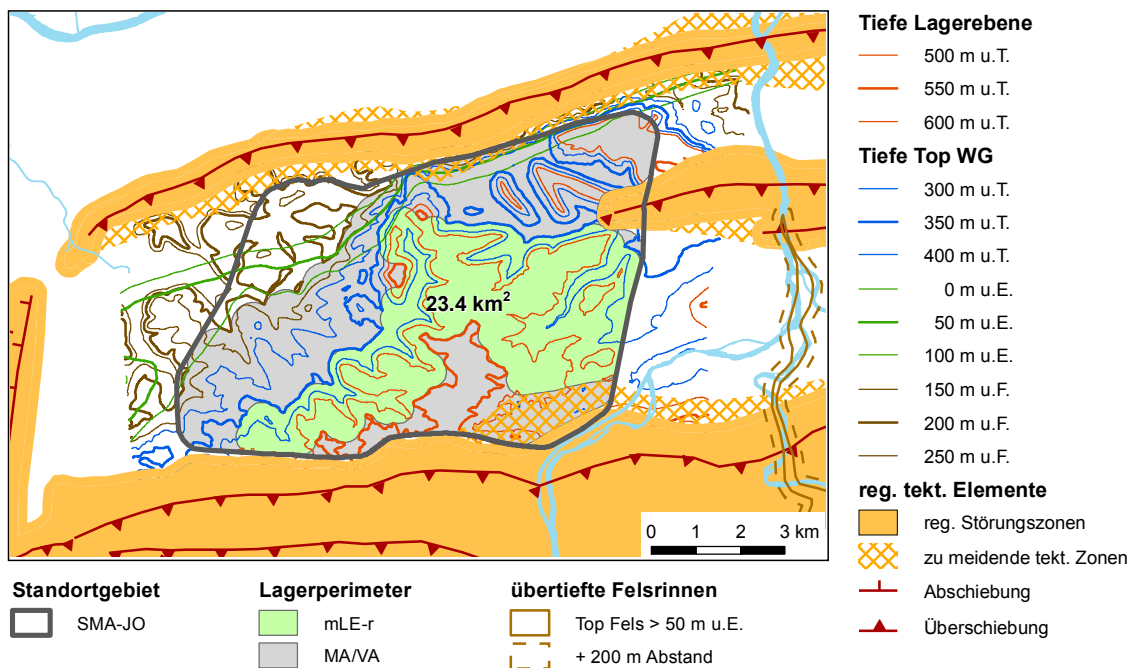


Fig. 4.2-15: Lagerperimeter für das SMA-Lager im geologischen Standortgebiet Jura Ost (JO): Lagerperimeter nach der Optimierung; massgebender Lagerperimeter für die Einengung (Teilschritt 2).

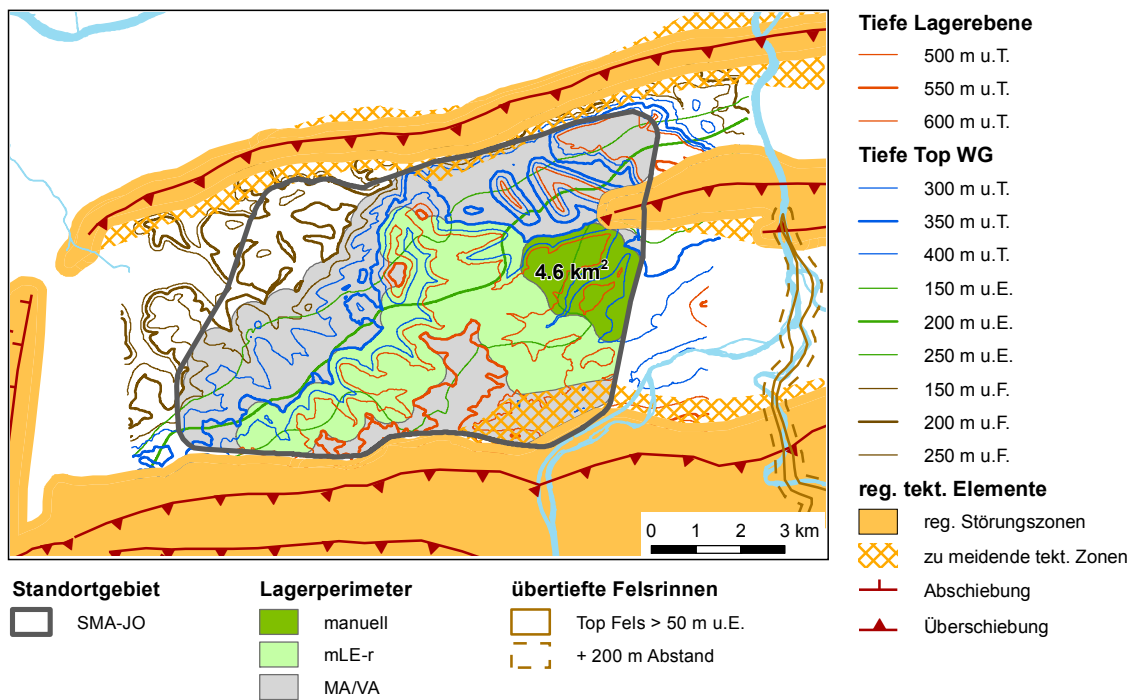


Fig. 4.2-16: Lagerperimeter für das SMA-Lager im geologischen Standortgebiet Jura Ost (JO): Lagerperimeter nach der Optimierung; massgebender Lagerperimeter für die Einengung (Teilschritt 2); modellhaft modifiziert.

Ausgehend vom massgebenden Lagerperimeter zeigt dieser modellhaft modifizierte Lagerperimeter, wie die Nutzung dieses sehr grossen Lagerperimeters z.B. im Hinblick auf ein Kombilager weiter optimiert werden könnte.

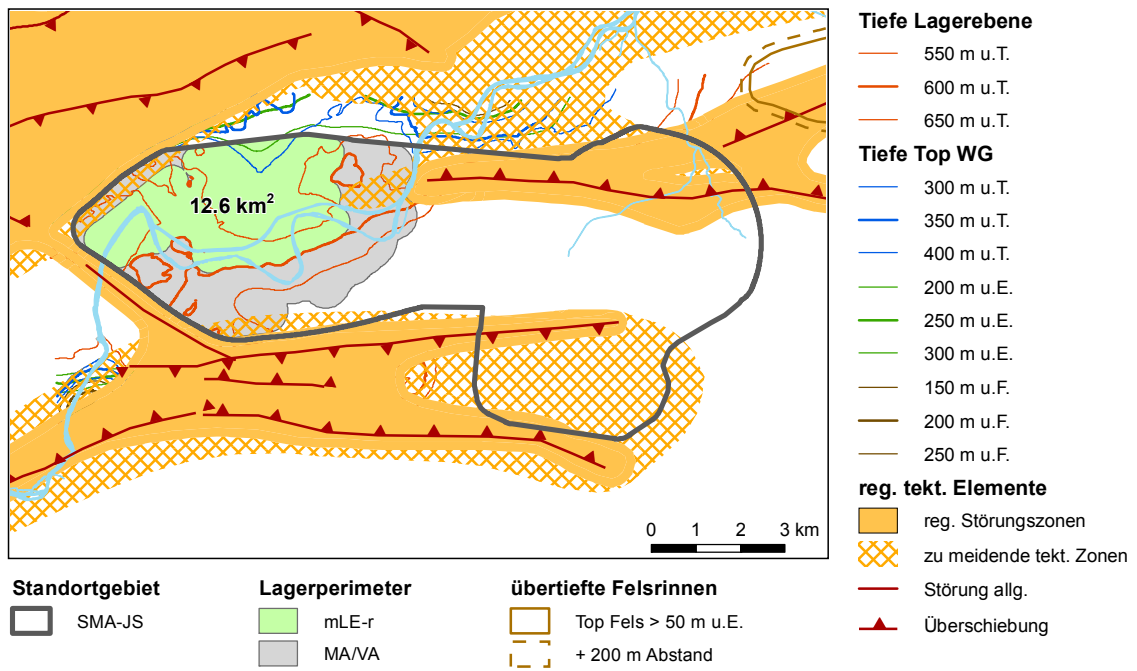


Fig. 4.2-17: Lagerperimeter für das SMA-Lager im geologischen Standortgebiet Jura-Südfuss (JS): Lagerperimeter nach der Optimierung; massgebender Lagerperimeter für die Einengung (Teilschritt 2).

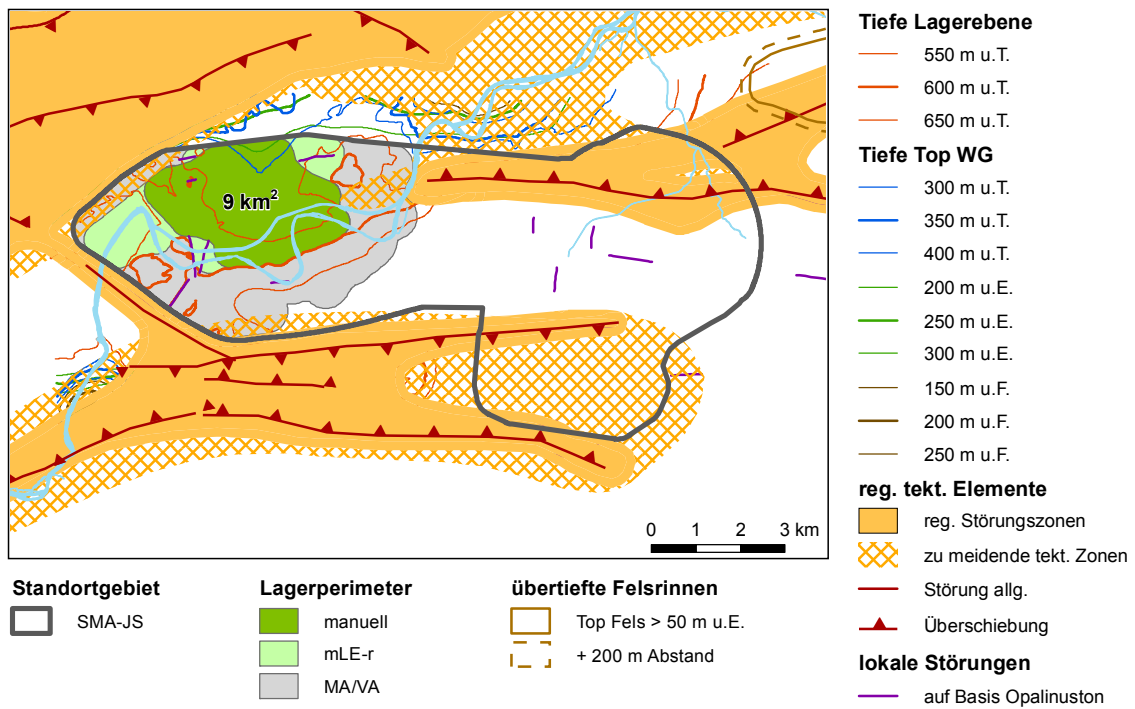


Fig. 4.2-18: Lagerperimeter für das SMA-Lager im geologischen Standortgebiet Jura-Südfuss (JS): Lagerperimeter nach der Optimierung; massgebender Lagerperimeter für die Einengung (Teilschritt 2), modellhaft modifiziert.

Ausgehend vom massgebenden Lagerperimeter zeigt dieser modellhaft modifizierte Lagerperimeter, wie der massgebende Lagerperimeter im Hinblick auf die Nutzung weiter optimiert werden könnte, nämlich durch Meidung ungünstiger Situationen bezüglich Explorierbarkeit (westlicher Teil des Lagerperimeters im Bereich Bahnhof Olten).

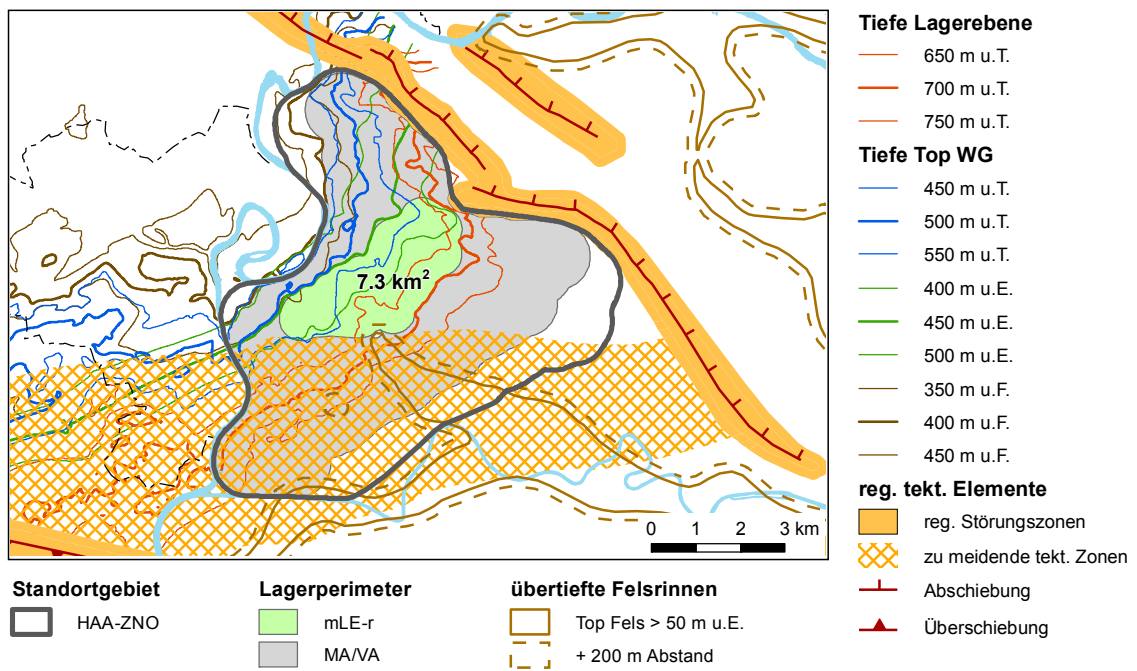


Fig. 4.2-19: Lagerperimeter für das HAA-Lager im geologischen Standortgebiet Zürich Nordost (ZNO): Lagerperimeter nach der Optimierung; massgebender Lagerperimeter für die Einengung (Teilschritt 2).

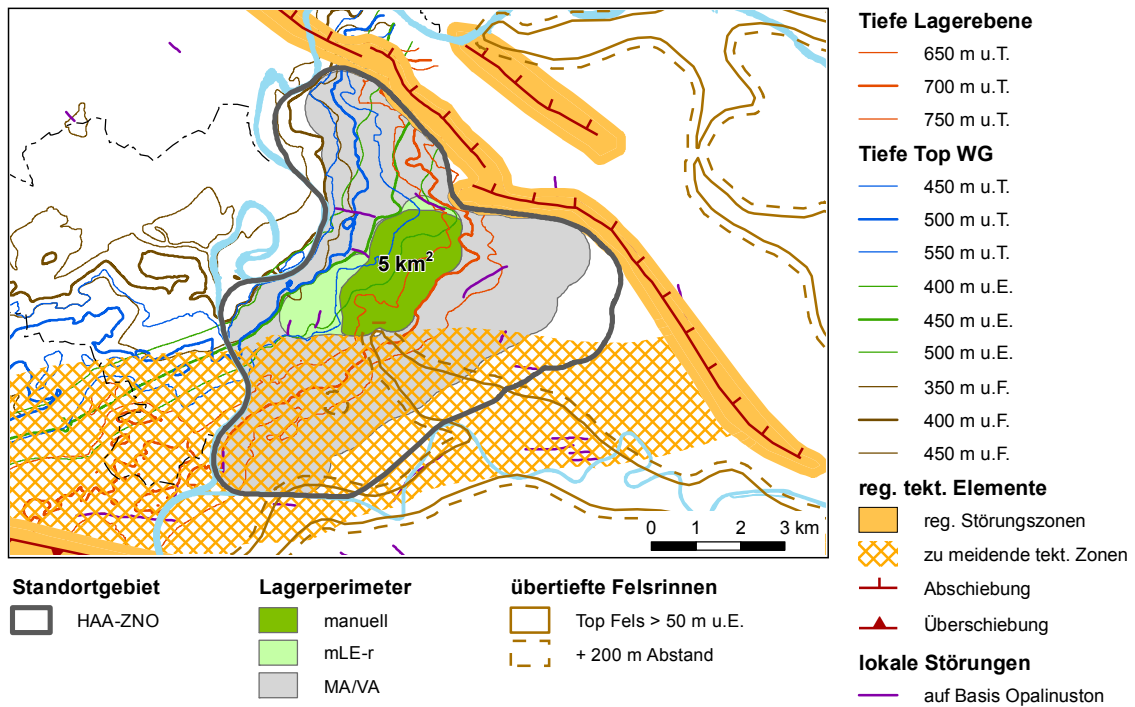


Fig. 4.2-20: Lagerperimeter für das HAA-Lager im geologischen Standortgebiet Zürich Nordost (ZNO): Lagerperimeter nach der Optimierung; massgebender Lagerperimeter für die Einengung (Teilschritt 2); modellhaft modifiziert.

Ausgehend vom massgebenden Lagerperimeter zeigt dieser modellhaft modifizierte Lagerperimeter, wie das detaillierte Störungsinventar (lokale Störungszonen und Gebiete unruhiger Schichtlagerung; vgl. Birkhäuser et al. 2001) berücksichtigt bzw. gemieden werden könnte. Der resultierende manuell optimierte Lagerperimeter geht von günstigen Bedingungen aus, sodass der Richtwert bezüglich Platzbedarf von 6 km² unterschritten werden kann.

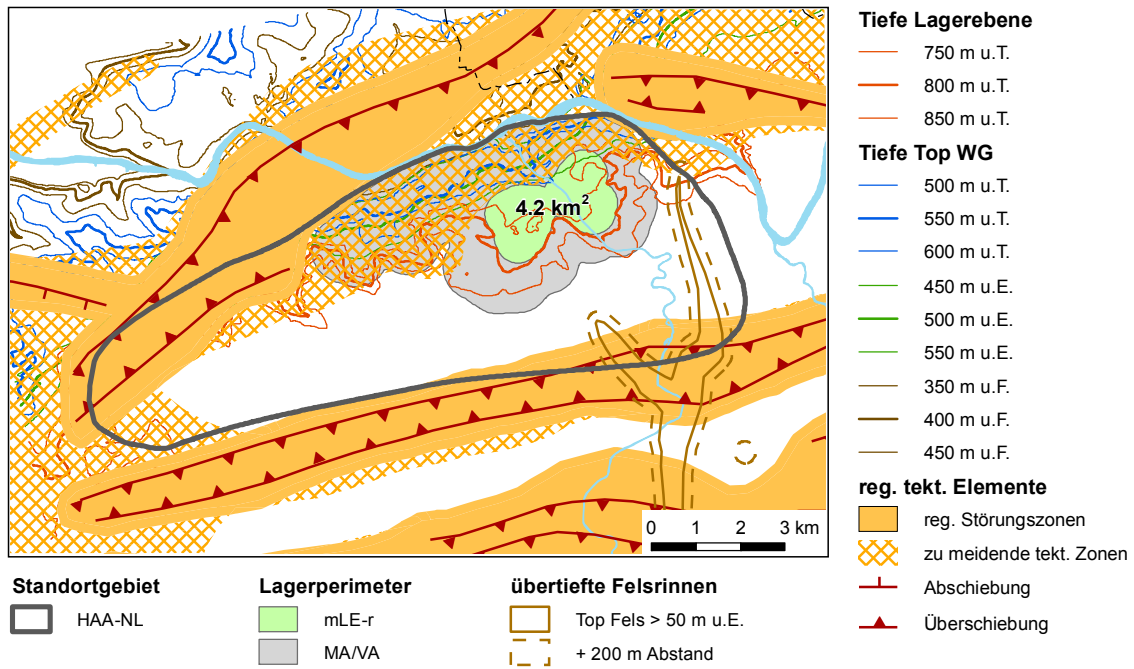


Fig. 4.2-21: Lagerperimeter für das HAA-Lager im geologischen Standortgebiet Nördlich Lägern (NL): Lagerperimeter nach der Optimierung; massgebender Lagerperimeter für die Einengung (Teilschritt 2).

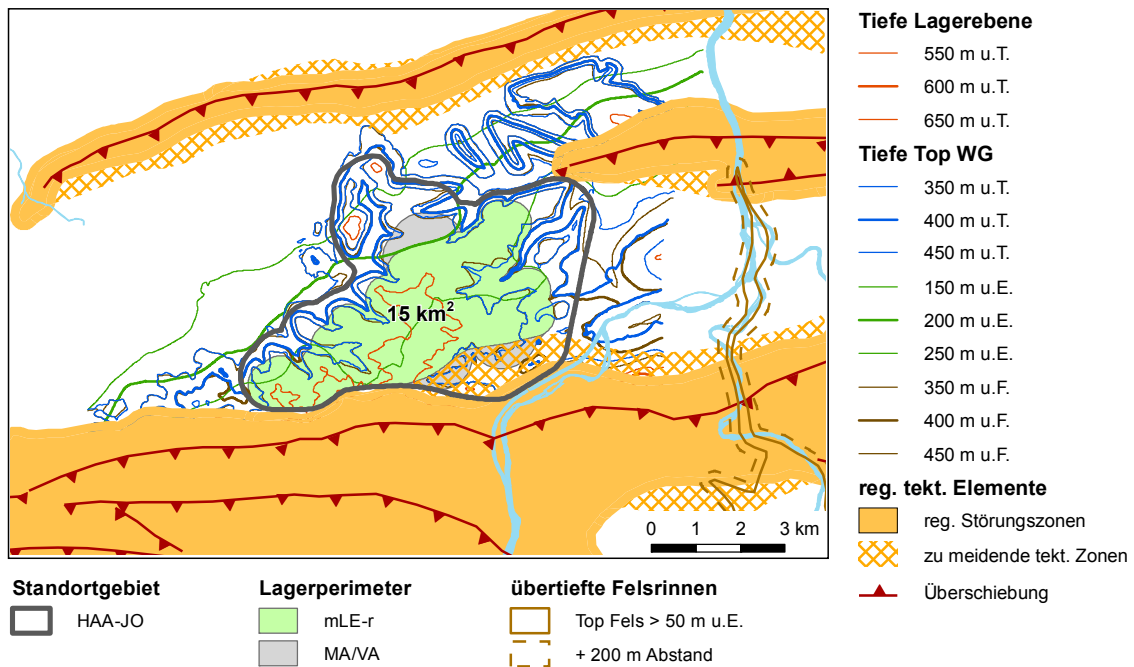


Fig. 4.2-22: Lagerperimeter für das HAA-Lager im geologischen Standortgebiet Jura Ost (JO): Lagerperimeter nach der Optimierung; massgebender Lagerperimeter für die Einengung (Teilschritt 2).

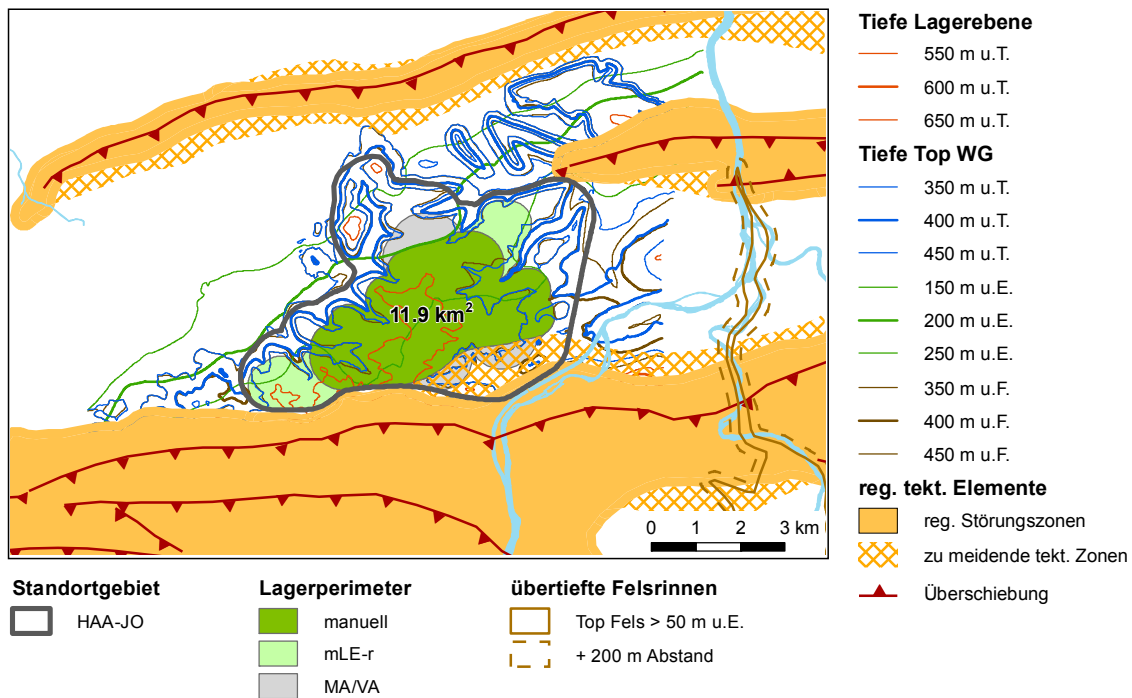


Fig. 4.2-23: Lagerperimeter für das HAA-Lager im geologischen Standortgebiet Jura Ost (JO): Lagerperimeter nach der Optimierung; massgebender Lagerperimeter für die Einengung (Teilschritt 2); modellhaft modifiziert.

Ausgehend vom massgebenden Lagerperimeter zeigt dieser modellhaft modifizierte Lagerperimeter, wie die Nutzung dieses Lagerperimeters im Hinblick auf ein Kombilager weiter optimiert werden könnte.

Alternative Lagerperimeter

Wie in Kap. 4.1 erwähnt, werden zur Untersuchung der Sensitivität und der Robustheit neben dem "massgebenden Fall" (Lagerperimeter nach Optimierung) auch alternative Lagerperimeter abgegrenzt, die auf alternativen Optimierungsanforderungen basieren. Dazu gehört auch die Berücksichtigung konzeptioneller Ungewissheiten, wo bei der Abgrenzung der Lagerperimeter die konzeptionelle Ungewissheit der Bildung einer Durchbruchsrinne behandelt wird. In Tab. 4.2-2 ist festgehalten, wie für jedes Standortgebiet mit der Möglichkeit der Bildung einer Durchbruchsrinne umgegangen wird. Wo angebracht, werden auch für die alternative Konzeptualisierung durch alternative Optimierungsanforderungen mehrere Lagerperimeter abgegrenzt.

Für den massgebenden Lagerperimeter wird schliesslich mit unterschiedlichen Annahmen zur Tiefenlage des Wirtgesteins auch der Einfluss der Ungewissheiten der Tiefenlage des Wirtgesteins auf die Lagerperimeter untersucht; dies kann Anpassungen an der Optimierung verlangen und führt dann zu zusätzlichen Lagerperimetern.

Die aufgrund dieser Überlegungen abgegrenzten Lagerperimeter sind in Tab. 4.2-3 aufgeführt. Tab. 4.2-3 enthält ausgewählte Kenndaten für die verschiedenen Lagerperimeter sowie Erläuterungen zu den Ungewissheiten und Sensitivitäten. In Anhang B finden sich Karten zu jedem dieser Lagerperimeter und eine Tabelle mit den wichtigsten Kenndaten. Die Karten in Anhang B zeigen den Einfluss von alternativen Annahmen bezüglich Optimierung auf die Lagerperi-

meter sowie den Einfluss der Ungewissheiten der Tiefe des Wirtgesteins auf die Lagerperimeter. Werden die in Anhang B dargestellten Lagerperimeter bezüglich des resultierenden Platzangebots beurteilt, so zeigt sich, dass ein Teil dieser Lagerperimeter deutlich zu klein ist¹³³.

Für die Dosisberechnungen (vgl. Resultate in Kap. 4.3) und die Bewertung der Standortgebiete in Kap. 4.4 wird der massgebende Lagerperimeter verwendet. Zur Untersuchung der Sensitivität der Bewertung werden in Kap. 4.4 neben dem "massgebenden Fall" auch die in Tab. 4.2-3 markierten Varianten verwendet. Diese umfassen alle abgegrenzten Lagerperimeter, die ein genügendes Platzangebot aufweisen; Lagerperimeter mit einem zu kleinen Platzangebot werden nicht weiter betrachtet. Die Resultate der Bewertung der alternativen Lagerperimeter werden detaillierter in Kap. 4.4 diskutiert; die Resultate sind tabellarisch in Anhang C.3.1.2 aufgeführt.

Tab. 4.2-2: Unterscheidung zwischen massgebender Konzeptualisierung für die Einengung und alternativer Konzeptualisierung hinsichtlich der Annahme zur Bildung einer Durchbruchsrinne in den einzelnen geologischen Standortgebieten der Nordschweiz.

Vergleiche zur Möglichkeit der Bildung von Durchbruchsrinnen auch Nagra (2014b, Dossier VI).

Das geologische Standortgebiet Wellenberg wird separat behandelt und ist deshalb hier nicht aufgeführt.

Lagertyp und Standortgebiet	Annahme der Bildung einer Durchbruchsrinne	
	Massgebende Konzeptualisierung für die Einengung	Alternative Konzeptualisierung
SMA Südranden (SR)	ja	ja
SMA Zürich Nordost (ZNO)	ja	ja
SMA Nördlich Lägern (NL)	ja	ja
SMA Jura Ost (JO)	nein	nein
SMA Jura-Südfuss (JS)	nein	ja
HAA Zürich Nordost (ZNO)	ja	ja
HAA Nördlich Lägern (NL)	ja	ja
HAA Jura Ost (JO)	ja	nein

¹³³ Ein Lagerperimeter wird als deutlich zu klein eingestuft, wenn er die untere Bandbreite des Richtwerts für den Platzbedarf gemäss Tab. 4.2-1 deutlich unterschreitet.

4.2.4 Abgrenzung der Lagerperimeter für das Standortgebiet Wellenberg

Vorgehen, Grundlagen und Anforderungen

Für Etappe 2 wurde die Geometrie des Wirtgesteinskörpers im Standortgebiet Wellenberg neu überprüft. Der Vergleich zwischen dem Wirtgesteinskörper von Etappe 1 mit demjenigen für Etappe 2 zeigt grundsätzlich eine gute Übereinstimmung, in den Details hingegen gibt es einige Abweichungen (vgl. Nagra 2014b, Dossier II). Schon in Etappe 1 war es vorgesehen, die Lagerkammern auf mehreren Ebenen anzuordnen. Auch in Etappe 2 ist die Anordnung des Lagers auf mehreren Ebenen vorgesehen. Für die in Etappe 2 durchgeführte Abgrenzung der Lagerperimeter werden die Lagerebenen 540 m ü.M., 400 m ü.M. und 200 m ü.M. verwendet.

Das aktualisierte 3D-Modell des Wirtgesteinskörpers ist auch im GIS erfasst und wird wie bei den Standortgebieten in der Nordschweiz für den Schneideprozess verwendet. Bezüglich Überdeckung und Erosion werden auch hier für den GIS-Schneideprozess Bezugshorizonte verwendet. Es sind dies die Überdeckung der Lagerebenen heute (m unter Terrain für die verschiedenen Lagerebenen, vgl. Fig. 4.2-24), sowie Bezugshorizonte für verschiedene Erosionsszenarien. Es werden drei Erosionsszenarien betrachtet (Nagra 2014b, Dossier III): Übertiefung um 50 m und verstärkte Tiefenerosion mit 100 m bzw. 200 m Übertiefung (vgl. Fig. 4.2-25). Deren Bedeutung wird im Bewertungs- bzw. Schneideprozess für die zwei abdeckenden Szenarien (50 m bzw. 200 m Übertiefung) anhand der verbleibenden Überdeckung der verschiedenen Lagerebenen (unter Terrain bzw. unter Fels) nach 100'000 Jahren untersucht (vgl. Fig. 4.2-26a/b bzw. 4.2-27a/b). Weiter ist im Schneideprozess der Abstand zum Nebengestein zu beachten (vgl. Fig. 4.2-28a/b).

Schliesslich sind bei der Abgrenzung der Lagerperimeter die in Kap. 3 erwähnten Hinweise aus dem Lötschbergtunnel (durchlässige Störungszone in den Schimberg-Schiefern bei 600 m Überdeckung) zu berücksichtigen, dass das Tertiär der Axen-Decke möglicherweise eine weniger gute Barrierenqualität haben könnte als angenommen (Nagra 2014b, Dossier VI). Deshalb wird bei der Abgrenzung der Lagerperimeter als alternative Konzeptualisierung die Annahme getroffen, dass das Tertiär der Axen-Decke keine Wirtgesteinsqualität hat und nur die Palfris-Formation der Drusberg-Decke als Wirtgestein für die Anordnung der Lagerperimeter berücksichtigt werden kann (vgl. dazu die Wirtgesteinsgrenzen in Fig. 4.2-28b).

In Fig. 4.2-24 ist die Überdeckung der drei Lagerebenen dargestellt. Diese werden verwendet zur Abgrenzung geeigneter Lagerflächen auf den drei Lagerebenen. Neben einer genügenden Überdeckung zur Verhinderung der Dekompaktion ist beim Schneideprozess auch auf einen genügenden Abstand zum Nebengestein (Annahme: 200 m) zu achten. Die abgegrenzten Lagerflächen werden dann geprüft bezüglich ihrer Lage zur Terrain- bzw. Felsoberfläche¹³⁴ in 100'000 Jahren, wozu die entsprechenden Erosionsszenarien gemäss Fig. 4.2-25 (Profile), Fig. 4.2-26a/b und Fig. 27a/b (Tiefenlage Lagerebenen unter Terrainoberfläche bzw. unter Felsoberfläche in 100'000 Jahren) verwendet werden. Falls notwendig, werden die Bezugshorizonte in 100'000 Jahren auch bei der Abgrenzung der Lagerperimeter berücksichtigt.

¹³⁴ Bei der Felsoberfläche wird im "massgebenden Fall" von einer Übertiefung von 50 m ausgegangen.

Wegen Ungewissheiten in der Lage der Felsoberfläche in 100'000 Jahren wird neben der Übertiefung von 50 m auch eine Variante betrachtet, wo von einer Übertiefung von 200 m ausgegangen wird. Da auch bezüglich der Barrierenqualität des Tertiärs der Axen-Decke Ungewissheiten bestehen, wird in einer alternativen Abgrenzung der Lagerperimeter untersucht, ob die Platzverhältnisse auch ohne Nutzung des Tertiärs als Wirtgestein ausreichen. Dazu wird auf die in Fig. 4.2-28a/b dargestellten Grenzen zwischen der Palfris-Formation und den tertiären Schiefeln abgestützt.

Resultate

In Fig. 4.2-29 sind die Resultate für den "massgebenden Lagerperimeter für die Einengung" für die drei Lagerebenen abgebildet: 540 m ü.M., 400 m ü.M. und 200 m ü.M. mit Angabe der Überdeckung heute (zur Beurteilung der Dekompaktion und der bautechnischen Machbarkeit) und der Überdeckung in 100'000 Jahren für das Szenario "Übertiefung um 50 m". Aus den Figuren ist ersichtlich, dass die erforderliche Fläche für die Lagerperimeter bei Einhaltung der erwünschten Überdeckung eigentlich nur erreicht wird, wenn sowohl die Ebene 400 m ü.M. als auch die Ebene 200 m ü.M. verwendet werden; die Lagerebene auf 540 m ü.M. kann nur für schwachaktive Abfälle verwendet werden (weniger als ca. 25 % des gesamten Abfallvolumens), wo von reduzierten Anforderungen bezüglich Überdeckung ausgegangen werden kann.

Die für die alternativen Konzeptualisierungen durchgeführten Abgrenzungen finden sich in Anhang B (vgl. dazu auch Tab. 4.2-3).

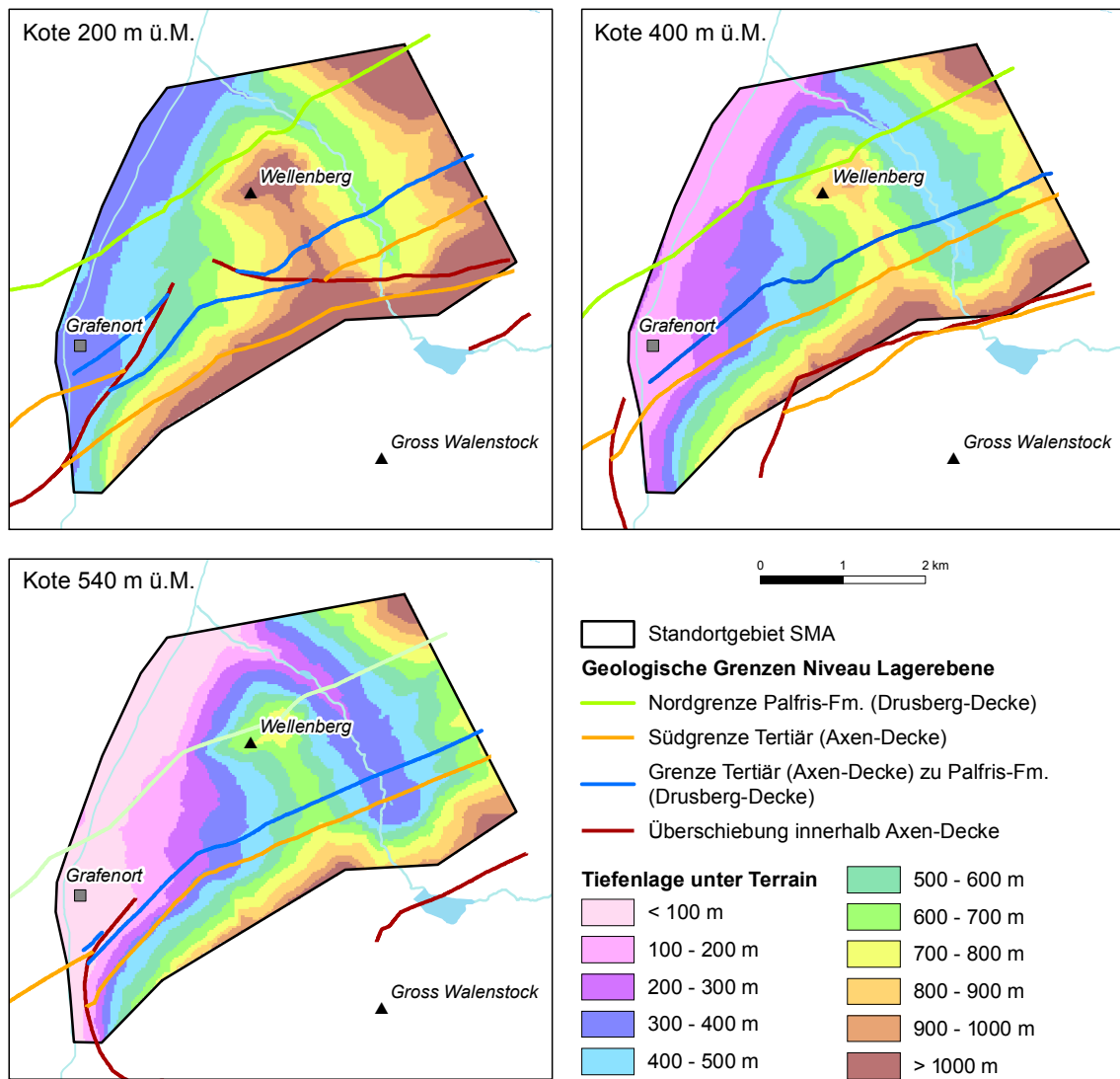


Fig. 4.2-24: Tiefe unter Terrain der verschiedenen Lagerebenen (Zeitpunkt heute), vgl. Nagra (2014b, Dossier III).

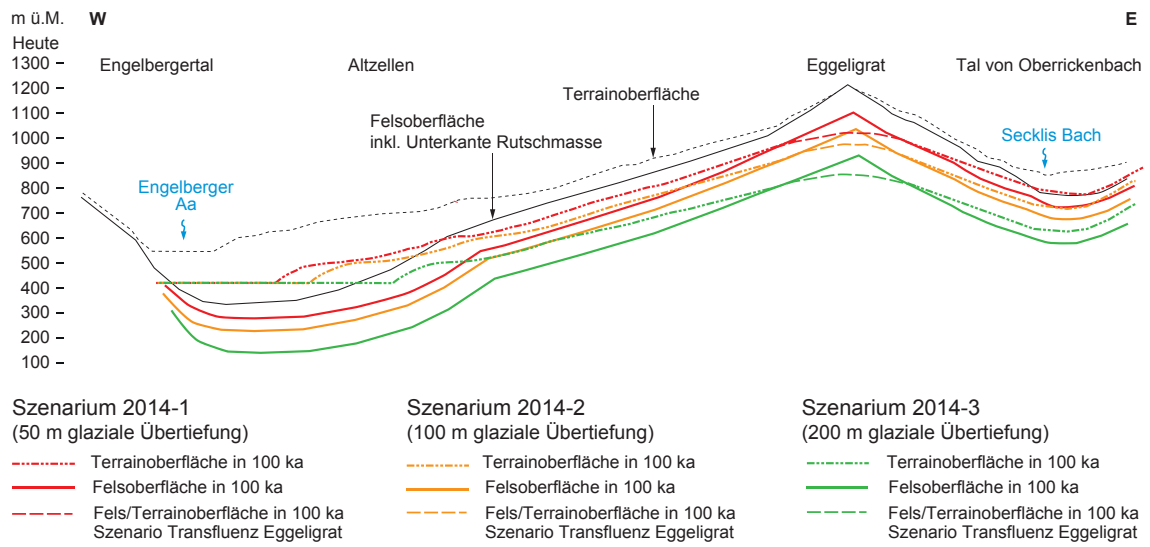


Fig. 4.2-25: Profile zur Tiefenlage von Bezugshorizonten am Ende des Betrachtungszeitraums von 100'000 Jahren für drei Szenarien zur Erosion, vgl. Nagra (2014b, Dossier III).

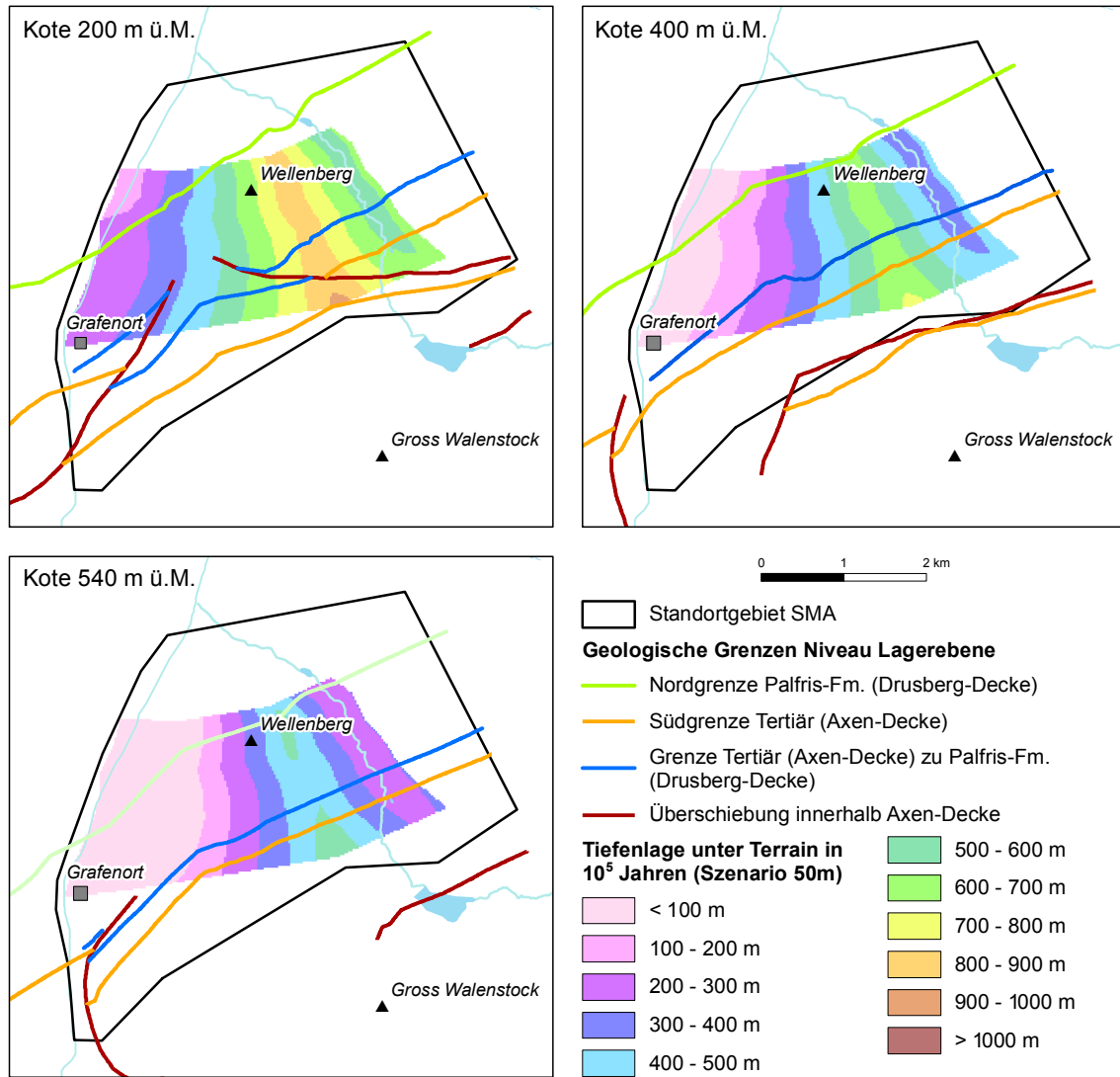


Fig. 4.2-26a: Tiefe der Lagerebenen unter Terrain nach 100'000 Jahren für das Szenarium mit einer glazialen Übertiefung von 50 m, vgl. Nagra (2014b, Dossier III).

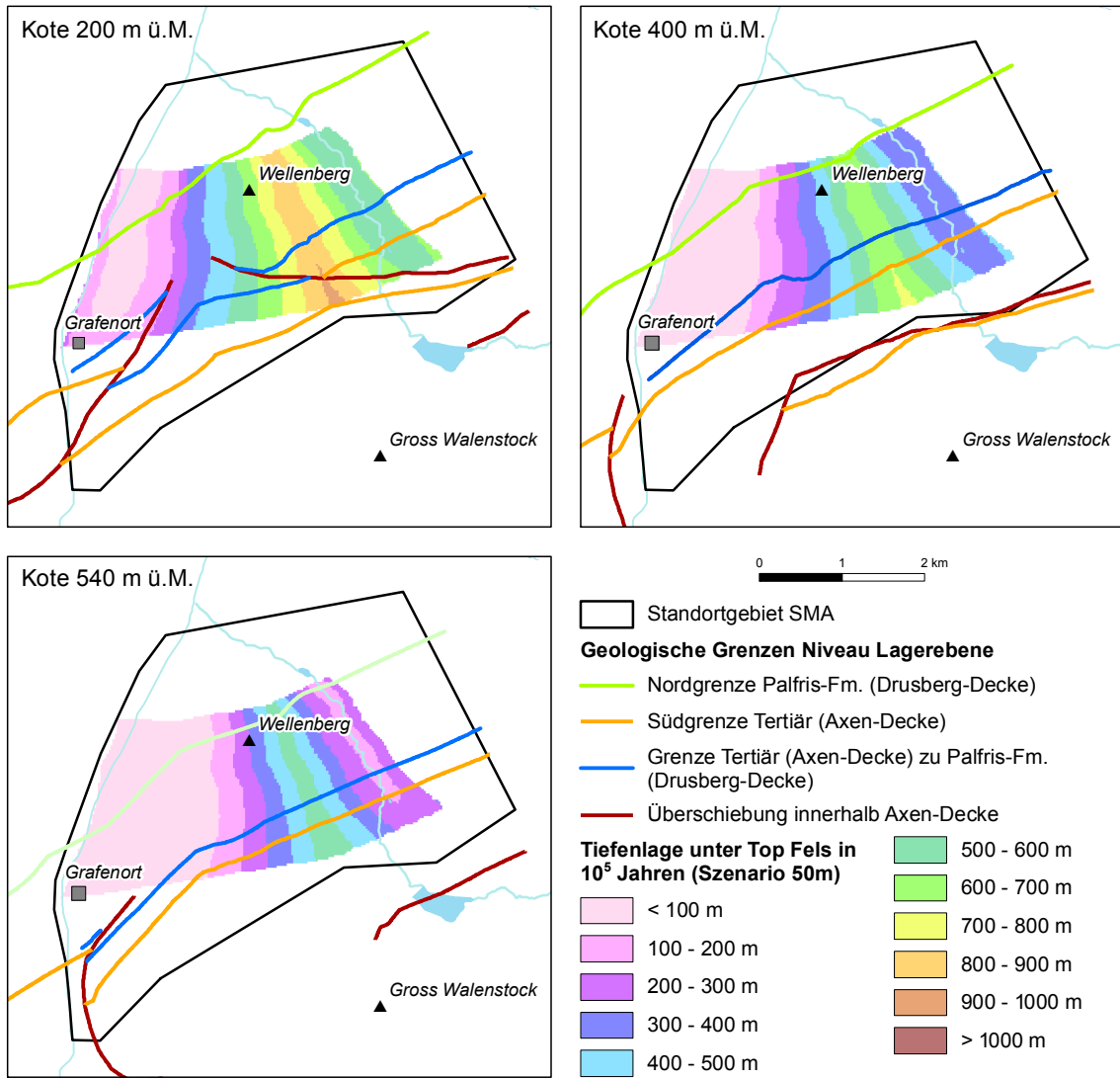


Fig. 4.2-26b: Tiefe der Lagerebenen unter Oberfläche Fels nach 100'000 Jahren für das Szenarium mit einer glazialen Übertiefung von 50 m, vgl. Nagra (2014b, Dossier III).

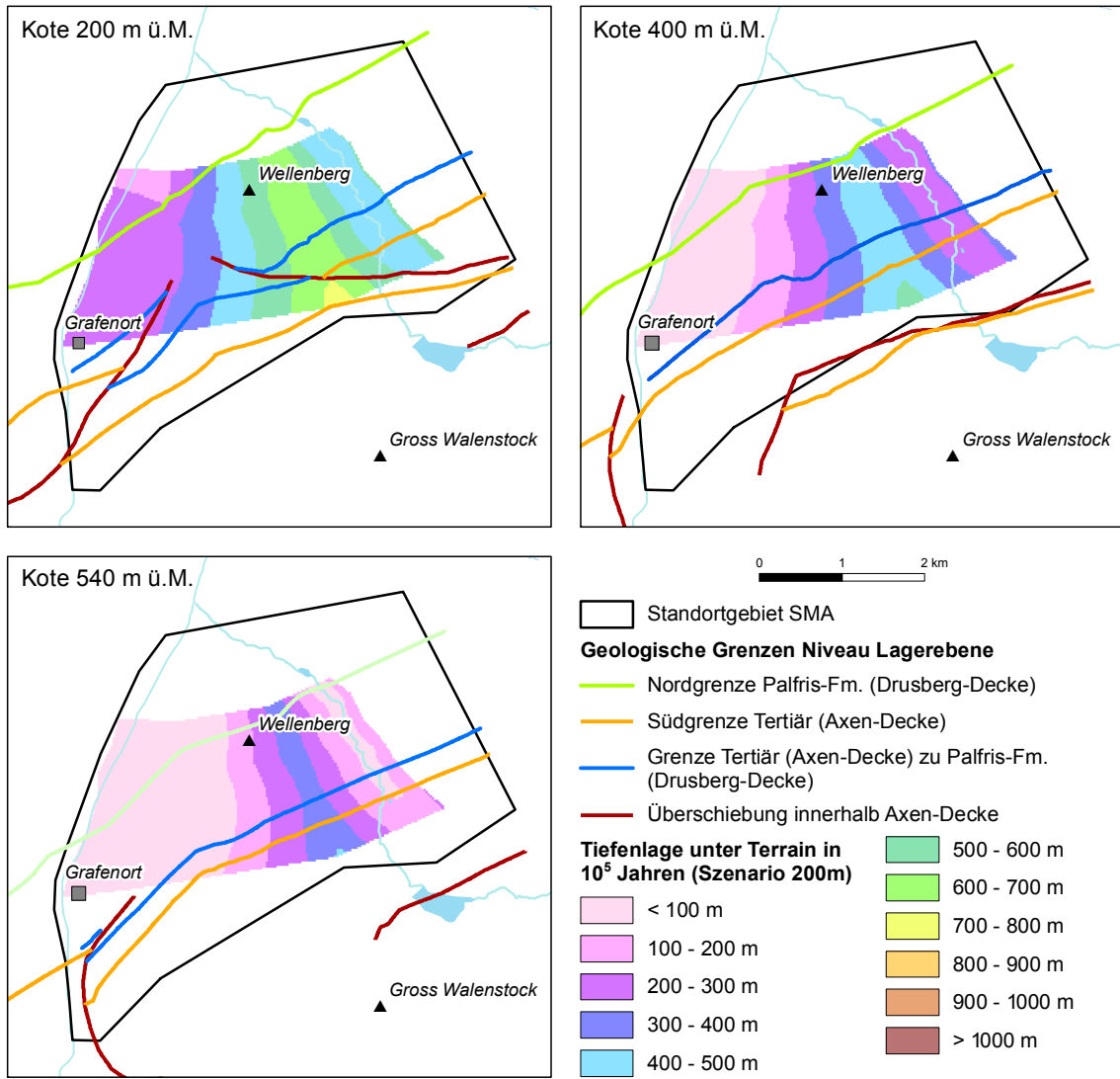


Fig. 4.2-27a: Tiefe der Lagerebenen unter Terrain nach 100'000 Jahren für das Szenarium mit einer glazialen Übertiefung von 200 m, vgl. Nagra (2014b, Dossier III).

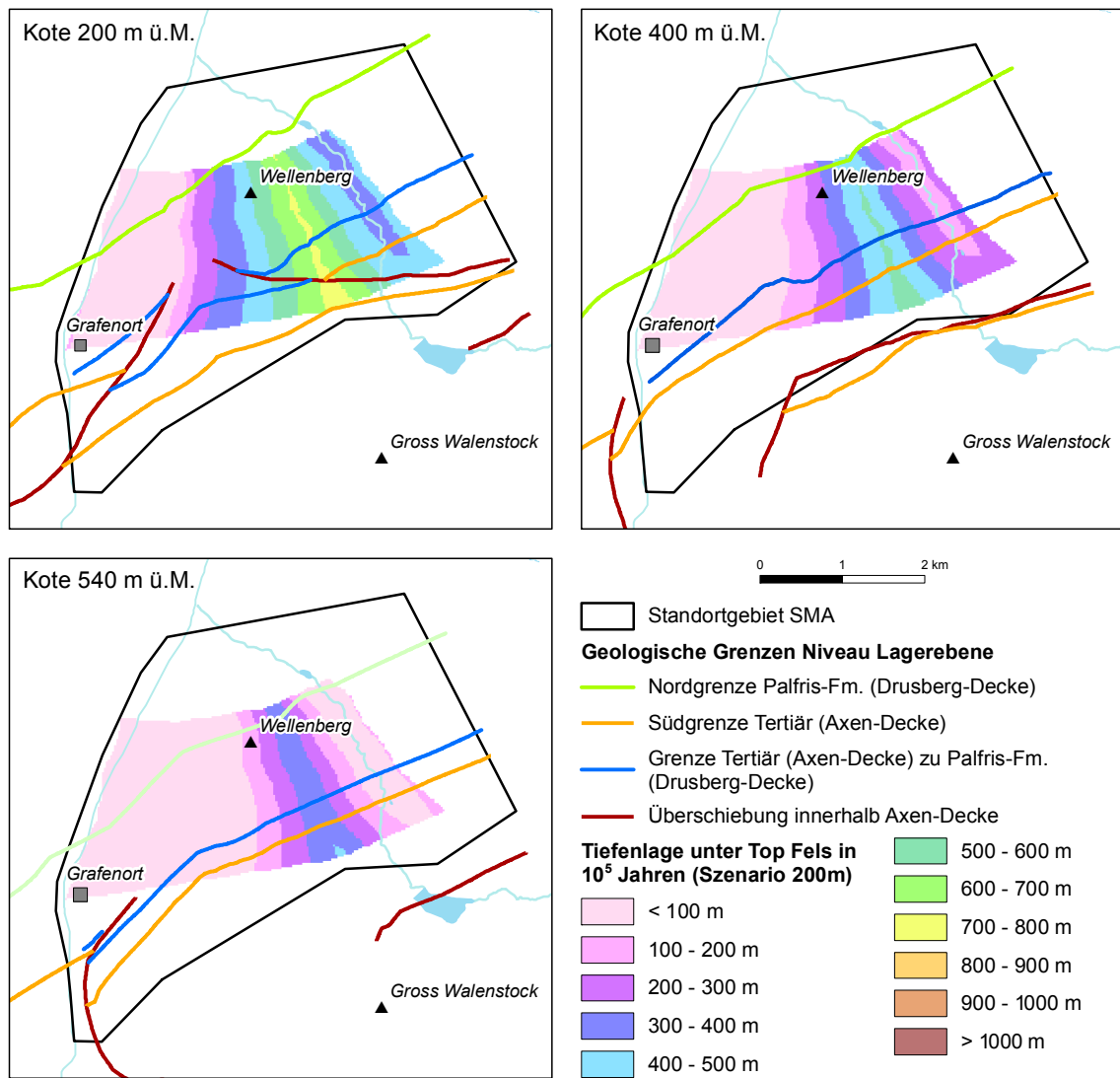


Fig. 4.2-27b: Tiefe der Lagerebenen unter Oberfläche Fels nach 100'000 Jahren für das Szenarium mit einer glazialen Übertiefung von 200 m, vgl. Nagra (2014b, Dossier III).

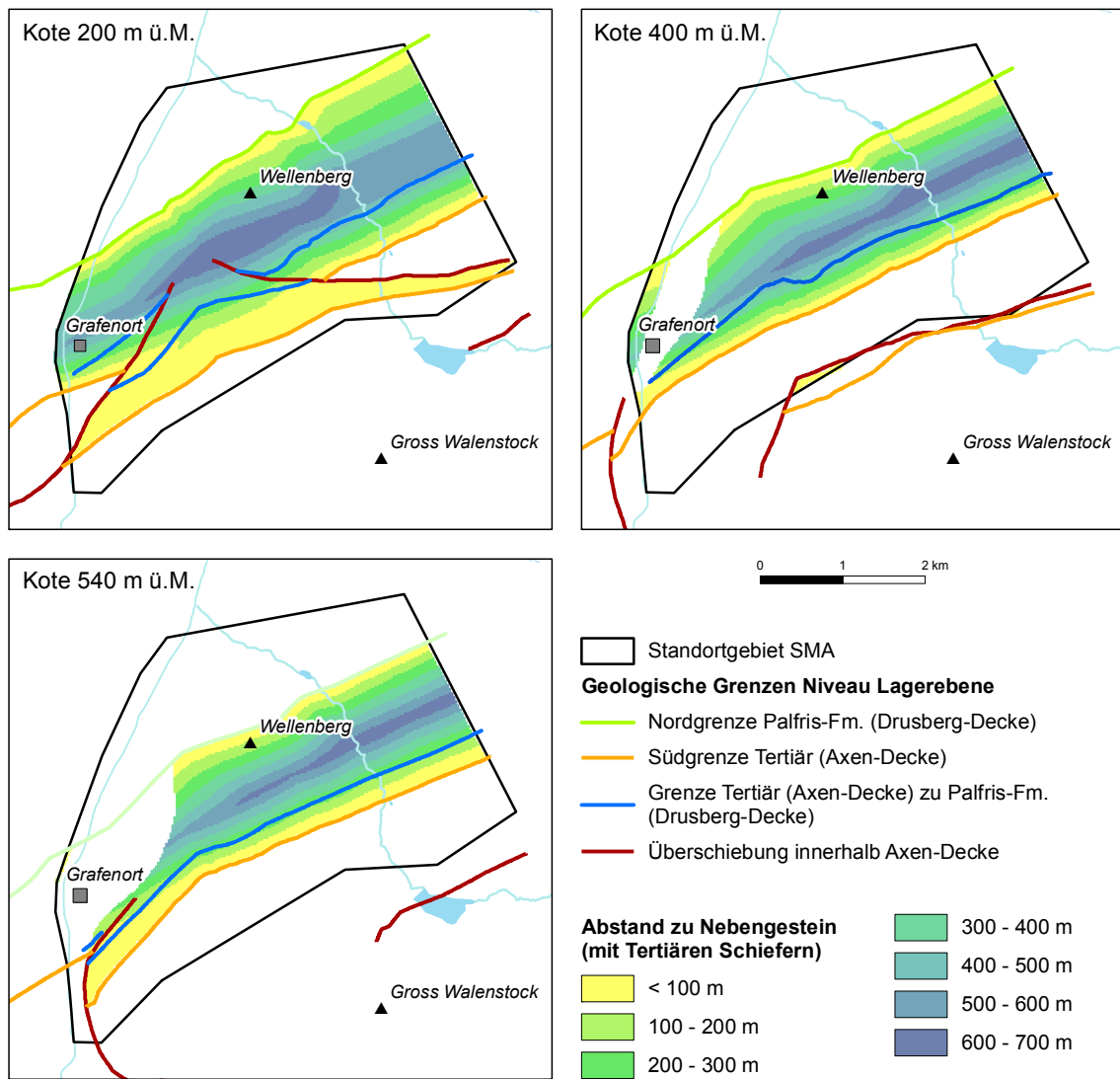


Fig. 4.2-28a: Abstand zu Nebengestein für den "massgebenden Fall", wo die Palfris-Formation und das Tertiär als Wirtgestein genutzt werden, abgeleitet aus 3D-Modell des Wirtgesteinskörpers Wellenberg, vgl. Nagra (2014b, Dossier II).

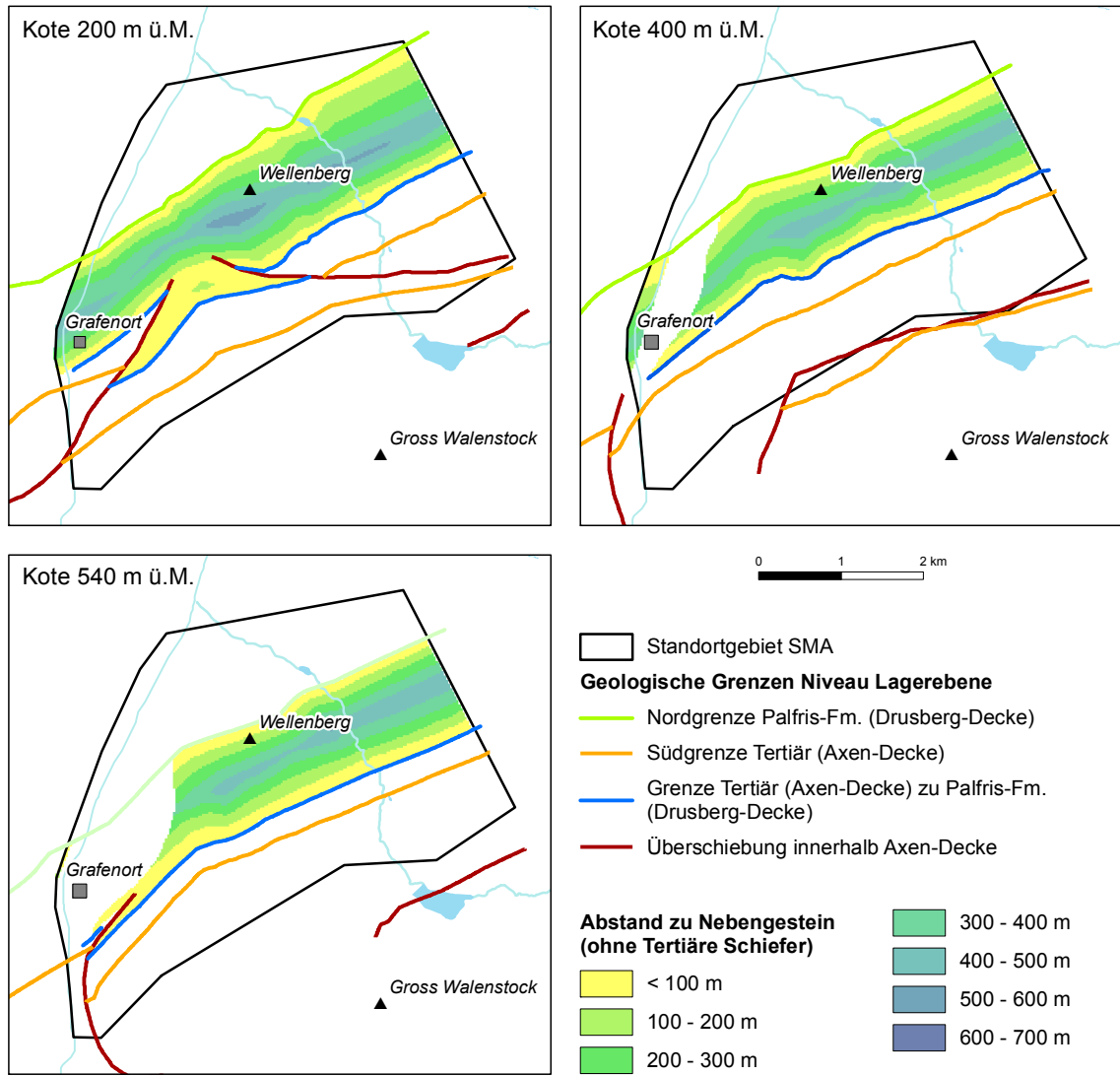


Fig. 4.2-28b: Abstand zu Nebengestein für den "massgebenden Fall", wo nur die Palfris-Formation als Wirtgestein genutzt wird, abgeleitet aus 3D-Modell des Wirtgesteinskörpers Wellenberg, vgl. Nagra (2014b, Dossier II).

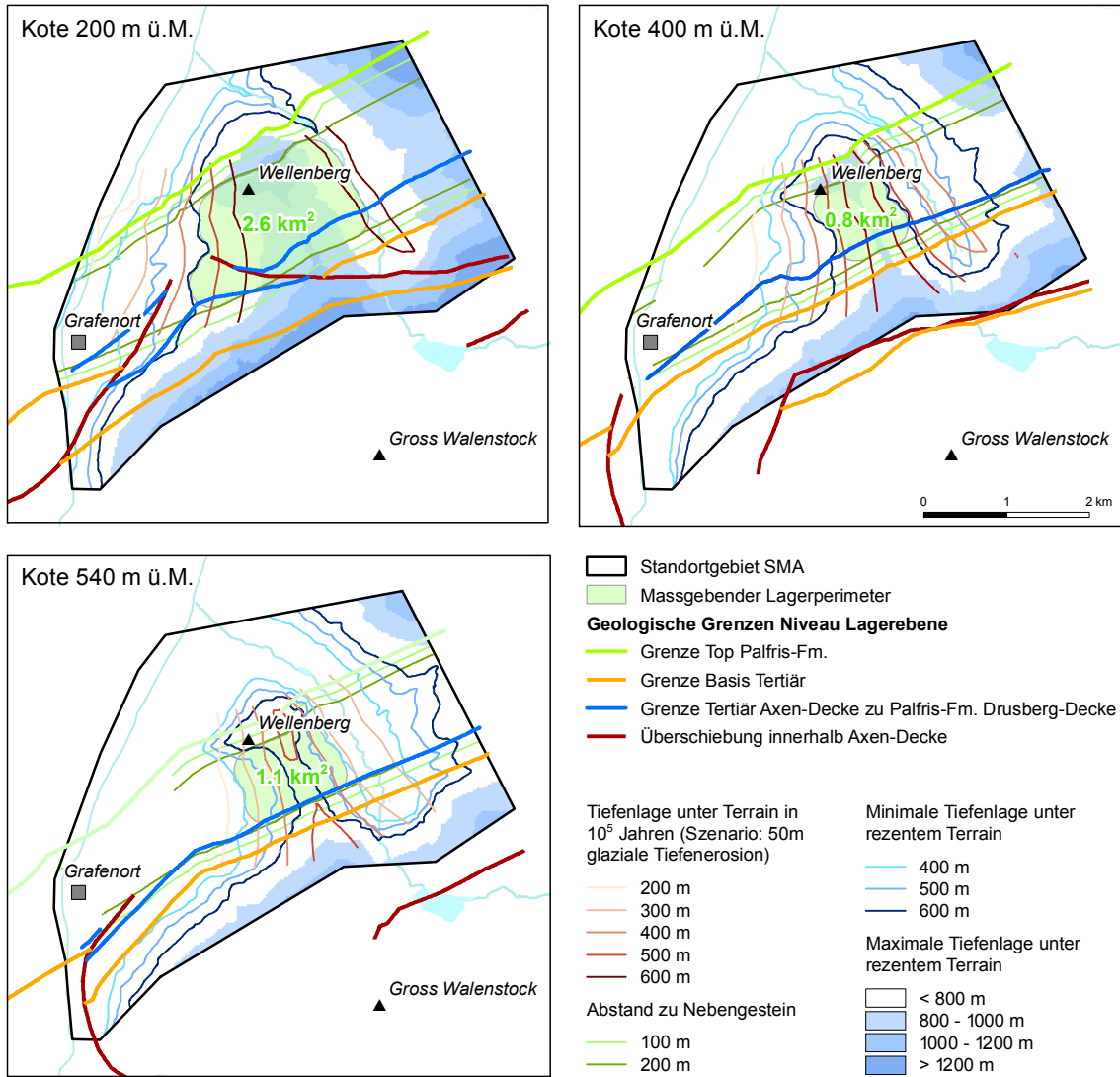


Fig. 4.2-29: Lagerperimeter für das SMA-Lager im geologischen Standortgebiet Wellenberg (WLB): Lagerperimeter nach der Optimierung für die drei Lagerebenen 540 m ü.M., 400 m ü.M. und 200 m ü.M.; massgebender Lagerperimeter für die Einengung (Teilschritt 2).

4.2.5 Tabellarische Übersicht der betrachteten Lagerperimeter

In nachfolgender Tabelle findet sich eine Zusammenstellung der betrachteten Lagerperimeter, die auch als Figuren im Anhang B dargestellt sind.

Tab. 4.2-3: Ausgewählte Kenndaten für die relevanten Lagerperimeter¹³⁵ sowie Erläuterungen zu den Ungewissheiten und Sensitivitäten.

Die aufgeführten Tiefenlagen entsprechen den effektiv verwendeten Optimierungsanforderungen, ausser wenn sie eingeklammert sind. Wenn eingeklammert, wurde der betreffende Indikator bei der Optimierung nicht benutzt oder hatte keinen Einfluss. Die mit einem Stern (*) markierten Lagerperimeter werden in die qualitative Bewertung einbezogen (vgl. Anhang C.3). Alle abgegrenzten Lagerperimeter sind in Anhang B abgebildet.

- 1) In den Kürzeln der Lagerperimeter steht "mLE" für massgebender Lagerperimeter für die Einengung, "aL1" für alternativer Lagerperimeter 1, "aL2" für alternativer Lagerperimeter 2 und "aLi" für alternativer Lagerperimeter i. "r", "t" und "u" stehen für die Varianten "Referenzwerte", "tief" und "untief" bezüglich Tiefenlage der Wirtgesteine zur Berücksichtigung der Ungewissheiten.
- 2) Indikator 'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteins-Dekompaktion'.
- 3) Indikator 'Tiefenlage unter lokaler Erosionsbasis im Hinblick auf die Bildung neuer Rinnen'. [m u.E.] bedeutet [m unter lokaler Erosionsbasis].
- 4) Indikator 'Tiefenlage im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit (u.B. Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften)'.
- 5) Dort, wo zwei Zahlen oder mehr aufgeführt sind, ergeben sich in der Abgrenzung mehrere Flächen, von welchen nur eine einzige für die Einengungsentscheide genutzt wird. Diese wird als prioritäre Fläche bezeichnet. Die weiteren Flächen sind eingeklammert.
- 6) Der Ausdruck "grösser" bedeutet in dieser Tabelle, dass im GIS-Schneideprozess mit einer Tiefe des Wirtgesteins gerechnet wurde, die grösser ist als im Referenzfall (Ungewissheiten in Richtung grösserer Tiefen). Analog bedeutet der Ausdruck "geringer", dass im GIS-Schneideprozess mit einer Tiefe des Wirtgesteins gerechnet wurde, die geringer ist als im Referenzfall (Ungewissheiten in Richtung geringerer Tiefen).

¹³⁵ In dieser Tabelle sind die massgebenden Lagerperimeter (kurz: mLE-r) für die Einengung und zudem alle alternativen Lagerperimeter, die zur Untersuchung der Sensitivitäten und Ungewissheiten verwendet werden, aufgeführt.

Tab. 4.2-3: (Fortsetzung)

Lagerperimeter ¹⁾	Minimale Tiefenlage [m u.T.] ²⁾	Minimale Tiefenlage [m u.E.] ³⁾	Maximale Tiefenlage [m u.T.] ⁴⁾	Einstufung, zusätzliche und modifizierte Anforderungen sowie Erläuterungen zu den Auswirkungen	Fläche ⁵⁾ [km ²]
SMA-SR-mLE-r (*)	(272)	100	(394)	Massgebender Lagerperimeter. Zusätzliche Anforderung: Meidung Neuhauserwald-Rinne.	3.7 (+2.7)
SMA-SR-aL1-r (*)	251	50	(426)	Zusätzliche Anforderung: Meidung Neuhauserwald-Rinne. Lockerung der Anforderungen an minimale Tiefenlage [m u.E.] gegenüber mLE ergibt markant grössere Fläche, aber unbefriedigende minimale Tiefenlage [m u.E.].	6.7 (+2.7)
SMA-SR-aL2-r	300	100	(394)	Leicht erhöhte Anforderung an minimale Tiefenlage [m u.T.] gegenüber mLE ergibt deutlich zu kleine Fläche.	1.9
SMA-SR-aL3-r (*)	251	100	(409)	Keine Meidung der Neuhauserwald-Rinne. Bei gleichen Anforderungen wie mLE ist resultierende Fläche deutlich grösser.	7.2
SMA-SR-aL4-t (*)	(318)	150	(448)	Zusätzliche Anforderung: Meidung Neuhauserwald-Rinne. Bei grösserer Tiefenlage WG ⁶⁾ können Anforderungen an minimale Tiefenlagen [m u.T.] bzw. [m u.E.] gegenüber mLE erhöht werden.	3.3 (+2.7)
SMA-SR-aL5-t (*)	300	100	(467)	Zusätzliche Anforderung: Meidung Neuhauserwald-Rinne. Bei grösserer Tiefenlage WG und Lockerung der Anforderung an minimale Tiefenlage [m u.E.] gegenüber vorangehendem Fall ergibt sich grössere Fläche.	6.4 (+2.7)
SMA-SR-aL6-u (*)	(224)	50	(349)	Bei geringerer Tiefenlage WG müssen Anforderungen an minimale Tiefenlagen ([m u.T.] und [m u.E.]) gegenüber mLE gelockert werden, um ausreichende Fläche zu erhalten.	4.0 (+2.9)
SMA-ZNO-mLE-r (*)	401	(297)	600	Massgebender Lagerperimeter.	6.5 (+3.8)
SMA-ZNO-mLE-r-manuell	401	(297)	600	Manuell optimiert, ausgehend vom massgebenden Lagerperimeter.	3.8
SMA-ZNO-aL1-r (*)	351	(281)	550	Bei Lockerung der minimalen Tiefenlage [m u.T.] gegenüber mLE resultiert ausreichend grosse Fläche bei günstigeren Bedingungen bzgl. maximaler Tiefenlage.	3.7

Tab. 4.2-3: (Fortsetzung)

Lagerperimeter ¹⁾	Minimale Tiefenlage [m u.T.] ²⁾	Minimale Tiefenlage [m u.E.] ³⁾	Maximale Tiefenlage [m u.T.] ⁴⁾	Einstufung, zusätzliche und modifizierte Anforderungen sowie Erläuterungen zu den Auswirkungen	Fläche ⁵⁾ [km ²]
SMA-ZNO-mLE-t (*)	400	(334)	600	Bei grösserer Tiefenlage WG ergibt sich mit mLE vergleichbaren Bedingungen immer noch ausreichende Fläche.	5.0
SMA-ZNO-mLE-u (*)	400	(299)	600	Bei geringerer Tiefenlage WG ergibt sich grosse Fläche.	10.9
SMA-NL-mLE-r (*)	(591)	(556)	749	Massgebender Lagerperimeter. Anforderung an Platzbedarf ist nicht erfüllt.	1.2
SMA-NL-aL1-r (*)	(589)	(532)	800	Erst bei Lockerung der Anforderungen an maximale Tiefenlage gegenüber mLE auf unbefriedigendes Niveau ergibt sich knapp ausreichende Fläche.	4.5
SMA-NL-aL1-t	(637)	(608)	799	Bei grösserer Tiefenlage WG wird Fläche viel zu klein, auch wenn Anforderungen an maximale Tiefenlage gegenüber mLE gelockert sind.	0.6
SMA-NL-mLE-u (*)	(541)	(461)	750	Auch bei geringerer Tiefenlage WG ergibt sich knapp akzeptable Fläche nur bei unbefriedigender Tiefenlage [m u.T.].	5.6
SMA-JO-mLE-r (*)	350	(78)	550	Massgebender Lagerperimeter.	23.4
SMA-JO-mLE-r-manuell	350	(213)	542	Manuell optimiert, ausgehend vom massgebenden Lagerperimeter.	4.6
SMA-JO-mLE-t (*)	(363)	(272)	550	Bei grösserer Tiefenlage WG vermindert sich Fläche stark bei gleichen Annahmen bzgl. maximaler Tiefenlage.	5.7 (+5.1 +3.2 +4.3)
SMA-JO-aL1-t	350	(85)	600	Bei grösserer Tiefenlage WG und Lockerung der Anforderungen an maximale Tiefenlage gegenüber mLE ergibt sich sehr grosse Fläche.	37.6
SMA-JO-mLE-u	350	(91)	(540)	Bei geringerer Tiefenlage WG ergibt sich sehr grosse Fläche.	20.0
SMA-JO-aL2-u (*)	350	(91)	500	Bei geringerer Tiefenlage WG ergibt sich noch ausreichend grosse Fläche bei günstigeren Bedingungen bzgl. maximaler Tiefenlage.	9.6 (+2.8)
SMA-JS-mLE-r (*)	(365)	(288)	600	Massgebender Lagerperimeter.	12.6
SMA-JS-mLE-r-manuell	(365)	(288)	602	Manuell optimiert, ausgehend vom massgebenden Lagerperimeter.	9.0

Tab. 4.2-3: (Fortsetzung)

Lagerperimeter ¹⁾	Minimale Tiefenlage [m u.T.] ²⁾	Minimale Tiefenlage [m u.E.] ³⁾	Maximale Tiefenlage [m u.T.] ⁴⁾	Einstufung, zusätzliche und modifizierte Anforderungen sowie Erläuterungen zu den Auswirkungen	Fläche ⁵⁾ [km ²]
SMA-JS-mLE-t	(435)	(360)	600	Bei grösserer Tiefenlage WG wird Fläche zu klein.	3.9
SMA-JS-aL1-t (*)	(435)	(360)	650	Bei grösserer Tiefenlage WG muss maximale Tiefenlage gegenüber mLE erhöht werden für ausreichend grosse Fläche.	8.3
SMA-JS-mLE-u	(287)	(211)	600	Bei geringerer Tiefenlage WG ergibt sich sehr grosse Fläche.	20.8
SMA-JS-aL2-u	301	(219)	500	Bei geringerer Tiefenlage WG und bei Lockerung der maximalen Tiefenlage [m u.T.] und Lockerung der Anforderungen an minimale Tiefenlage [m u.T.] gegenüber mLE ergibt sich knapp ausreichende Fläche.	5.8
SMA-JS-aL3-u (*)	301	(219)	550	Bei geringerer Tiefenlage WG und bei Erhöhung der maximalen Tiefenlage gegenüber vorangehendem Fall ergibt sich grosse Fläche.	16.6
SMA-WLB-mLE-r (*) Ebene 540 m ü.M. Ebene 400 m ü.M. Ebene 200 m ü.M.	404 601 601	(251) (441) (414)	(743) (935) (1139)	Massgebender Lagerperimeter.	1.1 +0.8 +2.6
SMA-WLB-mLE-re200 (*) Ebene 540 m ü.M. Ebene 400 m ü.M. Ebene 200 m ü.M.	404 601 601	(122) (307) (313)	(743) (935) (1139)	Gegenüber mLE ungünstigere Annahme zur glazialen Übertiefung (200 m statt 50 m).	1.1 +0.8 +2.6
SMA-WLB-aL1-r (*) Ebene 540 m ü.M. Ebene 400 m ü.M. Ebene 200 m ü.M.	401 605 601	(251) (442) (445)	(743) (935) (1139)	Gegenüber mLE Wirtgestein ohne tertiäre Schiefer, ergibt reduziertes Platzangebot.	0.9 +0.5 +1.8
SMA-WLB-aL1-re200 (*) Ebene 540 m ü.M. Ebene 400 m ü.M. Ebene 200 m ü.M.	401 605 601	(122) (306) (340)	(743) (935) (1139)	Gegenüber mLE Wirtgestein ohne tertiäre Schiefer und mit ungünstigeren Annahme zur glazialen Übertiefung (200 m statt 50 m), ergibt reduziertes Platzangebot.	0.9 +0.5 +1.8
SMA-WLB-aL2-r (*) Ebene 540 m ü.M. Ebene 400 m ü.M. Ebene 200 m ü.M.	404 503 502	(251) (357) (321)	(743) (932) (1139)	Gegenüber mLE reduzierte Überdeckung der Lagerebenen 400 m ü.M. und 200 m ü.M. auf 500 m, ergibt deutlich grösseres Platzangebot.	1.1 +1.4 +3.2

Tab. 4.2-3: (Fortsetzung)

Lagerperimeter ¹⁾	Minimale Tiefenlage [m u.T.] ²⁾	Minimale Tiefenlage [m u.E.] ³⁾	Maximale Tiefenlage [m u.T.] ⁴⁾	Einstufung, zusätzliche und modifizierte Anforderungen sowie Erläuterungen zu den Auswirkungen	Fläche ⁵⁾ [km ²]
HAA-ZNO-mLE-r (*)	(503)	451	699	Massgebender Lagerperimeter.	7.3
HAA-ZNO-mLE-r-manuell	(525)	453	699	Manuell optimiert, ausgehend vom massgebenden Lagerperimeter.	5.0
HAA-ZNO-aL1-r (*)	500	(417)	699	Bei Lockerung der Anforderungen an minimale Tiefenlage [m u.E.] gegenüber mLE erhöht sich Fläche.	9.3
HAA-ZNO-mLE-t (*)	(502)	450	700	Bei grösserer Tiefenlage WG ergibt sich gegenüber mLE grössere Fläche.	8.8
HAA-ZNO-mLE-u	(518)	450	699	Bei geringerer Tiefenlage WG ergibt sich ausreichend grosse Fläche.	5.1
HAA-ZNO-aL2-u (*)	500	(421)	699	Bei geringerer Tiefenlage WG und leichter Lockerung der Anforderungen an minimale Tiefenlage [m u.E.] gegenüber mLE ergibt sich leicht grössere Fläche.	7.3
HAA-NL-mLE-r (*)	(593)	(532)	800	Massgebender Lagerperimeter. Anforderung an Platzbedarf ist nicht erfüllt, bei unbefriedigender maximaler Tiefenlage.	4.2
HAA-NL-aL1-r (*)	(589)	(530)	850	Bei Verwendung grösserer maximaler Tiefenlage (unbefriedigendes Niveau) bleibt Fläche trotzdem knapp zu klein.	7.5
HAA-NL-aL2-r (*)	(589)	(530)	900	Erst wenn Anforderungen an maximale Tiefenlage gegenüber mLE auf sehr unbefriedigendes Niveau gelockert werden, ergibt sich ausreichend grosse Fläche.	10.6
HAA-NL-mLE-t	(639)	(609)	799	Bei grösserer Tiefenlage WG wird Fläche viel zu klein.	0.6
HAA-NL-aL1-t	(636)	(592)	849	Bei grösserer Tiefenlage WG resultiert auch bei Lockerung der Anforderungen an maximale Tiefenlage gegenüber mLE eine ungenügende Fläche.	3.1
HAA-NL-aL2-t	(636)	(593)	900	Bei grösserer Tiefenlage WG resultiert auch bei weiterer Lockerung der Anforderungen an maximale Tiefenlage gegenüber mLE keine ausreichend grosse Fläche.	5.9
HAA-NL-mLE-u (*)	(541)	(460)	800	Bei geringerer Tiefenlage WG ergibt sich bei unbefriedigender maximaler Tiefenlage eine genügend grosse Fläche.	9.8

Tab. 4.2-3: (Fortsetzung)

Lagerperimeter ¹⁾	Minimale Tiefenlage [m u.T.] ²⁾	Minimale Tiefenlage [m u.E.] ³⁾	Maximale Tiefenlage [m u.T.] ⁴⁾	Einstufung, zusätzliche und modifizierte Anforderungen sowie Erläuterungen zu den Auswirkungen	Fläche ⁵⁾ [km ²]
HAA-NL-aL3-u	(544)	(461)	750	Bereits bei leichter Erhöhung der Anforderungen bzgl. maximaler Tiefenlage gegenüber mLE wird Fläche zu klein.	5.3
HAA-JO-mLE-r (*)	400	200	(599)	Massgebender Lagerperimeter.	15.0
HAA-JO-mLE-r-manuell	400	201	(594)	Manuell optimiert, ausgehend vom massgebenden Lagerperimeter.	11.9
HAA-JO-aL1-r	450	201	(585)	Bereits bei leichter Erhöhung der Anforderungen an minimale Tiefenlage [m u.T.] gegenüber mLE nimmt Fläche stark ab und wird eher zu klein.	5.8
HAA-JO-aL2-r (*)	450	(177)	(585)	Falls Bildung Durchbruchsrinne nicht berücksichtigt wird, wird Fläche gegenüber vorangehendem Fall etwas grösser und knapp ausreichend.	6.4
HAA-JO-aL3-r	(419)	250	(578)	Schon bei leichter Erhöhung der Anforderungen an minimale Tiefenlage [m u.E.] gegenüber mLE resultiert zu kleine Fläche.	3.0
HAA-JO-aL4-r	451	250	(578)	Wenn gegenüber vorangehendem Fall auch Anforderungen an minimale Tiefenlage [m u.T.] leicht erhöht werden, ergibt sich viel zu kleine Fläche.	2.1
HAA-JO-aL4-t (*)	451	250	(662)	Bei grösserer Tiefenlage WG ergibt sich grosszügige Fläche.	14.5
HAA-JO-aL5-u (*)	350	151	(539)	Bei geringerer Tiefenlage WG müssen Anforderungen an minimale Tiefenlage ([m u.T.] bzw. [m u.E.]) gegenüber mLE gelockert werden, um ausreichend grosse Fläche zu erhalten.	16.3
HAA-JO-aL6-u (*)	400	151	(535)	Bei geringerer Tiefenlage WG und Erhöhung der Anforderungen an minimale Tiefenlage [m u.T.] gegenüber vorangehendem Fall ist Fläche nur noch knapp ausreichend gross.	6.3

4.3 Prüfung der sicherheitstechnischen Eignung und Gleichwertigkeit der geologischen Standortgebiete sowie Bewertung der Wirksamkeit der Barrierensysteme

4.3.1 Vorgehen und verwendete Grundlagen

Ziel dieses Kapitels ist die Prüfung der sicherheitstechnischen Eignung und Gleichwertigkeit der geologischen Standortgebiete anhand von Dosisberechnungen für die optimierten Lagerperimeter aus Kap. 4.2. Die dazu durchgeführten Dosisberechnungen werden auch für die Ableitung von Hinweisen für die qualitative Bewertung ausgewählter Indikatoren in Kap. 4.4 verwendet.

Ausgangspunkt sind die in Etappe 1 identifizierten geologischen Standortgebiete für das SMA- und HAA-Lager und die in Kap. 3 festgelegten prioritären Wirtgesteine sowie die in Kap. 4.2 abgegrenzten massgebenden Lagerperimeter für die Einengung. Für die Dosisberechnungen wird das in Kap. 2.3.4 beschriebene Vorgehen umgesetzt: Basierend auf detaillierten Unterlagen und Überlegungen zu den relevanten Prozessen und Parametern werden die Rechenfälle und die zugehörigen Inputdaten für die Ermittlung der charakteristischen Dosisintervalle festgelegt und die Dosisberechnungen durchgeführt. Die diesbezüglichen Unterlagen und Überlegungen sind in Nagra (2014a) dokumentiert.

Gemäss ENSI-Vorgabe wird anhand von charakteristischen Dosisintervallen geprüft, ob die verschiedenen Standortgebiete für das SMA- bzw. HAA-Lager sicherheitstechnisch geeignet und gleichwertig sind. Standortgebiete, welche die Anforderungen bezüglich Sicherheit und sicherheitstechnischer Gleichwertigkeit erfüllen, qualifizieren sich für den nächsten Bewertungsschritt (qualitative Bewertung) in Kap. 4.4, andernfalls werden sie zurückgestellt.

Die Dosisberechnungen zur Ermittlung der charakteristischen Dosisintervalle und zur Ableitung von Hinweisen aus den Dosisberechnungen für die qualitative Bewertung ausgewählter Indikatoren basieren auf den gleichen Annahmen, die in Kap. 3.2 für die Dosisberechnungen für diejenigen Standortgebiete verwendet wurden, in denen zwei Wirtgesteine vorkommen¹³⁶. Die Dosiskurven für den Opalinuston in den Standortgebieten Zürich Nordost, Nördlich Lägern und Jura-Südfuss werden deshalb unverändert aus Kap. 3.2 übernommen.

Die Unterlagen zu den Dosisberechnungen sowie die Resultate der durchgeführten Berechnungen sind in Nagra (2014a) dargestellt und werden dort auch diskutiert. Alle Resultate der Dosisberechnungen und die zugehörigen Inputparameter sind im elektronischen Daten- und Resultate-Ordner abgelegt (Nagra 2014g).

Nachfolgend werden die Resultate der Dosisberechnungen zusammengefasst: Zunächst werden die Ergebnisse der Dosisberechnungen im Hinblick auf die Ermittlung der charakteristischen Dosisintervalle für die geologischen Standortgebiete für das SMA- und HAA-Lager diskutiert. Danach erfolgt eine Ableitung von Hinweisen aus den Dosisberechnungen für die qualitative Bewertung ausgewählter Indikatoren.

4.3.2 Charakteristische Dosisintervalle

Für die geologischen Standortgebiete und ihre zugehörigen optimierten Lagerperimeter wurden für die vom ENSI festgelegten Rechenfälle (vgl. Tab. 2.1-4) sowie für den "massgebenden Fall für die Einengung" Dosisberechnungen durchgeführt; d.h. der "massgebende Fall für die Ein-

¹³⁶ Vergleiche Kap. 3.2 für eine Beschreibung der Annahmen für die Dosisberechnungen.

engung" wird zusätzlich zu den ENSI-Fällen zur Bestimmung des charakteristischen Dosisintervalls herangezogen. Der "massgebende Fall für die Einengung" wurde in Kap. 3.1 und Kap. 4.2 definiert.

Die Dosisberechnungen basieren auf den in Nagra (2014a) und Nagra (2014b) definierten Datensätzen. Die Dosisberechnungen wurden zur Illustration des Systemverhaltens über den Betrachtungszeitraum hinaus bis 1 Million Jahre (SMA-Lager) und 10 Millionen Jahre (HAA-Lager) durchgeführt mit den gleichen Parameterwerten wie im bzw. am Ende des Betrachtungszeitraums.

Eine zusammenfassende Darstellung der Dosiskurven für das SMA- und das HAA-Lager findet sich in Fig. 4.3-1. Die Darstellung enthält auch die charakteristischen Dosisintervalle, welche sich aus den Dosismaxima für den Referenzfall und für den Rechenfall mit den höchsten Dosen innerhalb des Betrachtungszeitraums von 100'000 Jahren für das SMA-Lager bzw. 1 Million Jahre für das HAA-Lager ergeben¹³⁷.

Fig. 4.3-1 zeigt, dass alle SMA- und HAA-Standortgebiete sicherheitstechnisch geeignet sind, weil der obere Rand des charakteristischen Dosisintervalls jeweils unterhalb des Schutzkriteriums 1 der Richtlinie G03 (ENSI 2009) von 0.1 mSv/a liegt. Sie sind zudem gemäss ENSI (2010a) als sicherheitstechnisch gleichwertig zu betrachten, weil der obere Rand aller Dosisintervalle unterhalb von 0.01 mSv/a zu liegen kommt.

Die Analyse der Dosiskurven bzw. der charakteristischen Dosisintervalle für die SMA-Standortgebiete in Fig. 4.3-1a zeigt, dass der obere Rand der charakteristischen Dosisintervalle jeweils durch einen ENSI-Fall bestimmt wird. Der deutlich niedrigere untere Rand der Dosisintervalle für die SMA-Standortgebiete Zürich Nordost und Nördlich Lägern im Vergleich zu den übrigen Standortgebieten der Nordschweiz begründet sich in der Tatsache, dass im Referenzfall für diese Standortgebiete keine zusätzlichen Freisetzungspfade unmittelbar am oberen oder unteren Rand des Wirtgesteins Opalinuston angenommen werden müssen, wodurch längere Transportdistanzen resultieren, so dass hier die Dosiskurve für den Referenzfall innerhalb des Betrachtungszeitraums von 100'000 Jahren ihr Maximum noch nicht erreicht hat. Der insgesamt höchste obere Rand für das Standortgebiet Wellenberg, welcher hier durch den ENSI-Fall "erhöhter grossräumiger Wasserfluss" bestimmt wird, lässt sich mit dem deutlich höheren oberen Eckwert für den grossräumigen Wasserfluss und dem unterstellten Kluftransport in den Mergel-Formationen des Helvetikums erklären.

Die Dosiskurven bzw. die charakteristischen Dosisintervalle für die HAA-Standortgebiete in Fig. 4.3-1b haben eine deutlich geringere Spannweite als jene für das SMA-Lager. Der Grund ist, dass beim SMA-Lager der obere und untere Rand der Dosisintervalle durch das relativ kurzlebige Radionuklid $^{14}\text{C}_{\text{org}}$ bestimmt werden. Unterschiede in der Transportzeit durch die geologische Barriere zwischen den Referenzfällen und den übrigen Fällen, die in der Grössenordnung der Halbwertszeit von $^{14}\text{C}_{\text{org}}$ und darüber liegen, können bedingt durch den radioaktiven Zerfall relativ grosse Unterschiede verursachen. Das beim HAA-Lager dosisdominierende Radionuklid ^{129}I hat hingegen eine deutlich längere Halbwertszeit im Vergleich mit den typischen Transportzeiten durch die geologische Barriere, weshalb hier die Dosisunterschiede deutlich geringer ausfallen.

¹³⁷ Vergleiche dazu auch die Erläuterungen zu den detaillierten Dosiskurven in Kap. 3.2.2.

Eine zusammenfassende Darstellung der charakteristischen Dosisintervalle ist in Fig. 4.3-2 enthalten. Die Analyse der detaillierten Dosiskurven (Fig. 4.3-3 bis 4.3-11) sowie der dazu gehörenden Unterlagen (konzeptuelle Modelle, hydraulische Eigenschaften der lithofaziellen Einheiten, Gradienten) ergibt folgendes Bild:

Die Dosismaxima für die SMA-Standortgebiete Zürich Nordost und Nördlich Lägern fallen für den Opalinuston ähnlich tief aus. Sowohl beim Referenzfall als auch bei den alternativen Fällen wird die Radionuklidfreisetzung wesentlich durch die Länge der massgebenden Freisetzungspfade in tonmineralreichen lithofaziellen Einheiten geprägt (insbesondere Opalinuston und Toniger Lias). Im Gegensatz dazu fallen die Dosismaxima für den Opalinuston in den SMA-Standortgebieten Südranden, Jura Ost und Jura-Südfuss höher aus, da dort die Rahmengesteine geringere Beiträge zur Barrierenwirkung liefern und die Länge des massgebenden Freisetzungspfad daher deutlich kürzer ausfällt als in den Standortgebieten Zürich Nordost und Nördlich Lägern. Hingegen sind die Dosiskurven für den "massgebenden Fall für die Einengung" für den Opalinuston in den fünf zutreffenden Standortgebieten fast identisch, da hier eine einheitliche Länge für den massgebenden Freisetzungspfad von 40 m angenommen wurde.

Demgegenüber fallen die höchsten Dosismaxima für das Standortgebiet Wellenberg höher aus als für die fünf Standortgebiete mit Opalinuston. Diese Dosismaxima sind einerseits auf die Annahme eines erhöhten grossräumigen Wasserflusses im Wirtgestein mit unterstelltem Klufttransport und andererseits auf die Annahme einer geringeren Länge der massgebenden Freisetzungspfade (20 m) zurückzuführen.

Die Dosismaxima für die HAA-Standortgebiete Zürich Nordost und Nördlich Lägern fallen ähnlich tief aus. Das Dosismaximum für das HAA-Standortgebiet Jura Ost fällt im Vergleich etwas höher aus, da dort im Referenzfall angenommen wurde, dass die oberen Rahmengesteine keinen Beitrag zur Barrierenwirkung liefern, weshalb die Länge des massgebenden Freisetzungspfad in diesen Rechenfällen deutlich kürzer ausfällt als in den HAA-Standortgebieten Zürich Nordost und Nördlich Lägern. Hingegen sind die Dosiskurven für den "massgebenden Fall für die Einengung" in den drei HAA-Standortgebieten identisch, da hier eine einheitliche Länge für den massgebenden Freisetzungspfad von 48 m (BE/HAA) bzw. 44 m (LMA) angenommen wurde.

Im Falle des Opalinustons wird die Radionuklidfreisetzung durch Diffusion dominiert; dies zeigt sich daran, dass die höchsten Dosismaxima in der Regel in den Rechenfällen mit ungünstigen Diffusionskoeffizienten in der Geosphäre und/oder Rechenfällen mit kurzen Transportpfadlängen auftreten. Zur letzteren Kategorie zählt der "massgebende Fall für die Einengung" (Vernachlässigung der Beiträge der Rahmengesteine zur Barrierenwirkung), aber auch die Rechenfälle mit geringeren Mächtigkeiten aller lithofaziellen Einheiten bzw. mit Freisetzungspunkt direkt angrenzend an den Opalinuston.

Im Falle des Standortgebiets Wellenberg erfolgt die Radionuklidfreisetzung teils diffusiv, teils advektiv: dies zeigt sich daran, dass die höchsten Dosismaxima einerseits für den Rechenfall mit erhöhtem grossräumigem Wasserfluss und andererseits für die Rechenfälle mit ungünstigen Diffusionskoeffizienten in der Geosphäre und/oder Rechenfällen mit kurzen Transportpfadlängen resultieren.

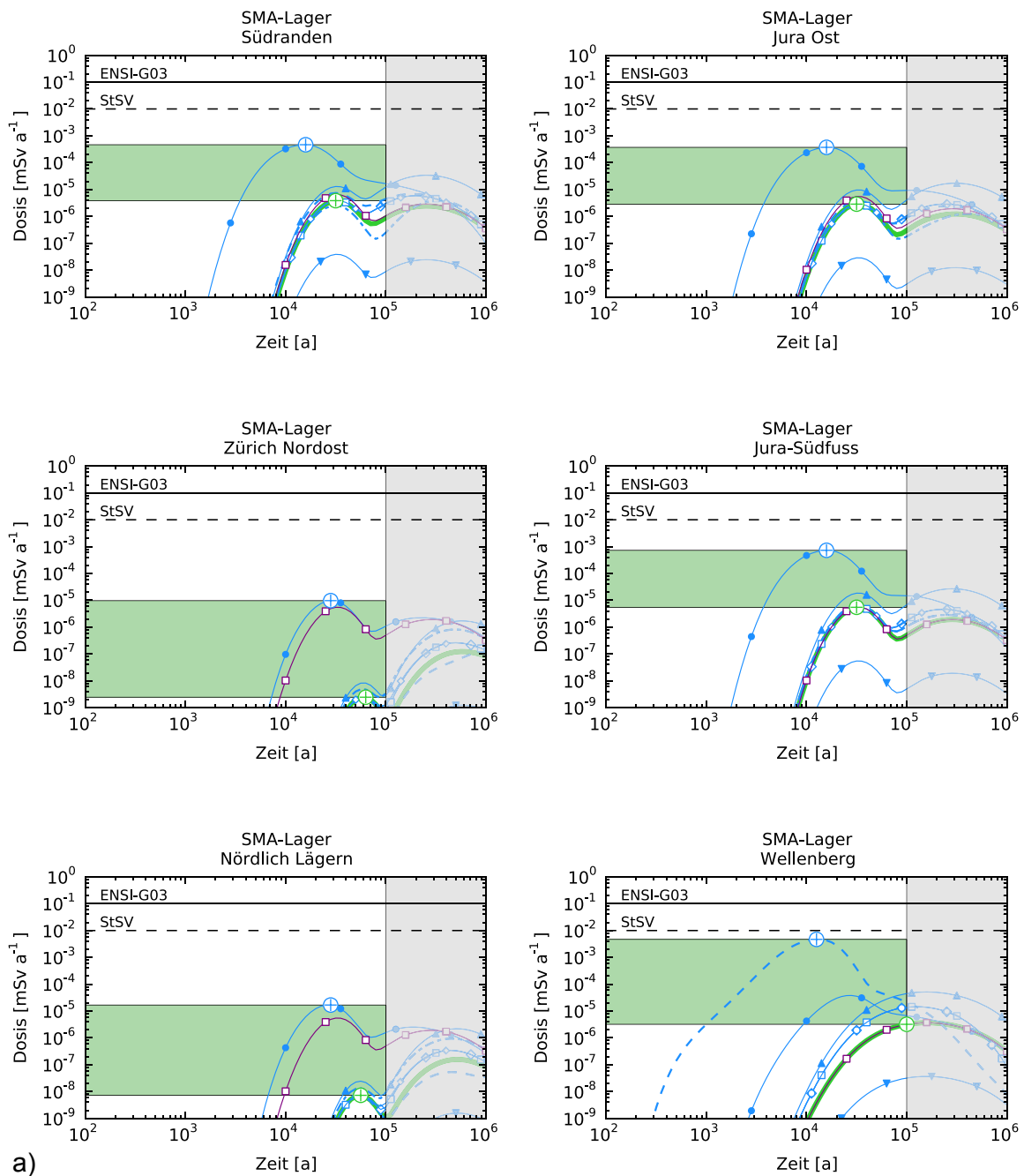


Fig. 4.3-1: Übersicht der Dosiskurven gemäss den Vorgaben des ENSI für die geologischen Standortgebiete sowie resultierende charakteristische Dosisintervalle, vgl. Nagra (2014a).

a) SMA-Lager, b) HAA-Lager. Darstellung der Dosiskurven für die Referenzfälle (grün) und die ENSI-Fälle (blau) gemäss den Vorgaben des ENSI (2010a) sowie die "massgebenden Fälle für die Einengung" (violett) pro Standortgebiet. Als "ENSI-Fälle" werden die in ENSI (2010a) für das standardisierte Parametervariationsverfahren definierten Rechenfälle bezeichnet. Der für die Dosisberechnungen verwendete "massgebende Fall für die Einengung" wurde in Kap. 3.1 und 4.2 definiert. Die resultierenden charakteristischen Dosisintervalle sind als horizontale grüne Balken dargestellt. Der grau markierte Bereich kennzeichnet den Zeitraum nach Ablauf des Betrachtungszeitraums.

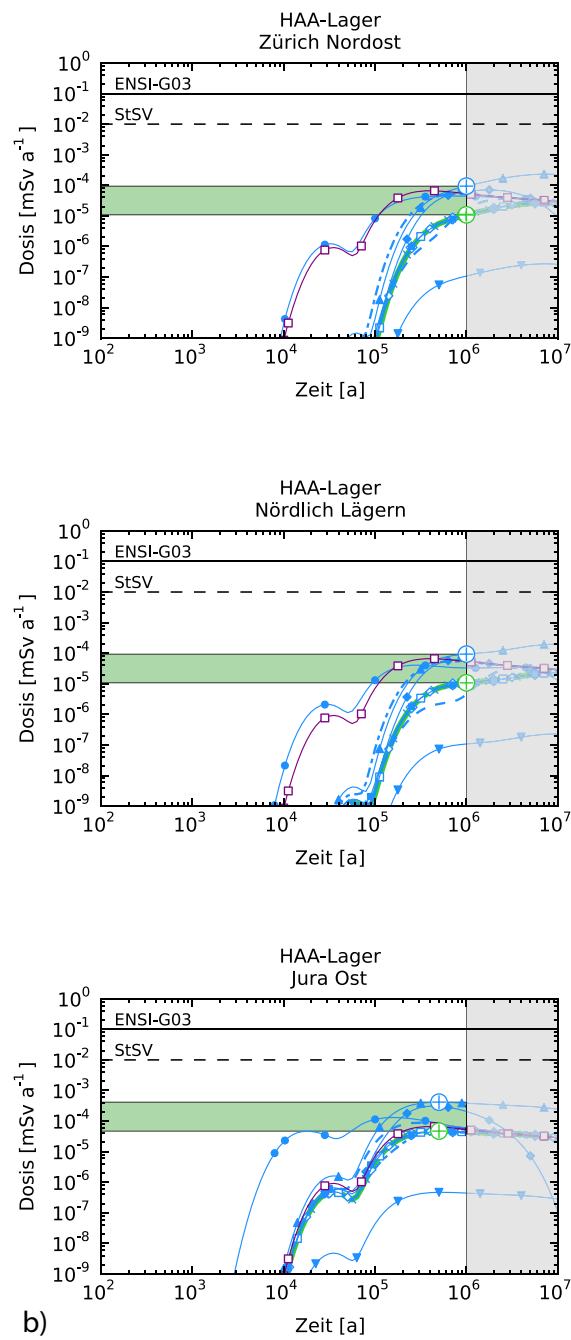


Fig. 4.3-1: (Fortsetzung)

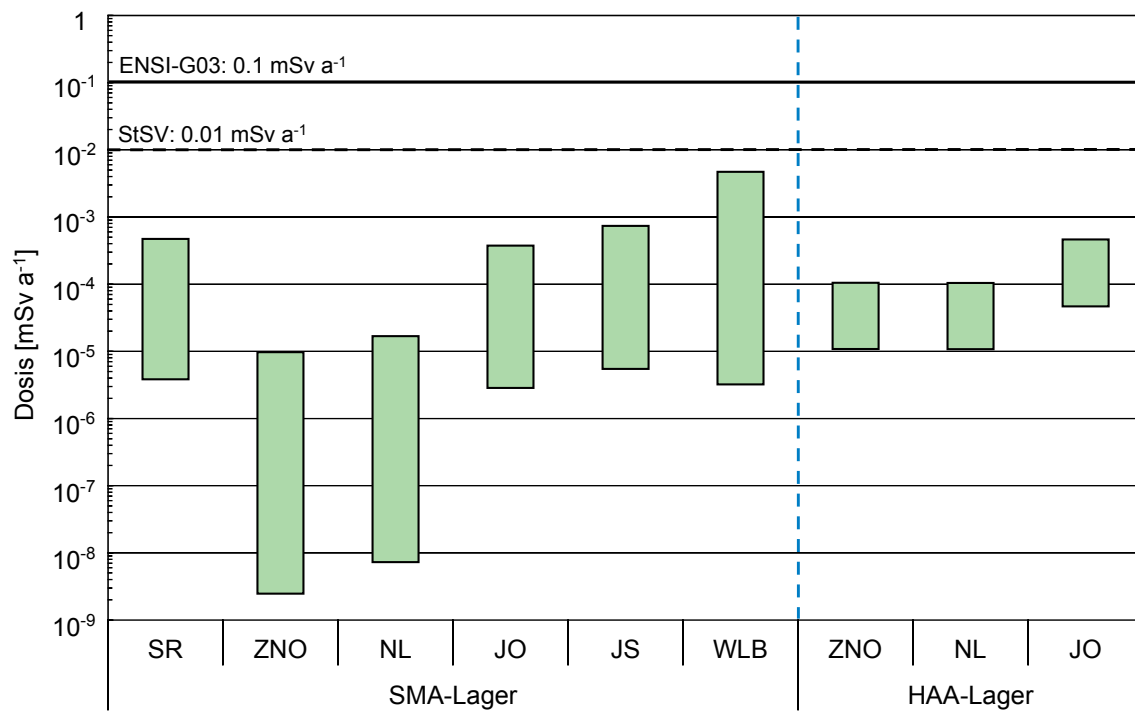


Fig. 4.3-2: Zusammenfassende Darstellung der charakteristischen Dosisintervalle gemäss den Vorgaben des ENSI für die verschiedenen geologischen Standortgebiete, vgl. Nagra (2014a).

Die charakteristischen Dosisintervalle ergeben sich aus den Dosismaxima für den Referenzfall (unterer Rand) und für den Rechenfall mit den höchsten Dosen (oberer Rand) innerhalb des Betrachtungszeitraums, wobei nur die ENSI-Fälle und der "massgebende Fall für die Einengung" verwendet werden (vgl. auch Fig. 4.3-1).

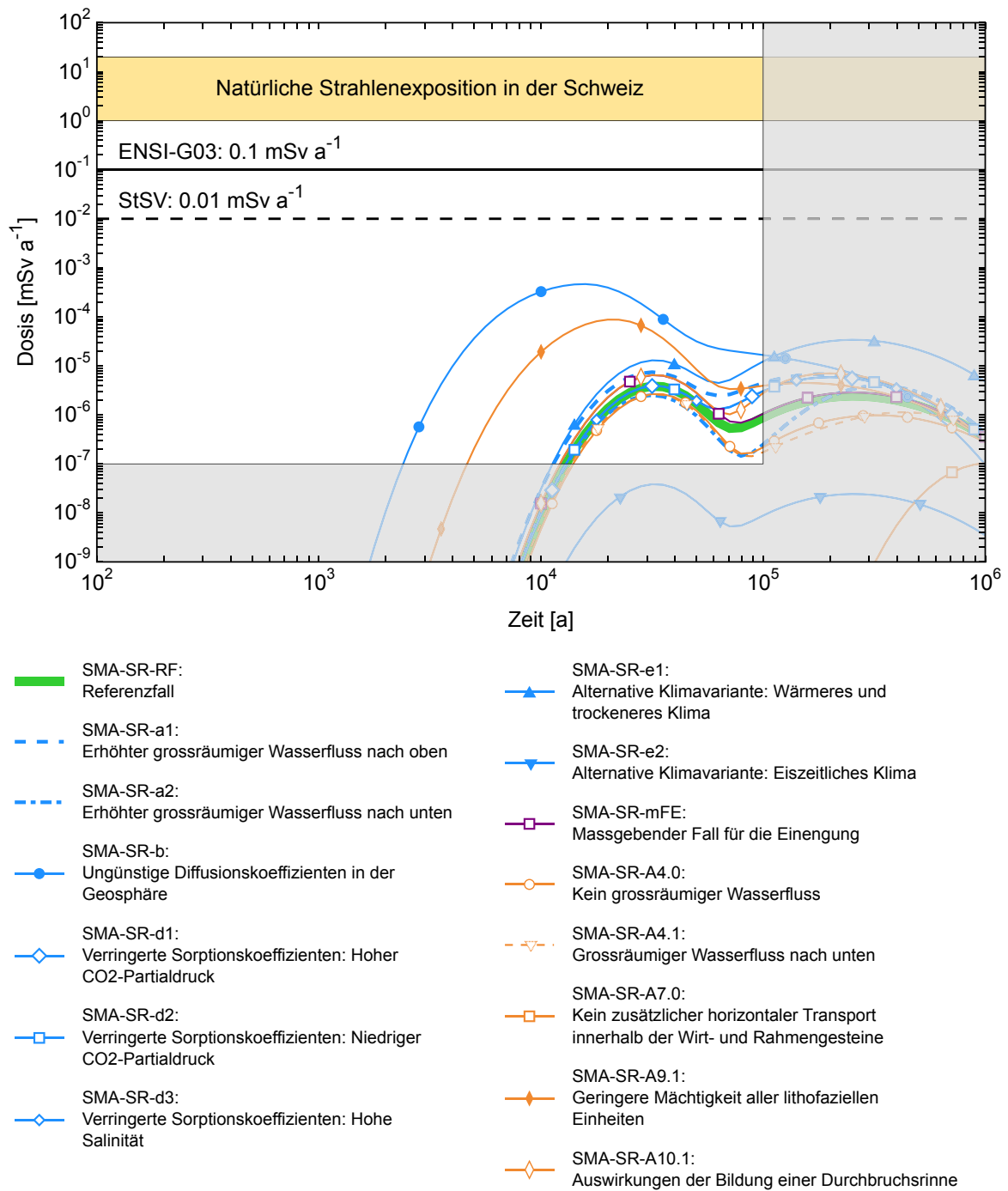


Fig. 4.3-3: Dosiskurven für das SMA-Lager im Standortgebiet Südranden (SMA-SR), vgl. Nagra (2014a).

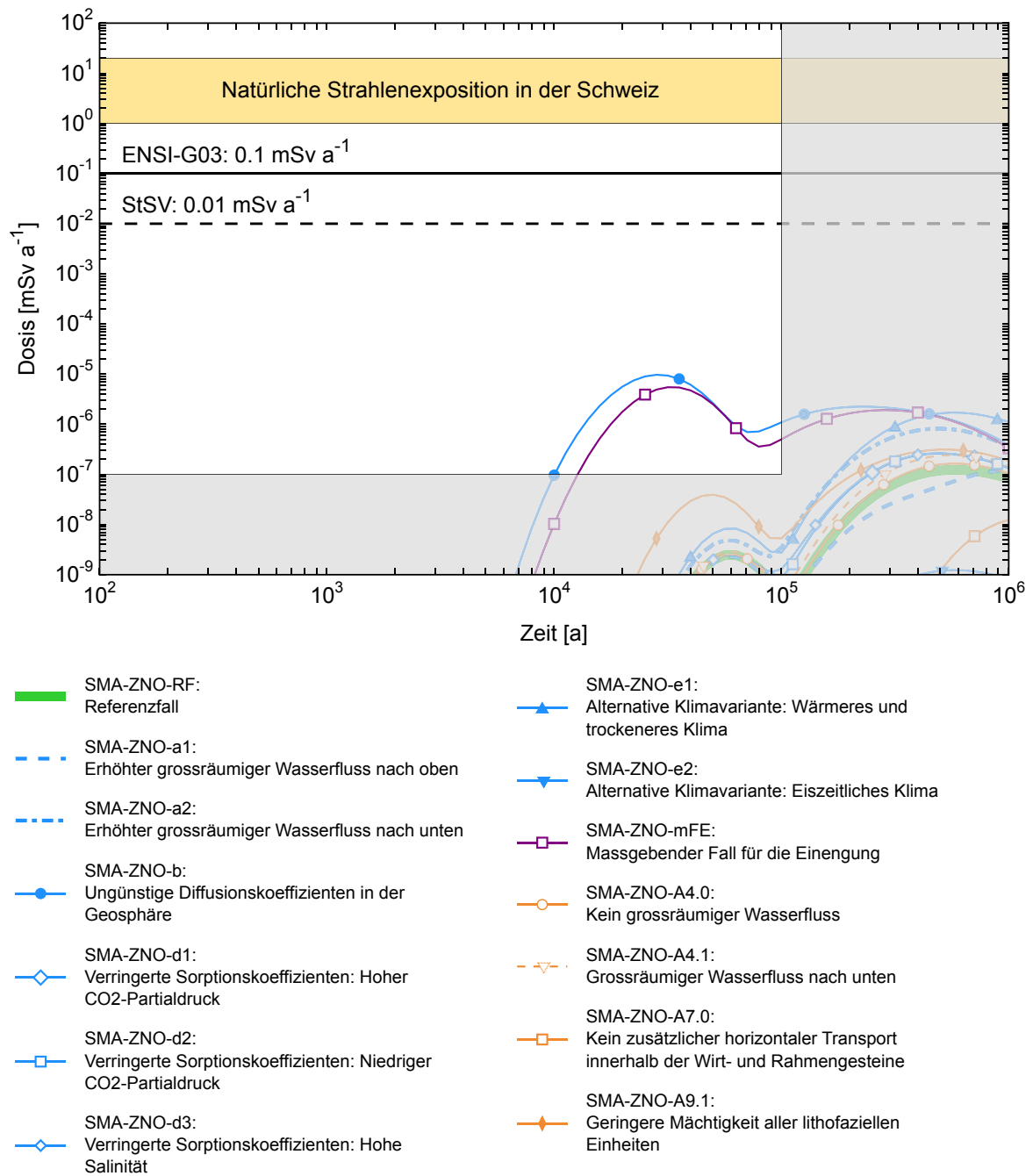


Fig. 4.3-4: Dosiskurven für das SMA-Lager im Standortgebiet Zürich Nordost (SMA-ZNO), vgl. Nagra (2014a).

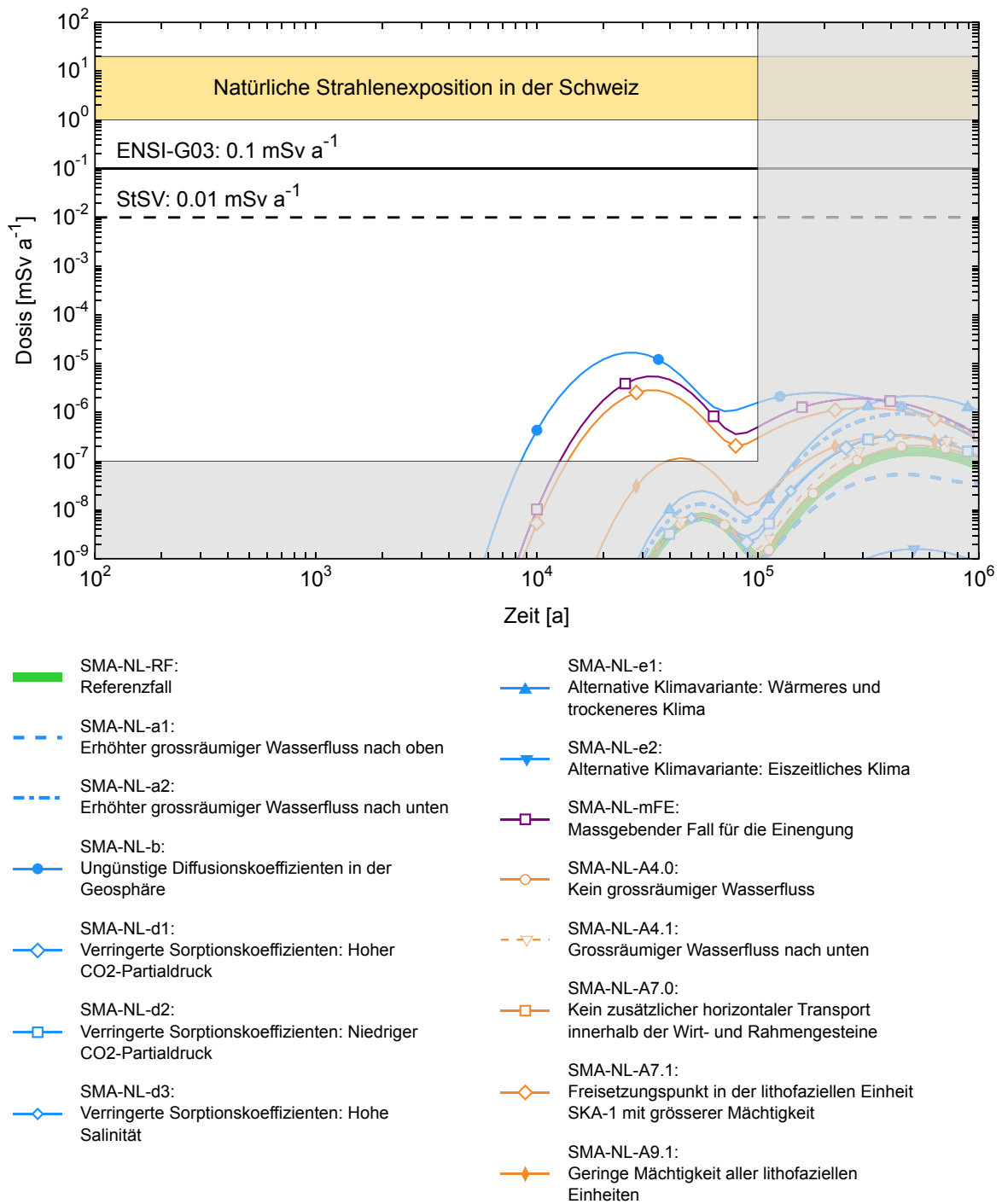


Fig. 4.3-5: Dosiskurven für das SMA-Lager im Standortgebiet Nördlich Lägern (SMA-NL), vgl. Nagra (2014a).

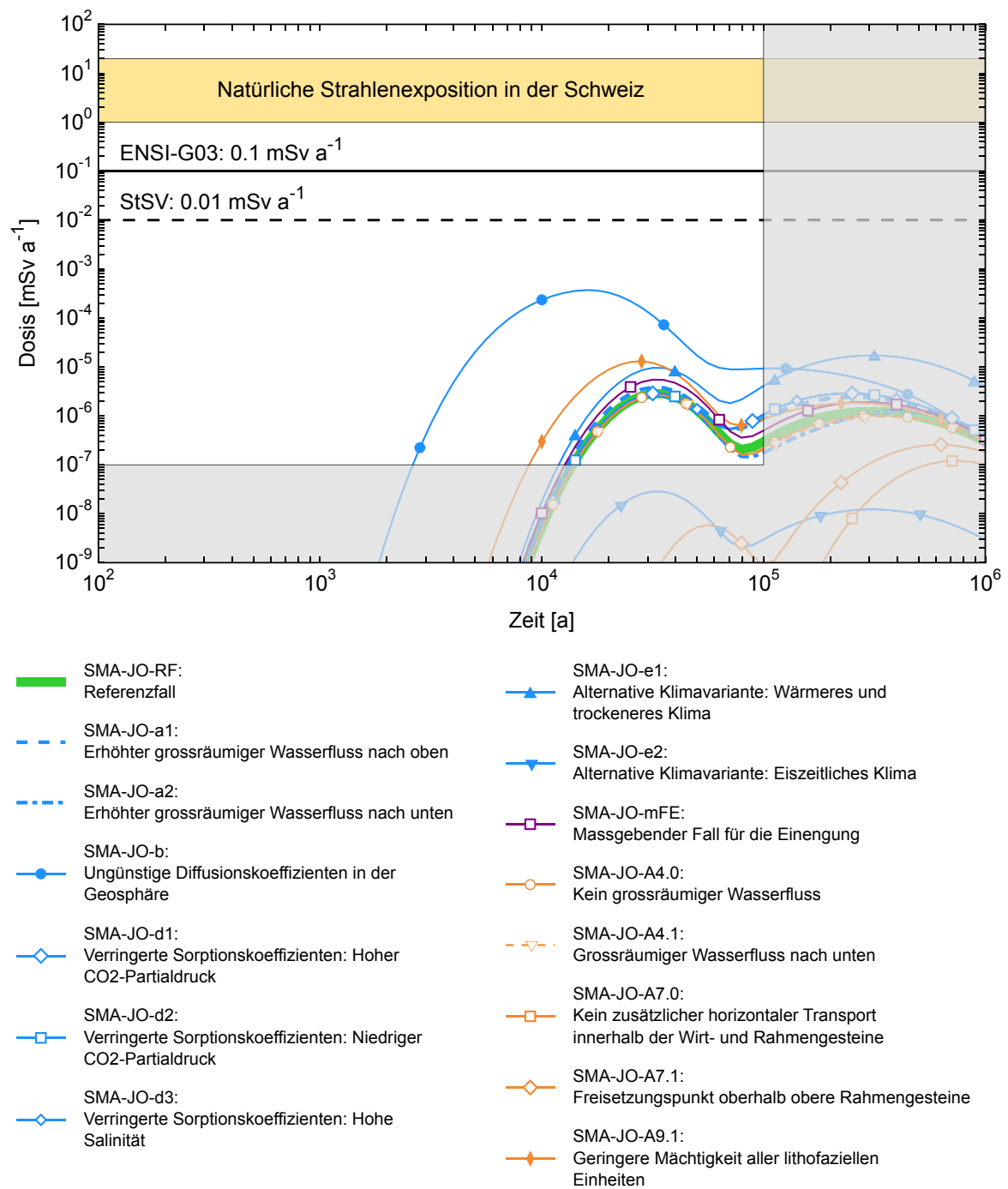


Fig. 4.3-6: Dosiscurven für das SMA-Lager im Standortgebiet Jura Ost (SMA-JO), vgl. Nagra (2014a).

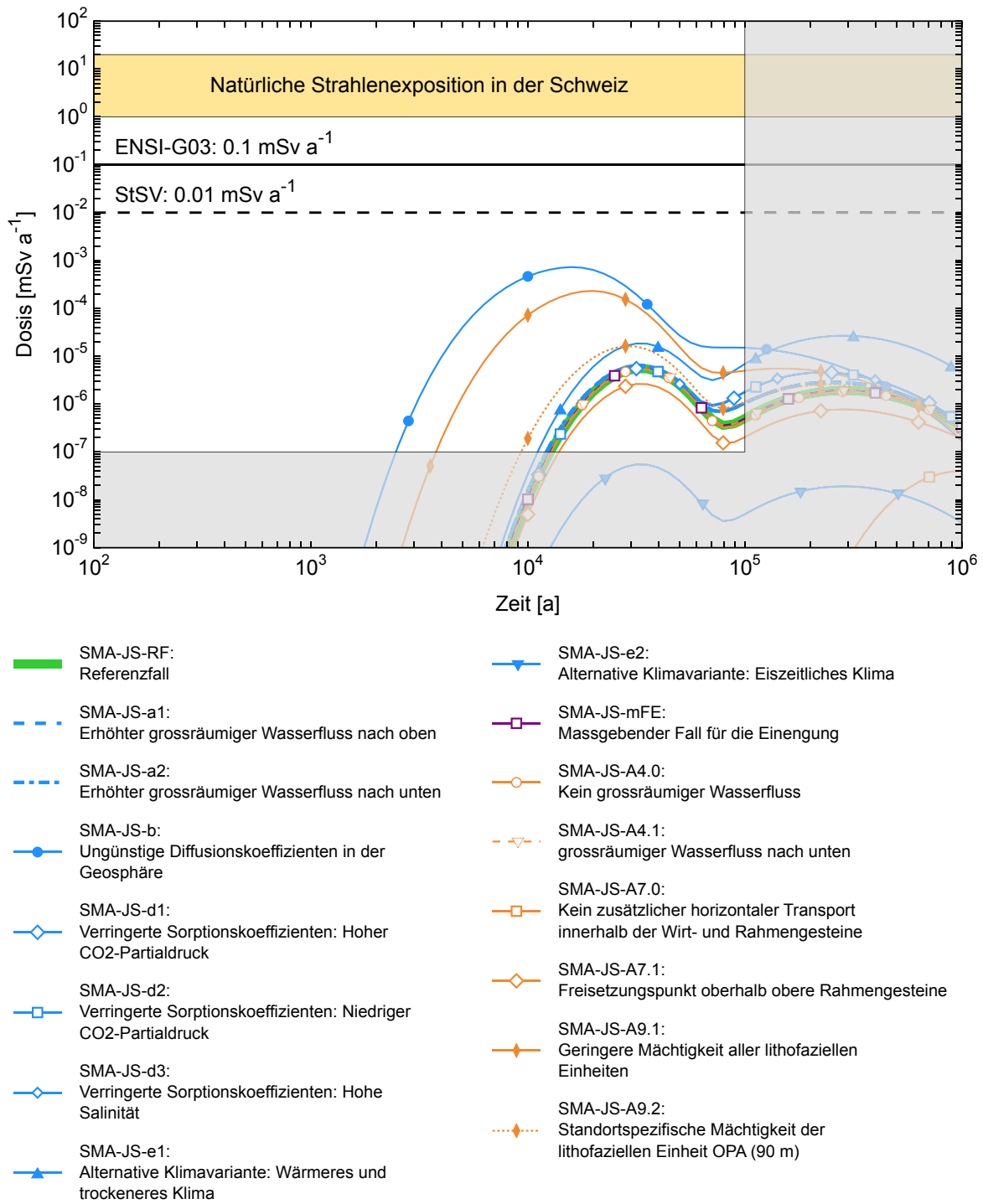


Fig. 4.3-7: Dosiskurven für das SMA-Lager im Standortgebiet Jura-Südfuss (SMA-JS), vgl. Nagra (2014a).

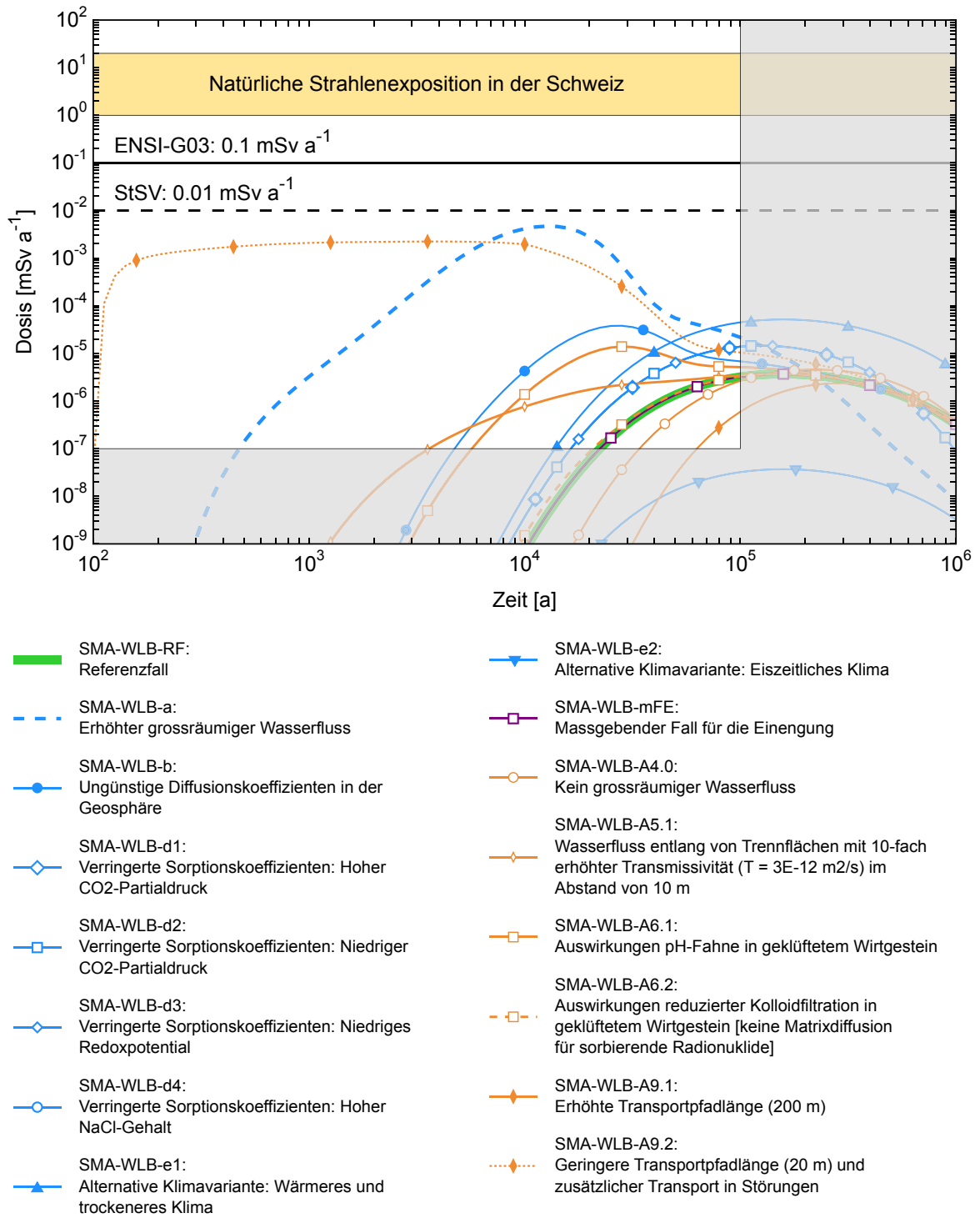


Fig. 4.3-8: Dosiskurven für das SMA-Lager im Standortgebiet Wellenberg (SMA-WLB), vgl. Nagra (2014a).

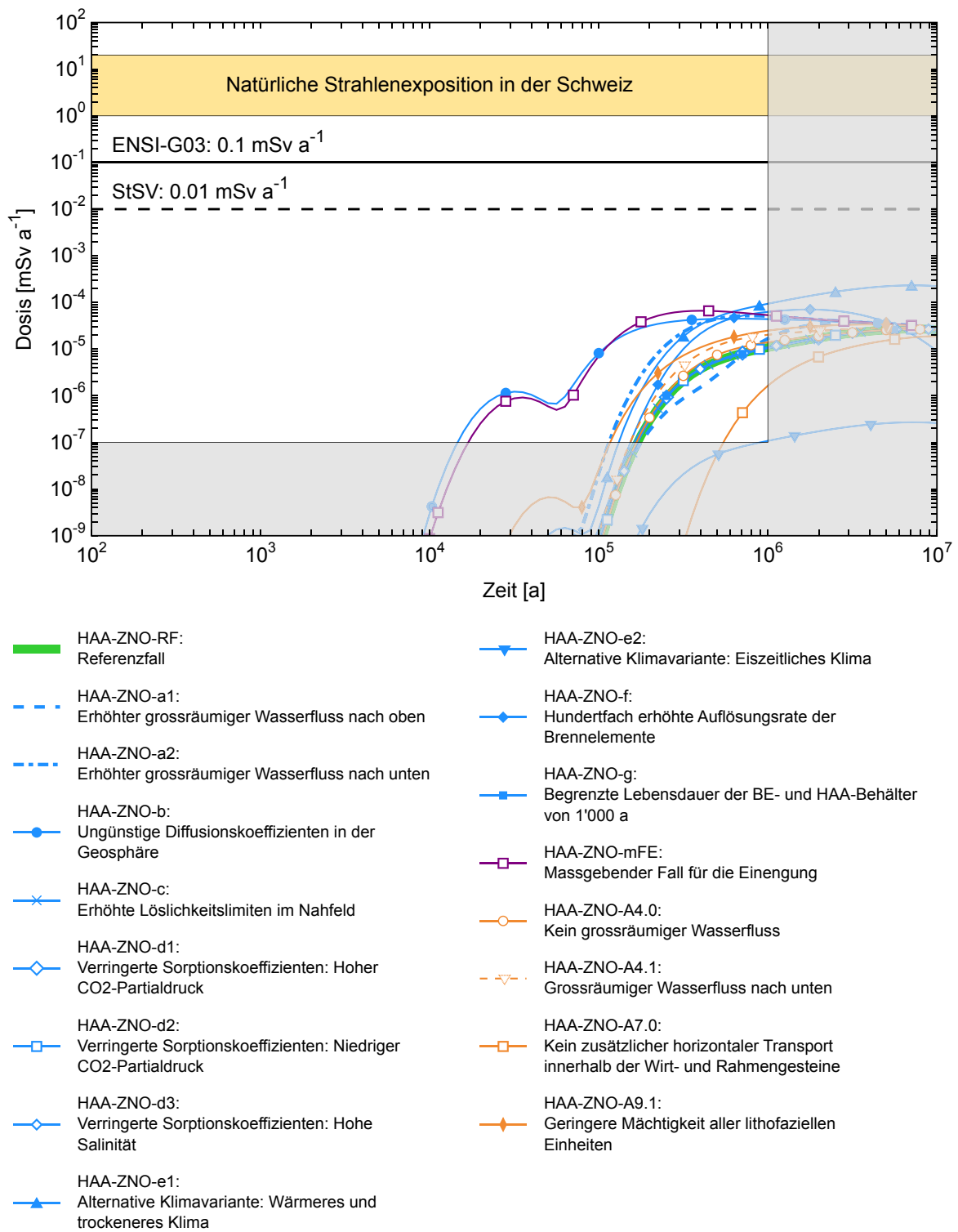


Fig. 4.3-9: Dosiskurven für das HAA-Lager im Standortgebiet Zürich Nordost (HAA-ZNO), vgl. Nagra (2014a).

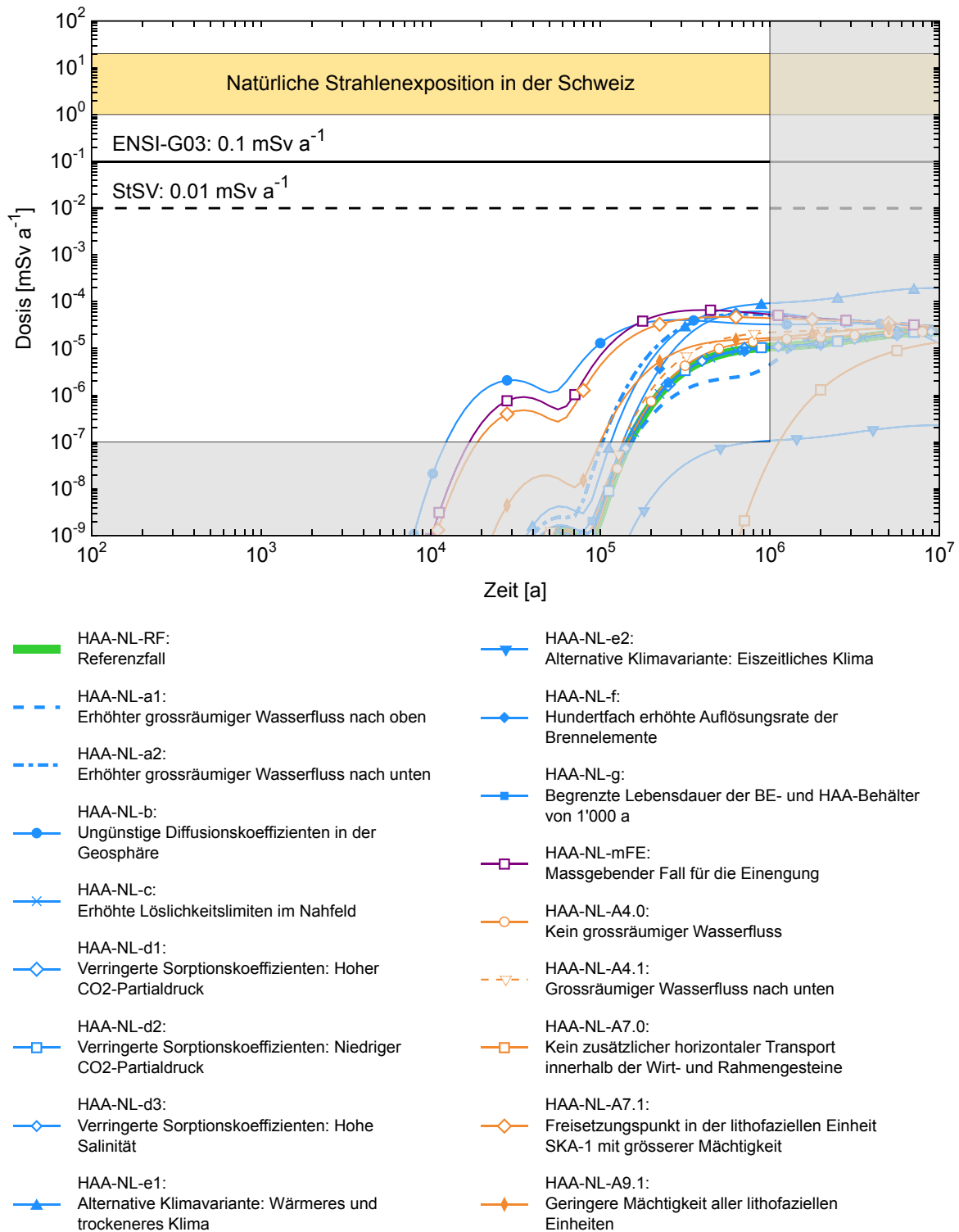


Fig. 4.3-10: Dosiskurven für das HAA-Lager im Standortgebiet Nördlich Lägern (HAA-NL), vgl. Nagra (2014a).

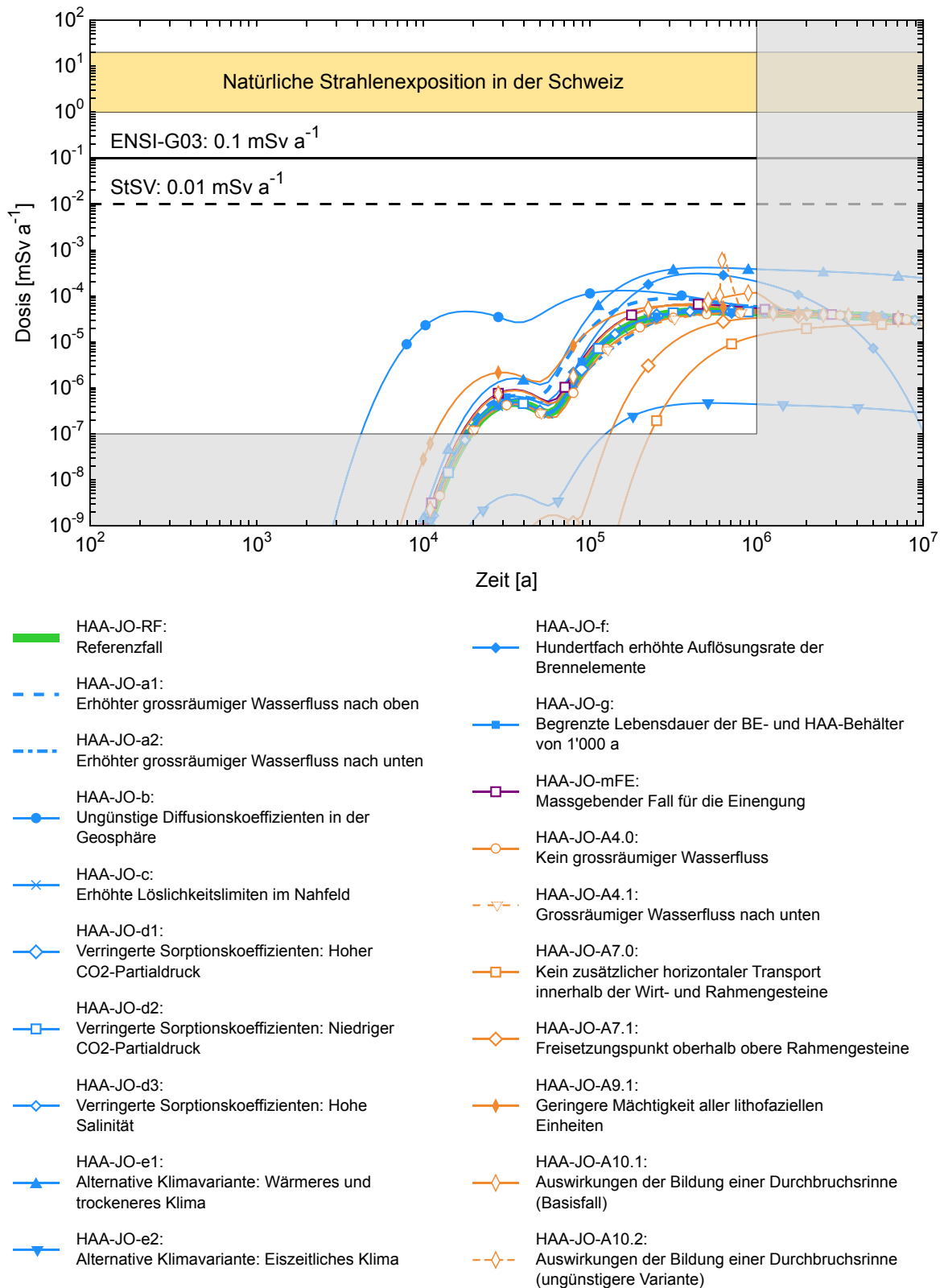


Fig. 4.3-11: Dosiskurven für das HAA-Lager im Standortgebiet Jura Ost (HAA-JO), vgl. Nagra (2014a).

4.3.3 Hinweise aus den Dosisberechnungen für die qualitative Bewertung ausgewählter Indikatoren

In diesem Kapitel werden Hinweise aus den Dosisberechnungen für die qualitative Bewertung für ausgewählte Indikatoren abgeleitet. Dabei handelt es sich um diejenigen Indikatoren, welche in den Tab. 2.3-2 und 2.3-3 mit dem Symbol '+' gekennzeichnet sind. Die Hinweise aus den Dosisberechnungen für die Indikatoren 'Hydraulische Durchlässigkeit', 'Art der Transportpfade und Ausbildung des Porenraums', 'Transmissivität präferenzierter Freisetzungspfade' und 'Länge der massgebenden Freisetzungspfade' wurden bereits in Kap. 3.2 abgeleitet; diese fliessen mit den entsprechenden wirtgesteinsspezifischen Bewertungen auch in die qualitative Bewertung der Standortgebiete bzw. der zugehörigen Lagerperimeter ein. Die Hinweise für die qualitative Bewertung des Indikators 'Mächtigkeit' werden nachfolgend abgeleitet.

Für den Indikator 'Mächtigkeit' werden geeignete Rechenfälle herangezogen, um in einem Vergleich der Dosismaxima die Bedeutung der Mächtigkeit der Wirt- und Rahmengesteine für die berechneten Dosen zu erfassen und damit Hinweise für die qualitative Bewertung des Indikators 'Mächtigkeit' abzuleiten. Die für den Indikator 'Mächtigkeit' relevanten Rechenfälle sind in Tab. 3.2-1 aufgeführt; die resultierenden Dosismaxima werden im Folgenden aufgeführt (Tab. 4.3-1) und diskutiert.

Indikator 'Mächtigkeit'

Tab. 4.3-1 enthält die für den Indikator 'Mächtigkeit' relevanten Rechenfälle mit den dazugehörigen Dosismaxima. Hier liegt der Fokus auf den Dosisberechnungen für den Referenzfall (inkl. Alternativen) und für den "massgebenden Fall" (inkl. unterer Eckwert). Die Standortgebiete Zürich Nordost und Nördlich Lägern zeigen sehr niedrige und vergleichbare Dosismaxima (weniger als 10^{-8} mSv/a im Referenzfall), während die Standortgebiete Südranden, Jura Ost, Jura-Südfuss und Wellenberg im Referenzfall niedrige und vergleichbare Dosismaxima von einigen 10^{-6} mSv/a aufweisen. Im Falle des Standortgebiets Jura-Südfuss basiert das berechnete Dosismaximum für den Referenzfall auf einem generischen Wert für die Länge des massgebenden Freisetzungspfads im Opalinuston von 40 m; der realistische Wert für die Länge des massgebenden Freisetzungspfads liegt tiefer (35 m); das Dosismaximum liegt deshalb für diesen Fall (ca. 10^{-5} mSv/a) deutlich höher als bei den Standortgebieten Südranden und Jura Ost. Die vorsichtigen Werte der massgebenden Längen für die Standortgebiete Südranden bzw. Jura-Südfuss liegen bei ca. 25 m bzw. 23 m und ergeben ein Dosismaximum von ca. 10^{-4} mSv/a. Die alternative Konzeptualisierung der Rahmengesteine führt für das Standortgebiet Jura Ost zu einer deutlich tieferen Dosis und für das Standortgebiet Nördlich Lägern zu einer höheren Dosis, für das Standortgebiet Jura-Südfuss ändert sich wenig.

Fazit: Die Ergebnisse der Dosisberechnungen zeigen für die Standortgebiete Zürich Nordost und Nördlich Lägern eine sehr gute Barrierenwirkung der Wirt- und Rahmengesteine. In den Standortgebieten Südranden und Jura Ost ergibt sich eine insgesamt gute Barrierenwirkung, obwohl die oberen Rahmengesteine aus unterschiedlichen Gründen als nicht barrierenwirksam eingestuft werden (zu geringe Überdeckung im Standortgebiet Südranden; konzeptuell begründete Annahme einer beschränkten Barrierenwirkung der Passwang-Formation und der Unteren Acuminata-Schichten im Standortgebiet Jura Ost). Im Standortgebiet Jura-Südfuss fällt die Barrierenwirkung insgesamt etwas weniger günstig aus; dies ist auf die ungünstigen Eigenschaften der unteren Rahmengesteine zurückzuführen, die aufgrund des kalkigen Lias nicht als zuverlässig nutzbare Barriere eingestuft werden können, in Kombination mit dem wenig mächtigen Opalinuston und der konzeptuell begründeten Annahme einer beschränkten Barrierenwirkung der oberen Rahmengesteine (Passwang-Formation und Untere Acuminata-Schichten). Das Standortgebiet Wellenberg weist im Referenzfall eine gute Barrierenwirkung

auf, was auf die vergleichsweise grosse Transportpfadlänge im Wirtgestein zurückzuführen ist. Die alternativen Konzeptualisierungen der oberen Rahmengesteine führen wie erwartet im Standortgebiet Jura Ost zu einem tieferen Dosismaximum und im Standortgebiet Nördlich Lägern zu einem höheren Dosismaximum, im Standortgebiet Jura-Südfuss führen die besseren oberen Rahmengesteine zu keiner grossen Änderung wegen der ungünstigen unteren Rahmengesteine. Diese Ergebnisse stehen im Einklang mit der in Kap. 4.4 vorgenommenen qualitativen Bewertung für den Indikator 'Mächtigkeit'¹³⁸.

Tab. 4.3-1: Dosismaxima für Rechenfälle zur Ableitung von Hinweisen für die qualitative Bewertung des Indikators "Mächtigkeit" bei der Bewertung der Standortgebiete (vgl. Nagra 2014a).

Die Art der verwendeten Rechenfälle (inkl. Abkürzungen) ist in Tab. 3.2-1 festgelegt.

K: hydraulische Durchlässigkeit

L: Länge des massgebenden Freisetzungspfads

D_{max}: maximale Dosis des betreffenden Rechenfalls innerhalb des Betrachtungszeitraums von 100'000 Jahren.

Einstufung: dunkelgrün: tiefe maximale Dosen; hellgrün: erhöhte maximale Dosen

Standort- gebiet	Wirtgestein	Rechenfall	K [m/s]	L [m]	D _{max} [mSv/a]
OPA	SR	mFE-uE	10 ⁻¹³	25	1.6 × 10 ⁻⁴
		mFE	10 ⁻¹³	40	6.5 × 10 ⁻⁶
		RF	10 ⁻¹³	40	3.8 × 10 ⁻⁶
	ZNO	mFE-uE	2 × 10 ⁻¹⁴	30	4.9 × 10 ⁻⁵
		mFE	2 × 10 ⁻¹⁴	40	5.5 × 10 ⁻⁶
		RF	2 × 10 ⁻¹⁴	72	2.5 × 10 ⁻⁹
	NL	mFE-uE	2 × 10 ⁻¹⁴	30	4.9 × 10 ⁻⁵
		mFE	2 × 10 ⁻¹⁴	40	5.5 × 10 ⁻⁶
		a-RF	2 × 10 ⁻¹⁴	40	2.9 × 10 ⁻⁶
		RF	2 × 10 ⁻¹⁴	67	7.3 × 10 ⁻⁹
	JO	mFE-uE	2 × 10 ⁻¹⁴	33	2.5 × 10 ⁻⁵
		mFE	2 × 10 ⁻¹⁴	40	5.5 × 10 ⁻⁶
		RF	2 × 10 ⁻¹⁴	40	2.9 × 10 ⁻⁶
		a-RF	2 × 10 ⁻¹⁴	68	5.9 × 10 ⁻⁹
	JS	mFE-uE	2 × 10 ⁻¹⁴	23	2.3 × 10 ⁻⁴
		RF*	2 × 10 ⁻¹⁴	35	1.6 × 10 ⁻⁵
mFE		2 × 10 ⁻¹⁴	40	5.5 × 10 ⁻⁶	
a-RF		2 × 10 ⁻¹⁴	40	2.6 × 10 ⁻⁶	
RF		2 × 10 ⁻¹⁴	40	5.5 × 10 ⁻⁶	
MG	WLB	RF	3 × 10 ⁻¹³	100	3.2 × 10 ⁻⁶

¹³⁸ In Kap. 4.4 werden die Standortgebiete Zürich Nordost, Nördlich Lägern und Wellenberg bzgl. des Indikators 'Mächtigkeit' mit *sehr günstig* bewertet, die Standortgebiete Südranden und Jura Ost mit *günstig* und das Standortgebiet Jura-Südfuss insbesondere wegen der unteren Rahmengesteine mit *bedingt günstig*. Beim Standortgebiet Wellenberg wird bei der *sehr günstigen* Bewertung des Indikators 'Mächtigkeit' die grosse Ausdehnung des Wirtgesteinskörpers in alle drei Raumrichtungen berücksichtigt.

4.3.4 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Anhand der charakteristischen Dosisintervalle wurde gezeigt, dass alle SMA-Standortgebiete und alle HAA-Standortgebiete sicherheitstechnisch geeignet und gleichwertig sind.

Da die für die oberen Ränder der Dosisintervalle verwendeten Konzeptualisierungen und Parameterwerte sehr vorsichtig gewählt wurden, heisst dies, dass mit diesen Rechnungen der obere Rand der Dosisintervalle zuverlässig eingegrenzt wurde; die Aussage, dass die oberen Ränder der Dosisintervalle unterhalb 0.01 mSv/a liegen, ist für alle geologischen Standortgebiete belastbar. Dies heisst, dass mit dem vorhandenen Kenntnisstand bezüglich Sicherheit und sicherheitstechnischer Gleichwertigkeit eindeutige und belastbare Aussagen gemacht werden können.

Damit qualifizieren sich alle geologischen Standortgebiete für den weiteren Bewertungsschritt (qualitative Bewertung) in Kap. 4.4.

4.4 Beschreibung und qualitative Bewertung der geologischen Standortgebiete

4.4.1 Vorgehen und verwendete Grundlagen

Vorgehen

Das Vorgehen bei der qualitativen Bewertung der geologischen Standortgebiete, welches auf den Vorgaben des Sachplans (BFE 2008) und des ENSI (ENSI 2010a und 2013a) basiert, ist in Kap. 2.3.5 detailliert beschrieben und wurde in Kap. 4.1 zusammengefasst.

Ausgangspunkt sind die geologischen Standortgebiete mit ihren prioritären Wirtgesteinen und den zugehörigen optimierten Lagerperimetern ("massgebender Lagerperimeter für die Einengung") aus Kap. 4.2, die sich in Kap. 4.3 gemäss den charakteristischen Dosisintervallen alle als sicherheitstechnisch geeignet und gleichwertig erwiesen haben. Die geologischen Standortgebiete werden in diesem Kapitel basierend auf den zugehörigen optimierten Lagerperimetern bezüglich der 4 Kriteriengruppen und 13 Kriterien gemäss SGT Tab. 1 und der zugehörigen Indikatoren charakterisiert und bewertet. Die qualitative Bewertung wird auf Stufe der Indikatoren vorgenommen und dann sukzessive auf die Stufen der Kriterien, der Kriteriengruppen und der Gesamtbewertung aggregiert. Geologische Standortgebiete, welche in der Gesamtbewertung nicht mindestens das Prädikat "geeignet" erzielen, scheiden aus.

Für die Indikatoren, welche den einschlusswirksamen Gebirgsbereich betreffen, kann auf die Bewertungen in Kap. 3.3 zurückgegriffen werden, wobei für ausgewählte Indikatoren ('Mächtigkeit', 'Hydraulische Durchlässigkeit', 'Potenzial zur Bildung neuer Wasserwegsamkeiten (Verkarstung)', 'Explorationsverhältnisse im geologischen Untergrund', 'Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften') je nach Konfiguration eine standortbezogene Modifikation vorgenommen wurde. Neben dem "massgebenden Lagerperimeter für die Einengung" werden auch weitere alternative Lagerperimeter bewertet (vgl. Tab. 4.2-3), um die Sensitivität der Bewertung bezüglich vorhandener Ungewissheiten zu untersuchen.

Wie in Kap. 2.3 ausgeführt, wird im Gegensatz zu Etappe 1 die Bewertung für jede Stufe differenzierter vorgenommen; innerhalb einer Bewertungsstufe können Zu- und Abschlüsse gemacht werden. Diese sind im Text nicht ausgewiesen, können aber den Zahlenwerten in den Bewer-

tungstabellen (Tab. 4.4-2 und 4.4-3) entnommen werden. Um die detaillierten Unterschiede in der Bewertung zwischen den Standortgebieten bzw. Lagerperimetern zu sehen, sind deshalb diese Tabellen zu konsultieren.

Bei der qualitativen Bewertung werden grundsätzlich die gleichen Bewertungsskalen verwendet wie in Etappe 1 (vgl. Nagra 2008d, Anhang 1). Zu den Ausnahmen mit angepassten Bewertungsskalen gehören die Indikatoren 'Länge der massgebenden Freisetzungspfade', 'Mächtigkeit', 'Hydraulische Durchlässigkeit' und 'Transmissivität präferenzierter Freisetzungspfade', die bereits in Kap. 3.3 diskutiert wurden. Als weitere Ausnahmen kommen im vorliegenden Kapitel die folgenden vier modifizierten Indikatoren dazu, die im sicherheitstechnischen Vergleich eine Schlüsselstellung einnehmen: 'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteins-Dekompression', 'Tiefenlage unter lokaler Erosionsbasis im Hinblick auf die Bildung neuer Rinnen', 'Tiefenlage im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit (u.B. Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften)' und 'Platzangebot untertags'¹³⁹. Auch für die Bewertung der Nutzungskonflikte wurde die Bewertung (bewertete Objekte, Bewertungsskala) teilweise leicht an neuere Entwicklungen und Erkenntnisse angepasst.¹⁴⁰ Für die Indikatoren 'Explorationsverhältnisse im geologischen Untergrund' und 'Explorationsbedingungen an Oberfläche'¹⁴¹ werden die Bedingungen in den Standortgebieten explizit analysiert (vgl. Nagra 2014b, Dossier VIII).

Die modifizierten Bewertungsskalen für die im vorangehenden Absatz genannten drei Schlüsselindikatoren zur Tiefenlage berücksichtigen die in Kap. 4.1 abgeleiteten Zielwerte. Wie dort ausgeführt, ist beim Indikator 'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteins-Dekompression' für das SMA-Lager ein Wert für Top Wirtgestein von mindestens 350 m u.T. (Nordschweiz) bzw. 600 m u.T.¹⁴² (Wellenberg) und für das HAA-Lager ein Wert von mindestens 450 m u.T. anzustreben¹⁴³.

Beim Indikator 'Tiefenlage unter lokaler Erosionsbasis im Hinblick auf die Bildung neuer Rinnen' beträgt der Zielwert für das SMA-Lager für die Tiefe von Top Wirtgestein für die Standortgebiete Südranden und Jura-Südfuss 100 m u.E. und 150 m u.E. für die Standortgebiete Zürich Nordost und Nördlich Lägern; für das HAA-Lager werden für die Standortgebiete Zürich Nordost und Nördlich Lägern wegen der unterstellten mehrfachen erheblichen Vergletscherungen für die Tiefe von Top Wirtgestein mindestens 350 m u.E. angestrebt; für das Standortgebiet Jura Ost sind es wegen reduzierter Vergletscherung mindestens 200 m u.E.¹⁴⁴ (vgl. dazu die Erläuterungen in Kap. 4.1 bzw. 4.2).

¹³⁹ Beim Indikator 'Tiefenlage unter Fels im Hinblick auf glaziale Tiefenerosion' ist die Bewertungsskala gleich wie in Nagra (2008d), S. A1-17, wobei für die 'übertiefen Felsrinnen' nicht nur eine Vertiefung, sondern auch eine Verbreiterung angenommen wird. Für die Verbreiterung der Rinnen, siehe Nagra (2014b, Dossier III).

¹⁴⁰ Diese und weitere kleinere Änderungen werden im Rahmen der Bewertung der betreffenden Indikatoren dokumentiert (s. Kap. 4.4.2).

¹⁴¹ Die detaillierte Analyse in den Standortgebieten zeigt, dass die für die Kalibrierung der Seismik notwendigen Bohrungen im Untersuchungsperimeter ohne grössere Probleme abgeteuft werden können (vgl. Nagra 2014b, Dossier VIII); sie werden deshalb bei der Bewertung dieses Indikators im Gegensatz zu Etappe 1 nicht mehr explizit beurteilt.

¹⁴² Für Bezugsniveau Lagerebene.

¹⁴³ Mit diesen Werten wird eine *sehr günstige* Bewertung erreicht.

¹⁴⁴ Mit diesen Werten wird eine *günstige* Bewertung erreicht.

Bezüglich des Indikators 'Tiefenlage im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit (u.B. Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften)' wird angestrebt, die Tiefe der Lagerebene auf 600 m u.T. (SMA-Lager) bzw. 700 m u.T. (HAA-Lager) zu beschränken¹⁴⁵ (vgl. Nagra 2014f). Zusätzlich wurden in Kap. 4.1 die folgenden Richtwerte für den Platzbedarf identifiziert (vgl. Nagra 2014j): Südranden: 3 – 4 km², Zürich Nordost: ca. 6 km² (HAA-Lager) und ca. 3 km² (SMA-Lager), Nördlich Lägern: 8 – 12 km² (HAA-Lager) und 4 – 5 km² (SMA-Lager), Jura Ost: 6 – 9 km² (HAA-Lager) und 3 – 4 km² (SMA-Lager), Jura-Südfuss: 6 – 8 km² und Wellenberg: ca. 3 km² (auf mehreren Lagerebenen)¹⁴⁶.

Aufbauend auf den obigen Zielwerten wurden in Kap. 4.2 optimierte Lagerperimeter abgegrenzt. Die aus den Zielwerten resultierenden Bewertungsskalen für die genannten Indikatoren sind in Tab. 4.4-1 aufgeführt.

Die Belastbarkeit und Robustheit der Bewertung wird anhand der alternativen Lagerperimeter geprüft, mit welchen der Einfluss alternativer Annahmen zur Langzeitentwicklung (Bildung von Durchbruchsrinnen)¹⁴⁷, der Einfluss der Ungewissheiten in der Tiefenlage und der Einfluss alternativer Annahmen zur Optimierung geprüft wird. Bei der Prüfung der Sensitivität werden die Bewertungen des "massgebenden Falls" mit den Bewertungen der alternativen Lagerperimeter verglichen. Dabei werden hier nur diejenigen Fälle diskutiert, die zu einer signifikant anderen Bewertung führen und nicht gleichzeitig die grundlegende Anforderung eines genügenden Platzangebots verletzen¹⁴⁸; diese werden als "bewertbare Fälle" bezeichnet. Weiter werden zur Prüfung der Sensitivität der Bewertung auch alternative Konzeptualisierungen der Rahmengesteine in den Standortgebieten Nördlich Lägern, Jura Ost und Jura-Südfuss geprüft, welche auch in Kap. 3 bei der Auswahl der prioritären Wirtgesteine bereits teilweise berücksichtigt wurden.

Die Charakterisierung und Bewertung werden mit Ausnahme der grösserräumigen Aspekte (vgl. Kap. 4.4.2) für das SMA-Lager und das HAA-Lager separat ausgeführt (Kap. 4.4.3 und 4.4.4). Die gemeinsame Diskussion der grösserräumigen Aspekte hat den Vorteil, dass sie im direkten Vergleich zwischen den Standortgebieten erfolgen kann; für die eher lokalen Aspekte bieten sich themenspezifische, für jedes Standortgebiet (bzw. jeden Lagerperimeter) separat geführte Diskussionen an.

Im Anschluss an die Diskussion der einzelnen Lagerperimeter folgt eine zusammenfassende Darstellung der Bewertung der geologischen Standortgebiete bzw. der Lagerperimeter basierend auf dem "massgebenden Fall für die Einengung". Diese Zusammenfassung wird abgerundet durch Betrachtungen zur Sensitivität der Bewertung bezüglich der alternativen Fälle (inkl. Fälle bezüglich der Ungewissheiten in der Tiefenlage und der Barrierenwirkung der Rahmengesteine). Der sicherheitstechnische Vergleich folgt dann in Kap. 5.

¹⁴⁵ Mit diesen Werten wird eine *günstige* Bewertung erreicht.

¹⁴⁶ Mit diesen Werten wird eine *günstige* Bewertung erreicht. Die Bewertung des Platzangebots wird zusätzlich mit den Informationen in Lanyon & Madritsch (2014) geprüft.

¹⁴⁷ Wie in Kap. 4.2 dargelegt wurde, gibt es für das SMA-Lager nur im Standortgebiet Südranden und für das HAA-Lager im Standortgebiet Jura Ost relevante Ungewissheiten bzgl. der Möglichkeit der Entstehung von Durchbruchsrinnen.

¹⁴⁸ Von dieser Regel wird bei denjenigen Standortgebieten abgewichen, wo sich nur mit Schwierigkeit genügend grosse Lagerperimeter finden lassen.

Tab. 4.4-1: Bewertungsskalen für vier Schlüsselindikatoren mit Modifikationen gegenüber Etappe 1.

Bei den Tiefenlagen wird jeweils der ungünstigste Punkt im Lagerperimeter bewertet. x bezeichnet den Indikatorwert, der zur Bewertung verwendet wird.

- ¹⁾ Betrifft Top Wirtgestein.
- ²⁾ Die aufgeführte Bewertungsskala gilt für die Situation, wo die Bildung einer Durchbruchsrinne unterstellt wird. Andernfalls ergibt sich bei diesem Indikator die Bewertung *sehr günstig*, unabhängig von der Tiefenlage.
- ³⁾ OA bezeichnet in dieser Zeile die standortspezifischen Optimierungsanforderungen, d.h. die Richtwerte des Platzbedarfs gemäss Text bzw. Tab. 4.2-1 in Kap. 4.2.2.

Indikator		ungünstig	bedingt günstig	günstig	sehr günstig
Tiefenlage ¹⁾ unter Terrain im Hinblick auf Gesteins-Dekompression	SMA: ausser WLB		$x < 300$ m u.T.	$300 \leq x < 350$ m u.T.	$x \geq 350$ m u.T.
	SMA: WLB		$x < 500$ m u.T.	$500 \leq x < 600$ m u.T.	$x \geq 600$ m u.T.
	HAA		$x < 400$ m u.T.	$400 \leq x < 450$ m u.T.	$x \geq 450$ m u.T.
Tiefenlage ¹⁾ unter lokaler Erosionsbasis im Hinblick auf die Bildung neuer Rinnen ²⁾	SMA: SR & JS		$x < 100$ m u.E.	$100 \leq x < 150$ m u.E.	$x \geq 150$ m u.E.
	SMA: ZNO & NL		$x < 150$ m u.E.	$150 \leq x < 200$ m u.E.	$x \geq 200$ m u.E.
	HAA: ZNO & NL		$x < 350$ m u.E.	$350 \leq x < 450$ m u.E.	$x \geq 450$ m u.E.
	HAA: JO		$x < 200$ m u.E.	$200 \leq x < 250$ m u.E.	$x \geq 250$ m u.E.
Tiefenlage im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit (u.B. Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften)	SMA	$x > 700$ m u.T.	$700 \geq x > 600$ m u.T.	$600 \geq x > 500$ m u.T.	$x \leq 500$ m u.T.
	HAA	$x > 800$ m u.T.	$800 \geq x > 700$ m u.T.	$700 \geq x > 600$ m u.T.	$x \leq 600$ m u.T.
Platzangebot untertags ³⁾	SMA & HAA	$x < 0.8 \times OA$	$0.8 \times OA \leq x < OA$	$OA \leq x < 2 \times OA$	$x \geq 2 \times OA$

Verwendete Grundlagen

Die wichtigsten Grundlagen für diese Arbeitsschritte sind die geologischen Unterlagen, die in Nagra (2014b) dokumentiert sind und die neben den schon für Etappe 1 verfügbaren geologischen Unterlagen auch die in der Zwischenzeit neu erarbeiteten Unterlagen berücksichtigen. Für die Charakterisierung und Bewertung der Lagerperimeter sind dies neben den bereits in Kap. 3 diskutierten Unterlagen (insbesondere die Eigenschaften der Wirtgesteine, inkl. ihre Explorierbarkeit, Charakterisierbarkeit und Prognostizierbarkeit) die Tiefenlage der Wirtge-

steinsschichten (inkl. Rahmengesteine) bezüglich wichtiger Bezugshorizonte (Terrain, lokale Erosionsbasis und Top Fels), die Konzepte zur Langzeitentwicklung, inkl. der zugehörigen Parameter (Hebung bzw. erwartete Erosion, erforderliche Überdeckung etc.) sowie die Unterlagen zu den Nutzungskonflikten. Die Unterlagen zu den Bezugshorizonten wurden in Kap. 4.1 diskutiert, ebenso ein Teil der raumwirksamen Elemente für die Beurteilung der Langzeitentwicklung. Für vertiefte Informationen zu diesen Unterlagen ist Nagra (2014b, insbesondere Dossiers II, III und VI) zu konsultieren. Bezüglich der bautechnischen Eignung werden die Tiefe der Lagerebene, die Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften (vgl. Nagra 2014b, Dossier IV) sowie die Überlegungen zu den geotechnischen Bedingungen (Nagra 2014f) verwendet; für die Beurteilung der geologischen Bedingungen in den überlagernden Gesteinsformationen werden die Resultate der bautechnischen Risikoanalyse (Nagra 2014c) beigezogen. Nachfolgend werden weitere für die Bewertung der Standortgebiete bzw. Lagerperimeter erforderliche Informationen aufgeführt, die mehrheitlich grösserräumige Aspekte betreffen.

Die Gliederung des Grossraums der Standortgebiete in der Nordschweiz in tektonische Regimes sowie die wichtigsten gebietsbegrenzenden geologischen Elemente (regionale Störungszonen und zu meidende tektonische Zonen) sind als Übersicht in Fig. 4.4-1 enthalten. Diese Figur wird verwendet für die Bewertung des Indikators 'Modellvorstellungen zur Langzeitentwicklung (Geodynamik und Neotektonik; weitere Prozesse)' bezüglich Geodynamik, Neotektonik und tektonischem Baustil und auch als Unterlage für die Abschätzung der Platzreserven in Zusammenhang mit dem Indikator 'Platzangebot untertags'. Vertiefte Informationen zu diesen Aspekten finden sich in Nagra (2014b, Dossier II).

Eine wichtige Grundlage zur Beurteilung des Indikators 'Erosion im Betrachtungszeitraum' ist die Karte der rezenten vertikalen Krustenbewegungen (Fig. 4.4-2 und Profil in Fig. 4.4-3). Sie basiert auf geodätischen Messungen und zeigt in der Schweiz Werte zwischen etwa 0.3 mm/a Senkung und 1.5 mm/a Hebung bezüglich des Referenzpunkts Laufenburg. Es bestehen klare grossräumige Unterschiede mit markant erhöhten Hebungsraten in den Alpen im Vergleich zur Nordschweiz. Diese Werte stellen zwar nur eine Momentaufnahme dar, sie sind aber kompatibel mit den allgemeinen geodynamischen Modellvorstellungen, den aus Mineralabkühlungsaltern abgeleiteten Langzeithebungsraten der Alpen der letzten 10 Ma 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 Nordschweiz liegen in einem ähnlichen Bereich wie die aus geomorphologischen Studien bzw. der Beckenmodellierung abgeleiteten Werten. Vertiefte Unterlagen zur Hebung finden sich in Nagra (2014b, Dossier III).

Karten (Messwerte bzw. synthetische Erdbebendaten) zur Beurteilung des Indikators 'Seismizität' sind in Fig. 4.4-3a bis c dargestellt; eine vertiefte Diskussion findet sich in Nagra (2014b, Dossier III).

Das Thema Nutzungskonflikte ist in Nagra (2014b, Dossier VII) abgehandelt. Bei der Bewertung der Lagerperimeter bezüglich möglicher Nutzungskonflikte werden Kohlenwasserstoff-Ressourcen (Fig. 4.4-4), Salzvorkommen (Fig. 4.4-5), die Geothermie (Fig. 4.4-6), die Erdgas- und CO₂-Speicherung im Untergrund (CO₂-Speicherung in Fig. 4.4-7) sowie Mineral- und Thermalwassernutzungen (Fig. 4.4-8) betrachtet.

Das Standortgebiet Wellenberg ist mit den hier gemachten Erläuterungen nicht abgedeckt; die Situation bezüglich Wellenberg ist in Nagra (2014b) detailliert dargestellt (vgl. insbesondere Dossier II, III, VI und VII) und wird direkt in Zusammenhang mit der Bewertung in Kap. 4.4.3.7 diskutiert.

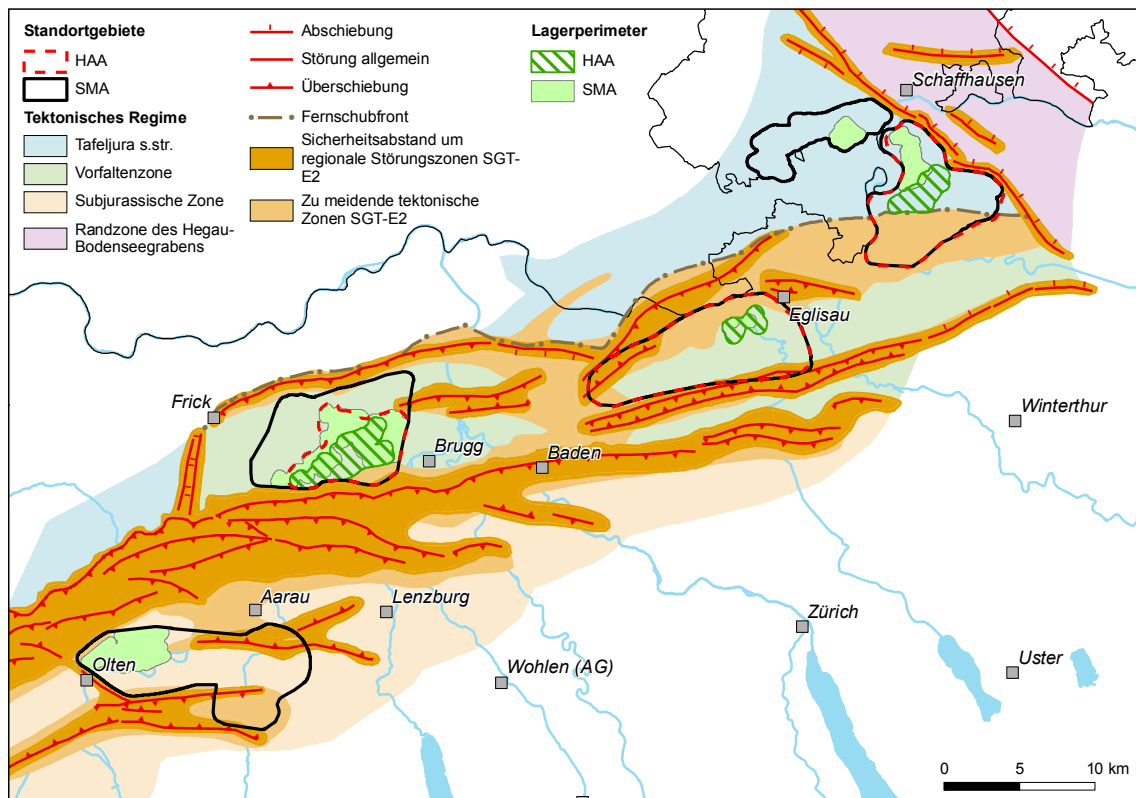


Fig. 4.4-1: Regionale Störungszonen, zu meidende tektonische Zonen und tektonisches Regime im Grossraum der Standortgebiete in der Nordschweiz, vgl. Nagra (2014b, Dossier II).

Der Lagerperimeter SMA-WLB ist nicht abgebildet.

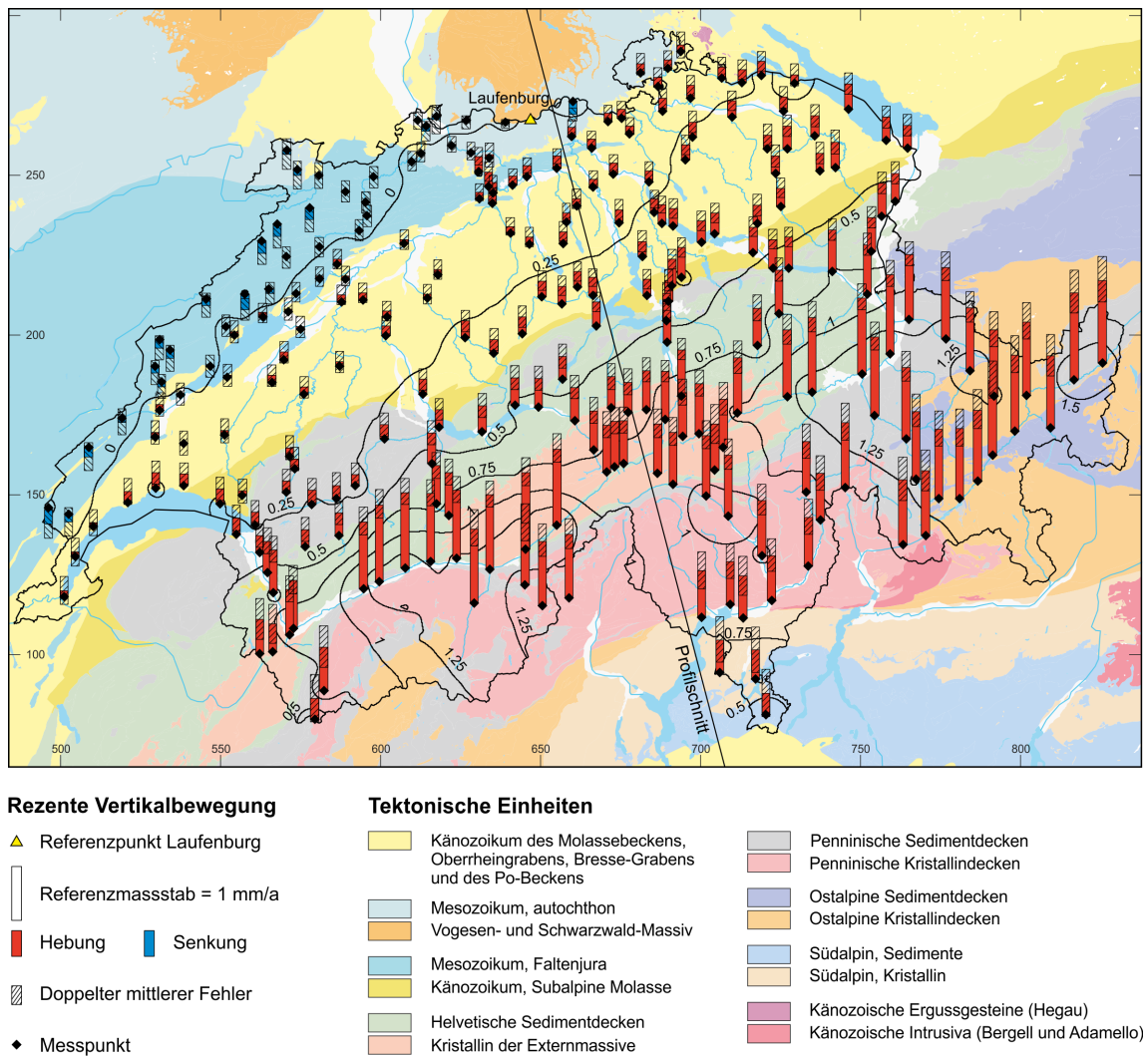


Fig. 4.4-2: Aus wiederholten Präzisionsnivellement-Messungen bestimmte Hebungsraten in der Schweiz und Umgebung, vgl. Nagra (2014b, Dossier III).

Geologisch-tektonische Übersichtskarte vereinfacht nach swisstopo (2005).

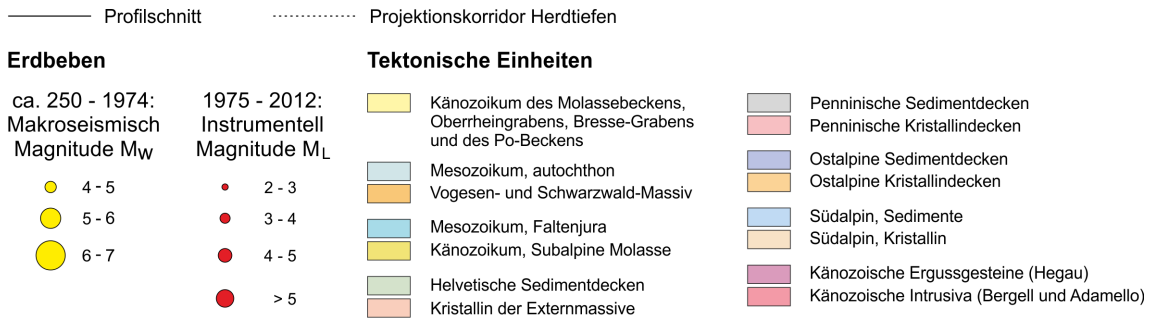
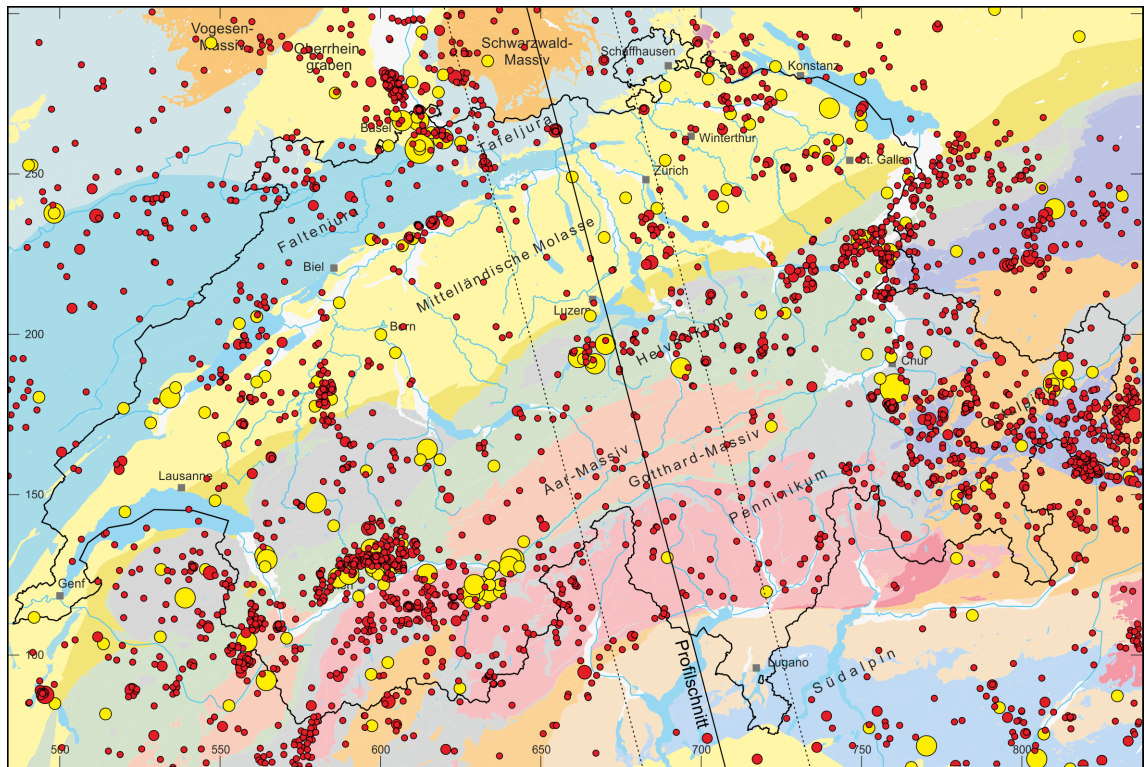


Fig. 4.4-3a: Historische und instrumentell erfasste Seismizität in der Schweiz und Umgebung, vgl. Nagra (2014b, Dossier III) sowie die dort zu dieser Figur aufgeführten Referenzen.

Geologisch-tektonische Übersichtskarte vereinfacht nach swisstopo (2005).

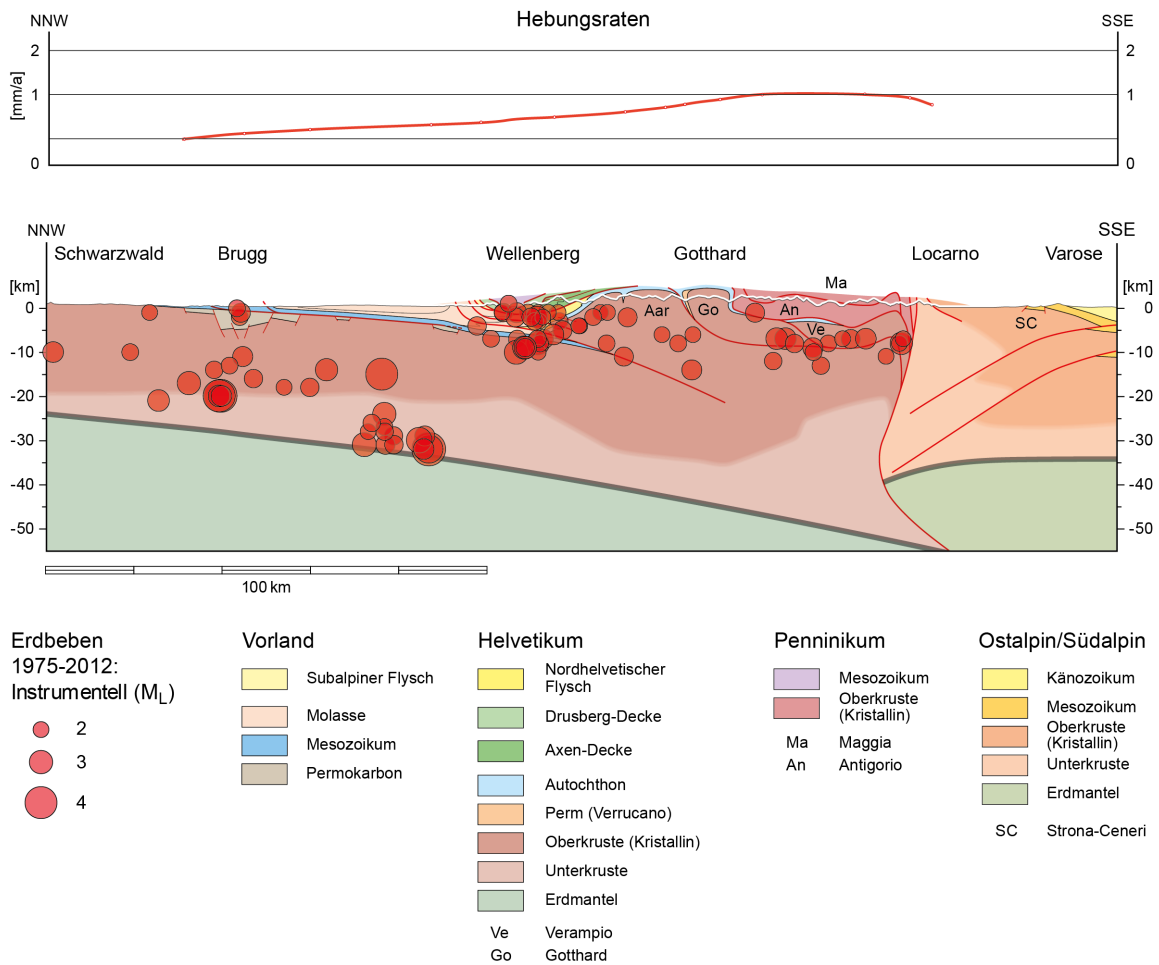


Fig. 4.4-3b: Profilschnitt gemäss Fig. 4.4-3a (Schwarzwald – Brugg – Wellenberg – Varese) mit projizierten Erdbeben und Hebungsraten, vgl. Nagra (2014b, Dossier III).

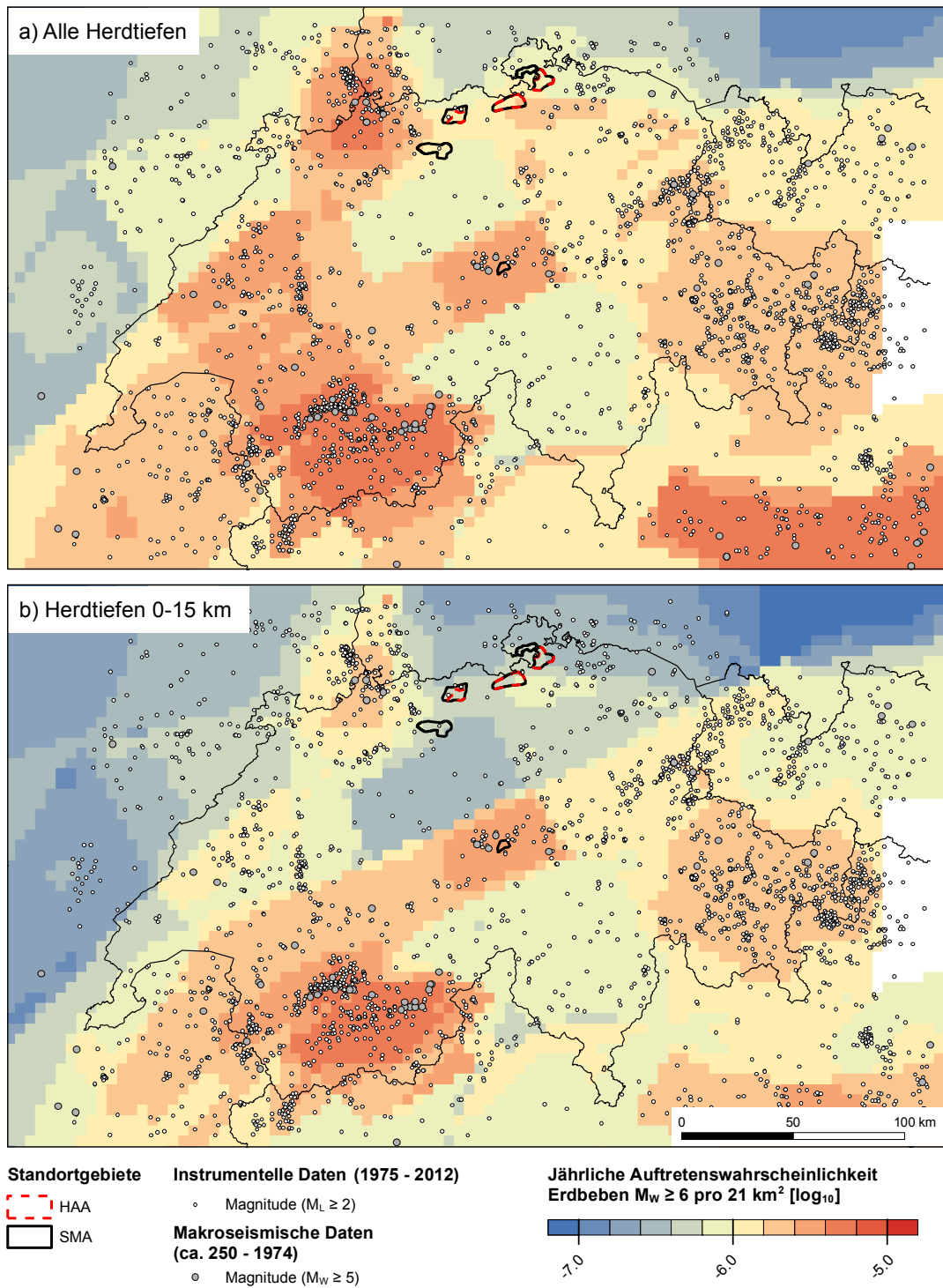
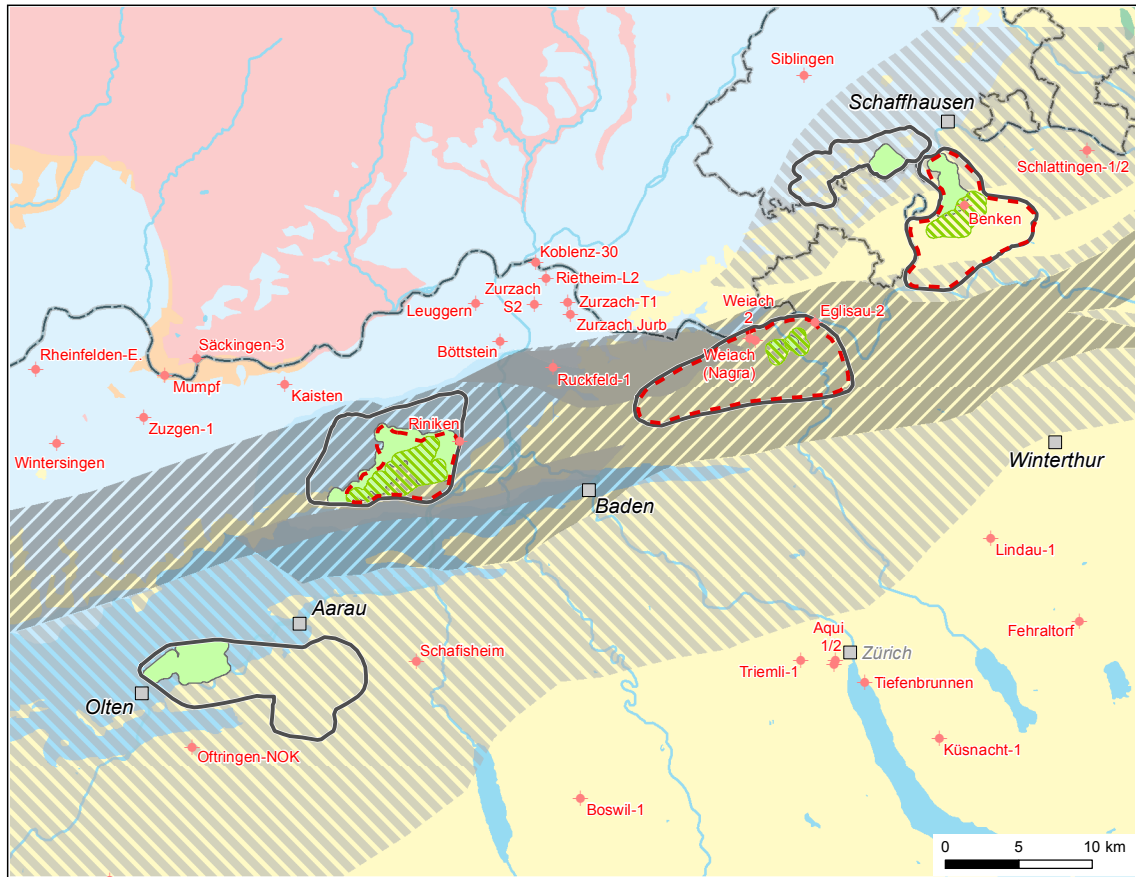


Fig. 4.4-3c: Auftretenswahrscheinlichkeit von Erdbeben mit Magnituden $M_W \geq 6$ in der Schweiz basierend auf Einschätzungen von vier Expertengruppen im Rahmen des PRP-Projekts (swissnuclear 2013), vgl. auch Nagra (2014b, Dossier III).

In Farbe gezeigt ist die jährliche Auftretenswahrscheinlichkeit eines Erdbebens mit $M_W \geq 6$ in einem Gebiet von 0.05° Länge \times 0.05° Breite (entspricht ca. 21 km^2) für alle Herdtiefen (a) und für Herdtiefen $< 15 \text{ km}$ (b). Zum Vergleich sind die effektiv erfassten Erdbeben dargestellt (graue Punkte, mehrheitlich Erdbeben mit kleiner Magnitude).



Geologisches Standortgebiet

- HAA
- SMA
- Lagerperimeter**
- HAA (Variante mLE-r)
- SMA (Variante mLE-r)

Kohlenwasserstoff-Potenzial

- (Gesamtpotenzial Paläozoische Plays)
- Potenzial vorhanden (Überlagerung mehrerer Plays)
 - Potenzial vorhanden
 - Potenzial spekulativ

Bohrungen

- ◆ Tiefbohrungen

Tektonische Einheiten

- Miozäne Vulkanite
- Mittelländische Molasse & Tertiär d. Faltenjuras
- Mesozoikum (Tafeljura s.l.)
- Perm
- Kristallin / Grundgebirge
- Mesozoikum der Vorfaltenzone
- Mesozoikum des Faltenjuras

Fig. 4.4-4: Mögliche Nutzungskonflikte mit Kohlenwasserstoff-Ressourcen im Grossraum der Standortgebiete in der Nordschweiz, vgl. Nagra (2014b, Dossier VII).

Gesamtbeurteilung des Potenzials der paläozoischen Plays (konventionell/nicht-konventionell).

Die mesozoischen Schiefergas-Plays (Opalinuston/Posidonienschiefer) liegen ausserhalb der Standortgebiete.

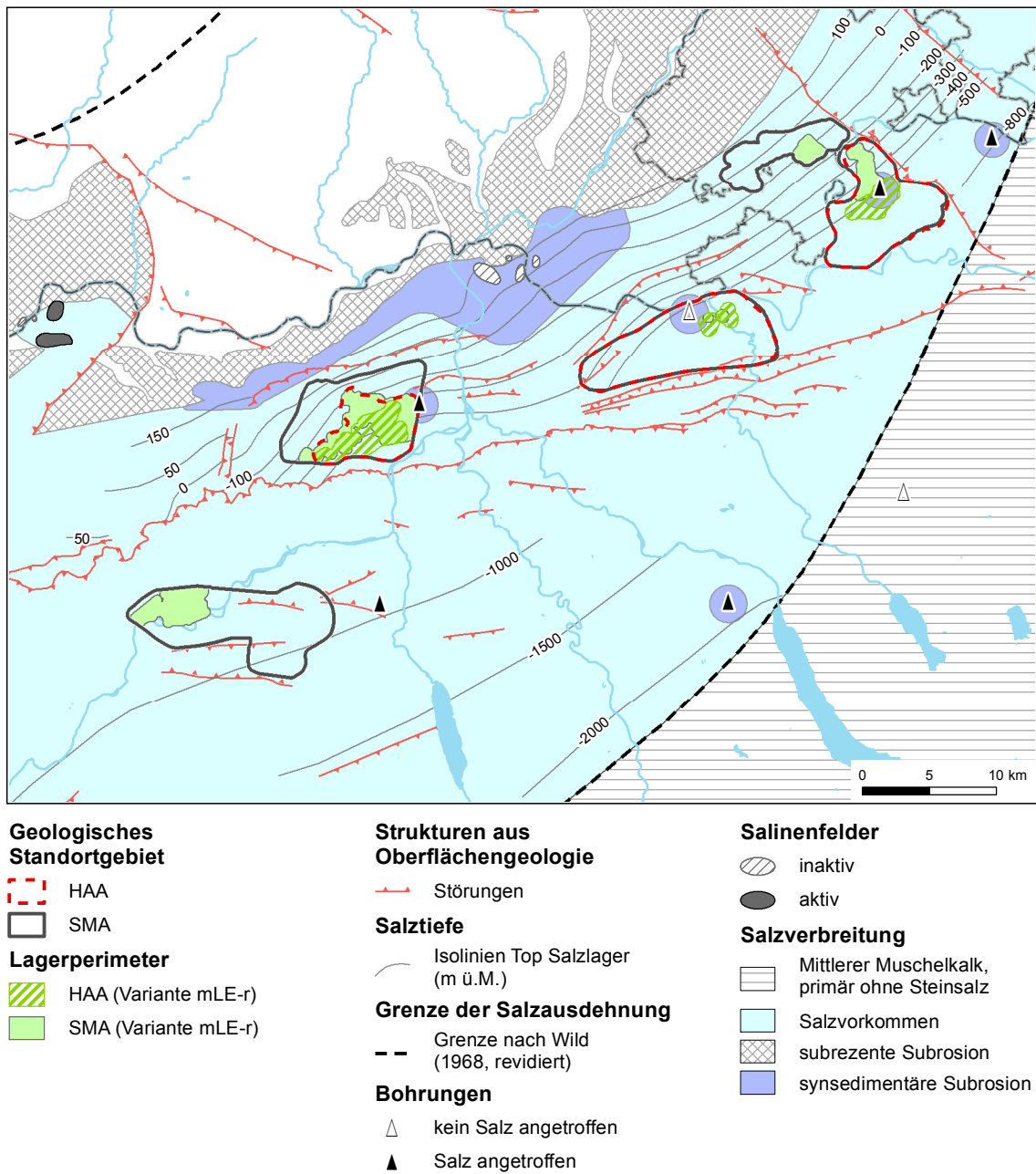


Fig. 4.4-5: Mögliche Nutzungskonflikte mit Salzvorkommen im Mittleren Muschelkalk im Grossraum der Standortgebiete in der Nordschweiz, vgl. dazu auch Nagra (2014b, Dossier VII).

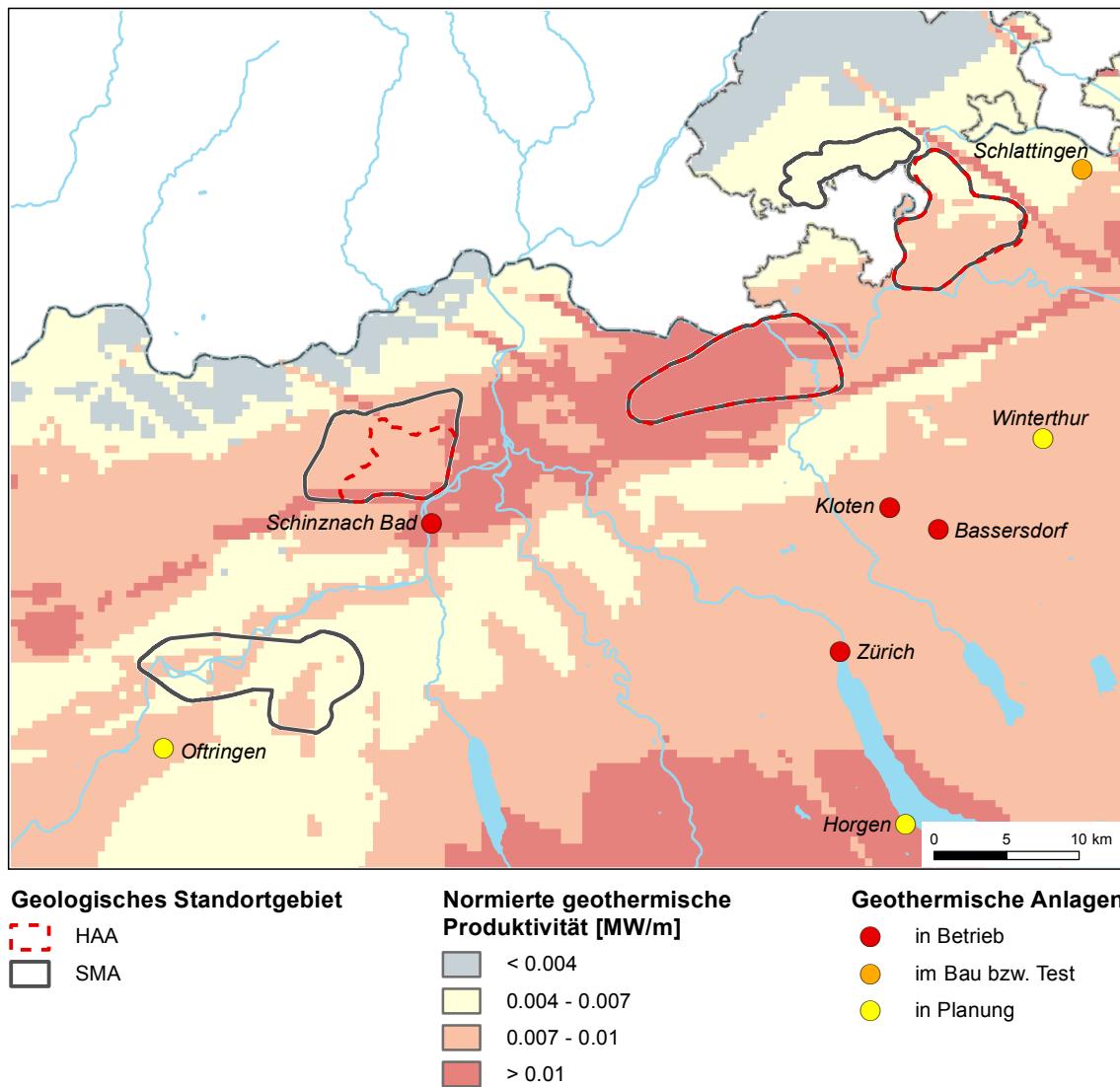


Fig. 4.4-6: Normierte geothermische Produktivität im Grossraum der Standortgebiete in der Nordschweiz (nach Signorelli et al. 2004 und Kohl et al. 2010), vgl. dazu auch Nagra (2014b, Dossier VII).

Informationen über die geothermischen Anlagen stammen von der Schweizerischen Vereinigung für Geothermie (www.geothermie.ch).

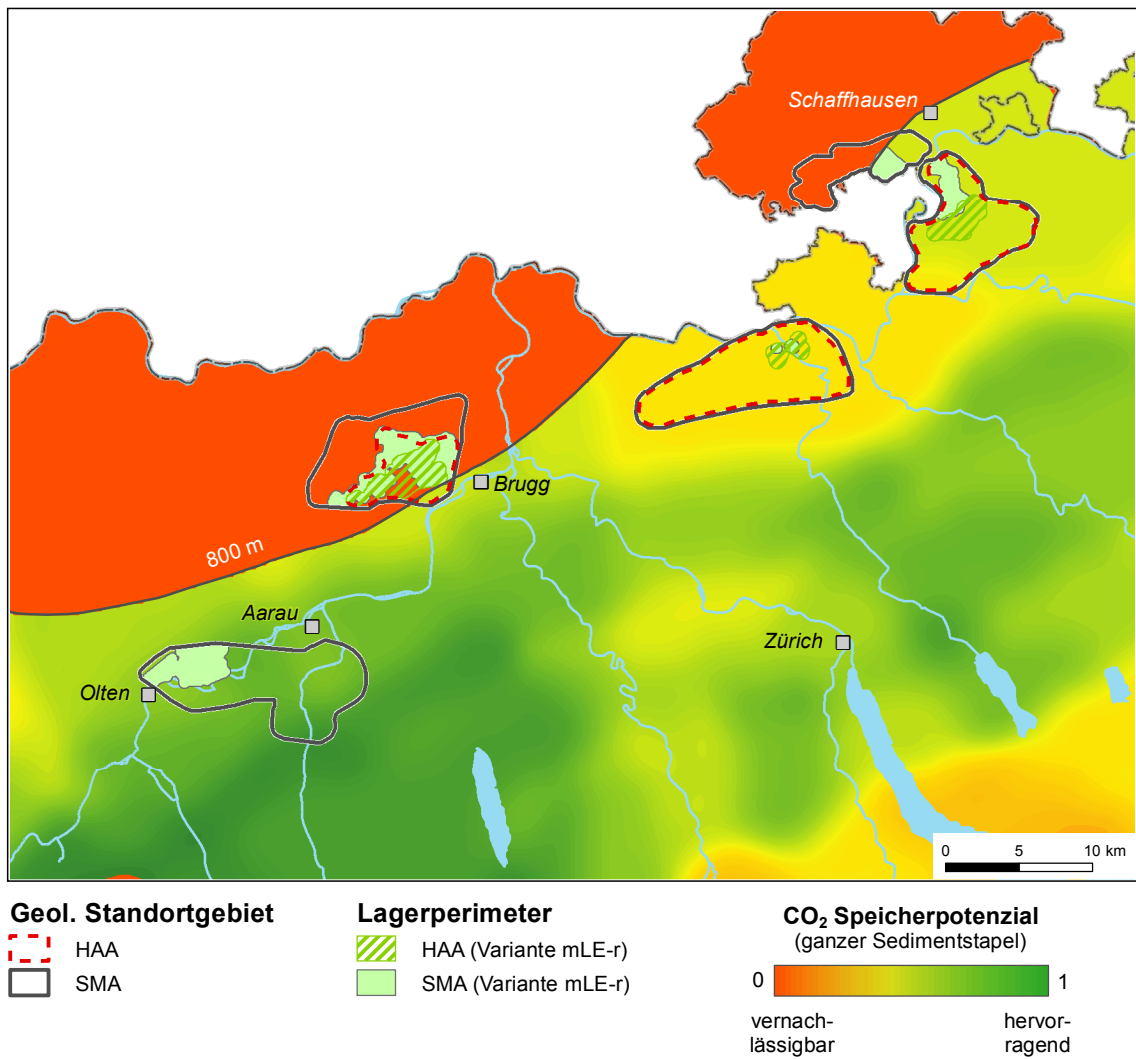


Fig. 4.4-7: CO₂-Speicherpotenzial von salinen sedimentären Aquiferen im Grossraum der Standortgebiete in der Nordschweiz (nach Chevalier et al. 2010 und Diamond et al. 2010), vgl. dazu auch Nagra (2014b, Dossier VII).

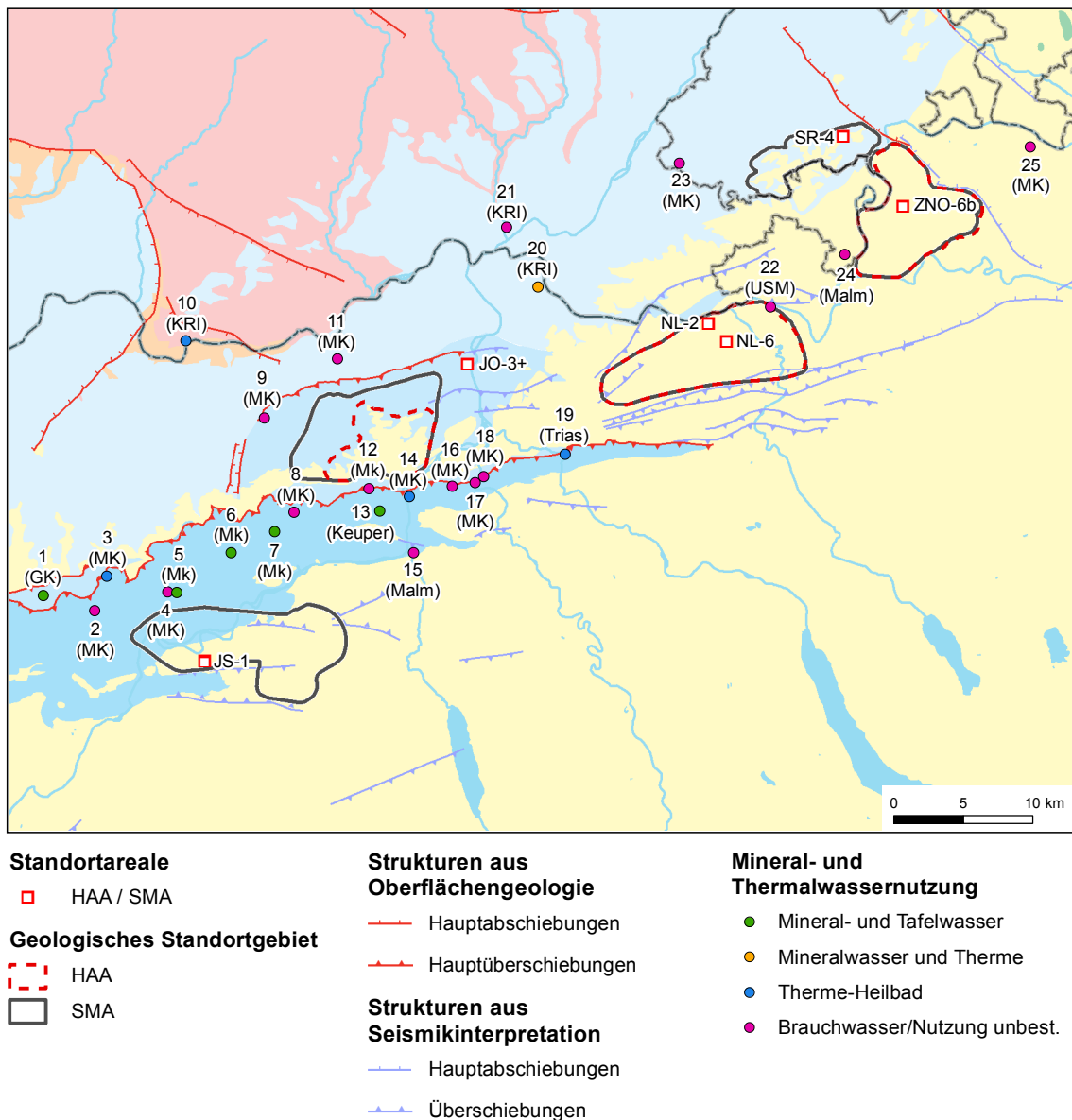


Fig. 4.4-8: Mögliche Nutzungskonflikte in Zusammenhang mit wichtigen Mineral- und Thermalwassernutzungen im Grossraum der Standortgebiete in der Nordschweiz, vgl. dazu Nagra (2014b, Dossier VII).

1 Eptingen; 2 Alter Hauensteintunnel; 3 Bad Ramsach; 4 Bad Lostorf; 5 Lostorf Cristallo; 6 Erlinsbach – Lorenzenbad; 7 Küttigen – Fischbachquelle; 8 Densbüren; 9 Frick – Salzbohrung; 10 Bad Säkingen; 11 Sulz (Salzkanal); 12 Bözbergtunnel; 13 Schinznach – Dorf; 14 Schinznach – Bad; 15 Wildeggen (Iodquelle); 16 Hausen – Habsburg; 17 Mülligen; 18 Birmenstorf; 19 Baden; 20 Bad Zurzach; 21 Waldshut – Tiengen; 22 Eglisau; 23 Trasdadingen; 24 Lottstetten – Nack; 25 Schlattingen

Erläuterung der Abkürzungen (Mineral- und Thermalwassernutzungen): KRI: kristallines Grundgebirge; MK: Muschelkalk; USM: Untere Süsswassermolasse.

Geologischer Hintergrund: Mittelländische Molasse und Tertiär Faltenjura (gelb), Mesozoikum des Tafeljuras (hellblau), Faltenjura (blau), kristallines Grundgebirge (rot), Perm (orange).

4.4.2 Charakterisierung und Bewertung der geologischen Standortgebiete für das SMA-Lager und das HAA-Lager bezüglich grossräumiger Aspekte

Charakterisierung und Bewertung der geologisch-tektonischen Situation

Die Charakterisierung und Bewertung der geologisch-tektonischen Situation erfolgt anhand der Indikatoren 'Erosion im Betrachtungszeitraum', 'Modellvorstellungen zur Langzeitentwicklung (Aspekt Geodynamik und Neotektonik)' und 'Seismizität'.

Fig. 4.4-1 enthält eine Übersicht über die Gliederung des Grossraums der Standortgebiete in der Nordschweiz in tektonische Regimes sowie über die wichtigsten gebietsbegrenzenden geologischen Elemente (regionale Störungszonen und zu meidende tektonische Zonen). Die Figur zeigt auch, wo die massgebenden Lagerperimeter für die Einengung für das SMA-Lager und das HAA-Lager liegen, mit Ausnahme des im Helvetikum liegenden Lagerperimeters SMA-WLB.

Die Bewertung der verschiedenen tektonischen Regimes erfolgt anhand Fig. 4.4-1 und ergibt bezüglich des Indikators 'Modellvorstellungen zur Langzeitentwicklung (Aspekt Geodynamik und Neotektonik)' für das **SMA-Lager** folgendes Bild:

- Der **Tafeljura und das nordöstliche Schweizer Molassebecken** mit den zwei Lagerperimetern SMA-SR und SMA-ZNO (vgl. Fig. 4.4-1) wurden durch den alpinen Fernschub nicht signifikant deformiert. Diese Lagerperimeter sind diesbezüglich entsprechend weniger stark tektonisch überprägt. Das grundsätzlich vorstellbare Szenario einer zukünftig fortschreitenden alpinen Kollisionstektonik (Anhalten des alpinen Fernschubs und/oder transpressive / kompressive Reaktivierung des Nordschweizer Permokarbons) betrifft den Tafeljura und das nordöstliche Schweizer Molassebecken vergleichsweise weniger stark; die Lagerperimeter SMA-SR und SMA-ZNO werden unter Berücksichtigung des Betrachtungszeitraums von 100'000 Jahren für das SMA-Lager bezüglich des Indikators 'Modellvorstellungen zur Langzeitentwicklung (Aspekt Geodynamik und Neotektonik)' als *sehr günstig* bewertet.
- Die **Vorfaltenzone** mit den zwei Lagerperimetern SMA-NL und SMA-JO liegt bereits im Einflussbereich der alpinen Kollisionstektonik (vgl. Fig. 4.4-1) und ist generell stärker tektonisch überprägt als der nördlich davon gelegene Tafeljura und das nordöstliche Schweizer Molassebecken. Die Lagerperimeter SMA-NL und SMA-JO innerhalb der Vorfaltenzone weisen aber keine grösseren Deformationsstrukturen auf. Bei zukünftig fortschreitender alpiner Kollisionstektonik (Anhalten des alpinen Fernschubs und/oder transpressive / kompressive Reaktivierung des Nordschweizer Permokarbons) könnte die Vorfaltenzone insgesamt mässig beansprucht werden; unter Berücksichtigung des Betrachtungszeitraums von 100'000 Jahren für das SMA-Lager werden die Lagerperimeter SMA-NL und SMA-JO bezüglich des Indikators 'Modellvorstellungen zur Langzeitentwicklung (Aspekt Geodynamik und Neotektonik)' ebenfalls als *sehr günstig* bewertet, jedoch etwas weniger günstig als die Lagerperimeter SMA-SR und SMA-ZNO im Tafeljura.
- Die **östliche Subjurrassische Zone** (Jura-Südfuss) mit dem Lagerperimeter SMA-JS wurde in Zusammenhang mit der Bildung des Faltenjuras nach Norden geschoben und vergleichsweise stark beansprucht; dementsprechend ist der Lagerperimeter SMA-JS innerhalb der Subjurrassischen Zone tektonisch intensiver überprägt. Dies gilt auch für den Bereich des Lagerperimeters SMA-JS, welcher von bedeutenden regionalen Störungszonen begrenzt wird. Bei zukünftig fortschreitender alpiner Kollisionstektonik (Anhalten des alpinen Fernschubs und/oder transpressive / kompressive Reaktivierung des Nordschweizer Permo-

karbontrogs) könnte die Subjurassische Zone mässig beansprucht werden; unter Berücksichtigung des Betrachtungszeitraums von 100'000 Jahren für das SMA-Lager wird der Lagerperimeter SMA-JS bezüglich des Indikators 'Modellvorstellungen zur Langzeitentwicklung (Aspekt Geodynamik und Neotektonik)' als *günstig* bewertet. Mit dieser Bewertung wird der im Vergleich zu den anderen relevanten tektonischen Regimes stärkeren tektonischen Beanspruchung der Subjurassischen Zone generell und des Lagerperimeters SMA-JS besonders Rechnung getragen.

- Die **Alpen** mit dem Lagerperimeter SMA-WLB sind charakterisiert durch komplexe Überschiebungen und Faltenbau. Dies hat im Standortgebiet Wellenberg einerseits zu einer Akkumulation von Mergel mit erheblicher Mächtigkeit und lateraler Ausdehnung geführt, andererseits haben die tektonischen Deformationen zu einer erheblichen tektonischen Überprägung geführt, welche verschiedene Wirtgesteinseigenschaften (insbesondere eine Zerschierung der Kalkbankabfolgen) massgeblich beeinflusst. Die rezenten Hebungsdaten (Fig. 4.4-2) und die instrumentelle und historische Seismizität (Fig. 4.4-3) zeigen eine im Vergleich zur Nordschweiz erhöhte neotektonische Aktivität. Hinzu kommt, dass aufgrund der schlechten Explorierbarkeit mit Reflexionsseismik im Unterschied zur Nordschweiz selbst grösseren reaktivierbaren Störungszonen nicht systematisch bzw. zuverlässig ausgewichen werden kann. Bezüglich des Indikators 'Modellvorstellungen zur Langzeitentwicklung (Aspekt Geodynamik und Neotektonik)' wird der Alpenraum und auch der Lagerperimeter SMA-WLB unter Berücksichtigung des Betrachtungszeitraums von 100'000 Jahren für das SMA-Lager generell als *bedingt günstig* eingestuft.

Für das **HAA-Lager** ergibt die Bewertung bezüglich des Indikators 'Modellvorstellungen zur Langzeitentwicklung (Aspekt Geodynamik und Neotektonik)' folgendes Bild:

- Der **Tafeljura und das nordöstliche Schweizer Molassebecken** mit dem Lagerperimeter HAA-ZNO (vgl. Fig. 4.4-1) wurden durch den Fernschub nicht signifikant deformiert. Der Lagerperimeter ist tektonisch nur wenig überprägt. Auch bei Anhalten des Fernschubs wird der Tafeljura sensu stricto nur wenig beansprucht; der Lagerperimeter HAA-ZNO wird unter Berücksichtigung des Betrachtungszeitraums von 1 Million Jahren für das HAA-Lager bezüglich des Indikators 'Modellvorstellungen zur Langzeitentwicklung (Aspekt Geodynamik und Neotektonik)' als *sehr günstig* bewertet.
- Die **Vorfaltenzone** mit den zwei Lagerperimetern HAA-NL und HAA-JO liegt bereits im Einflussbereich der alpinen Kollisionstektonik (vgl. Fig. 4.4-1) und ist generell stärker deformiert als der Tafeljura und das nordöstliche Schweizer Molassebecken. Die Lagerperimeter innerhalb der Vorfaltenzone weisen aber keine grösseren Deformationsstrukturen auf. Bei zukünftig fortschreitender alpiner Kollisionstektonik (Anhalten des alpinen Fernschubs und/oder transpressiver / kompressiver Reaktivierung des Nordschweizer Permo-karbontrogs) könnte die Vorfaltenzone insgesamt mässig beansprucht werden; unter Berücksichtigung des Betrachtungszeitraums von 1 Million Jahren für das HAA-Lager werden die Lagerperimeter HAA-NL und HAA-JO bezüglich des Indikators 'Modellvorstellungen zur Langzeitentwicklung (Aspekt Geodynamik und Neotektonik)' jedoch immer noch als *günstig* bewertet.

Der Indikator 'Erosion im Betrachtungszeitraum' wird wie in SGT Etappe 1 anhand der grossräumigen Hebungsraten (Fig. 4.4-2) beurteilt:

- Für das **SMA-Lager** ergibt sich unter Berücksichtigung des Betrachtungszeitraums von 100'000 Jahren in der Nordschweiz generell die Einstufung *sehr günstig*. (Lagerperimeter SMA-SR, SMA-ZNO, SMA-NL, SMA-JO und SMA-JS). In den Alpen werden die Verhältnisse aufgrund der etwas grösseren Hebungs- und Erosionsraten als *günstig* eingestuft (Lagerperimeter SMA-WLB).

- Für das **HAA-Lager** ergibt sich unter Berücksichtigung des Betrachtungszeitraums von 1 Million Jahren für das HAA-Lager in der Nordschweiz generell die Einstufung *sehr günstig* (Lagerperimeter HAA-ZNO, HAA-NL und HAA-JO).

Die Beurteilung des Indikators 'Seismizität' erfolgt anhand von Fig. 4.4-3 und ergibt folgende Bewertungen:

- **SMA-Lager:** Die Lagerperimeter in der Nordschweiz liegen alle ausserhalb der Zonen mit erhöhter Erdbebenaktivität (Region Basel, Teile des Wallis, des Alpennordrands und Graubündens) und werden als *günstig* bewertet. Der Lagerperimeter SMA-WLB am Alpennordrand wird als *bedingt günstig* bewertet.
- **HAA-Lager:** Die Lagerperimeter für das HAA-Lager liegen alle ausserhalb der Zonen mit erhöhter Erdbebenaktivität (Region Basel, Teile des Wallis, des Alpennordrands und Graubündens) und werden als *günstig* bewertet.

Charakterisierung und Bewertung möglicher Nutzungskonflikte

Die Ausführungen in Nagra (2014b, Dossier VII) führen für die Nordschweiz¹⁴⁹ zu folgendem generellen Bild und ergeben die nachfolgend aufgeführten Bewertungen:

Indikator 'Rohstoffvorkommen unterhalb des Wirtgesteins':

Die Bewertung des Indikators 'Rohstoffvorkommen unterhalb des Wirtgesteins' wird bestimmt durch das Potenzial bezüglich Nutzung der Kohlenwasserstoff-Ressourcen und der Salzvorkommen.

- **Kohlenwasserstoff-Ressourcen:** Gemäss den vorhandenen Unterlagen (vgl. Fig. 4.4-4) haben die Lagerperimeter HAA-NL und SMA-NL das grösste Potenzial, gefolgt vom Lagerperimeter HAA-JO und SMA-JO. Für die Lagerperimeter SMA-SR und SMA-JS wird von einem spekulativen Potenzial ausgegangen und in den Lagerperimetern ZNO besteht kein Potenzial (HAA-ZNO) bzw. ein spekulatives Potenzial (SMA-ZNO). Der Indikator 'Rohstoffvorkommen unterhalb des Wirtgesteins' wird deshalb bezüglich Kohlenwasserstoff-Ressourcen für den Lagerperimeter HAA-ZNO als *sehr günstig*, für die Lagerperimeter SMA-SR, SMA-ZNO und SMA-JS als *günstig* und für die Lagerperimeter SMA-NL, SMA-JO, HAA-NL und HAA-JO als *bedingt günstig* beurteilt.
- **Salzvorkommen:** Die Salzvorkommen sind in Fig. 4.4-5 dargestellt. Die Salzschichten liegen im Bereich der Standortgebiete meist so tief, dass sie für eine wirtschaftliche Nutzung aus heutiger Sicht nicht in Betracht kommen, oder es gibt Hinweise auf eine sehr geringe Mächtigkeit bzw. auf das Nichtvorhandensein von Salzschichten. Einzig im nördlichsten und westlichsten weniger tiefen Bereich des Standortgebiets Jura Ost käme ein Salzabbau in Frage, falls mit zukünftigen Bohrungen eine wirtschaftlich nutzbare Mächtigkeit nachgewiesen werden könnte. Weil ein geologisches Tiefenlager nur eine relativ geringe Grundfläche beansprucht, wären Nutzungskonflikte mit grosser Wahrscheinlichkeit vermeidbar. Im Bereich der beiden Lagerperimeter HAA-JO und SMA-JO liegen die potenziellen Salzvorkommen aber bereits in Tiefen > 700 m, in welchen eine Salzgewinnung als unwirtschaftlich betrachtet wird. Der Indikator 'Rohstoffvorkommen unterhalb des Wirtgesteins' wird deshalb bezüglich Salzvorkommen für alle Lagerperimeter als *sehr günstig* beurteilt; die Salzvorkommen sind für die Beurteilung dieses Indikators nur von untergeordneter Bedeutung.

¹⁴⁹ Die diesbezüglichen Informationen zum Standortgebiet Wellenberg werden von Etappe 1 übernommen.

Bewertung des Indikators 'Rohstoffvorkommen unterhalb des Wirtgesteins': Unter Berücksichtigung der Angaben zu den Kohlenwasserstoff-Ressourcen und zu den Salzvorkommen wird der Indikator 'Rohstoffvorkommen unterhalb des Wirtgesteins' für den Lagerperimeter HAA-ZNO als *sehr günstig*, für die Lagerperimeter SMA-SR, SMA-ZNO und SMA-JS als *günstig* und für die Lagerperimeter SMA-NL, SMA-JO, HAA-NL und HAA-JO als *bedingt günstig* beurteilt; diese Bewertung wird dominiert durch die Bewertung für die Kohlenwasserstoff-Ressourcen.

Indikator 'Geothermie und weitere energiebezogene Nutzungen des Untergrunds':

Die Bewertung des Indikators 'Geothermie und weitere energiebezogene Nutzungen des Untergrunds' wird bestimmt durch die Bedingungen bezüglich Geothermie, CO₂-Speicherung und Erdgasspeicherung im Untergrund.

- **Geothermie**¹⁵⁰: Basierend auf Fig. 4.4-6 sind im Grossraum der Standortgebiete in der Nordschweiz vor allem das untere Aaretal sowie die Ränder¹⁵¹ der Standortgebiete Jura Ost und Nördlich Lägern zu beachten¹⁵². Der Indikator 'Geothermie und weitere energiebezogene Nutzungen des Untergrunds' wird bezüglich Geothermie für die Lagerperimeter SMA-SR, SMA-ZNO, SMA-JS und HAA-ZNO als *günstig*, für die Lagerperimeter SMA-NL, SMA-JO, HAA-NL und HAA-JO wegen ihrer Nähe zu den Permokarbontrögrändern als *bedingt günstig* beurteilt.
- **CO₂-Speicherung im Untergrund**: Die Standortgebiete in der Nordschweiz liegen mit Ausnahme des Standortgebiets Jura-Südfuss ausserhalb der potenziell geeigneten Zonen für die CO₂-Speicherung (vgl. Fig. 4.4-7). Das Standortgebiet Jura-Südfuss liegt am Rand der als *günstig* bezeichneten Zone. Weil ein geologisches Tiefenlager nur eine geringe Fläche beansprucht, wird der Nutzungskonflikt auch dort als vernachlässigbar eingestuft (Diamond et al. 2010). Der Indikator 'Geothermie und weitere energiebezogene Nutzungen des Untergrunds' wird deshalb bezüglich CO₂-Speicherung im Untergrund für alle Lagerperimeter als *günstig* beurteilt, ist aber in der Gesamtbewertung des Indikators 'Geothermie und weitere energiebezogene Nutzungen des Untergrunds' von untergeordneter Bedeutung.
- **Erdgasspeicherung im Untergrund**: Die Erdgasspeicherung wird für alle Standortgebiete als von untergeordneter Bedeutung eingestuft und deshalb für die Bewertung des Indikators 'Geothermie und weitere energiebezogene Nutzungen des Untergrunds' nicht berücksichtigt.

Bewertung des Indikators 'Geothermie und weitere energiebezogene Nutzungen des Untergrunds': Unter Berücksichtigung der Angaben zur Geothermie, zur CO₂-Speicherung und Erdgasspeicherung im Untergrund wird der Indikator 'Geothermie und weitere energiebezogene Nutzungen des Untergrunds' für die Lagerperimeter SMA-SR, SMA-ZNO, SMA-JS und HAA-ZNO als *günstig*, für die Lagerperimeter SMA-NL, SMA-JO, HAA-NL und HAA-JO wegen ihrer Nähe zu den Permokarbontrögrändern als *bedingt günstig* beurteilt; diese Bewertung wird dominiert durch die Bewertung für die Geothermie.

¹⁵⁰ Die Bewertungsskala wird in Übereinstimmung mit der Karte in Nagra (2014b, Dossier VII) gegenüber Etappe 1 leicht angepasst: *sehr günstig* bleibt unverändert (normierte Pn < 0.004 MW/m); *günstig* neu: 0.004 < Pn < 0.007 MW/m, früher: 0.004 < Pn < 0.008 MW/m; *bedingt günstig* neu: 0.007 < Pn < 0.01 MW/m, früher: 0.008 < Pn < 0.012 MW/m; *ungünstig* neu: Pn > 0.01 MW/m, früher: Pn > 0.012 MW/m.

¹⁵¹ Für die Geothermie sind vor allem die Störungssysteme im Bereich der Ränder des Nordschweizer Permokarbontrögs von Bedeutung.

¹⁵² Die Randzonen des Nordschweizer Permokarbontrögs werden bei der Abgrenzung der Lagerperimeter als 'zu meidende tektonische Zonen' behandelt, sodass diesen Randzonen mit den Lagerperimetern ausgewichen wird.

Indikator 'Rohstoffvorkommen oberhalb des Wirtgesteins'¹⁵³

Der Indikator 'Rohstoffvorkommen oberhalb des Wirtgesteins' wird bestimmt durch die mögliche **Nutzung von Steinen und Erden** oberhalb des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs und kann grundsätzlich Steinbrüche und Materialgewinnung für die Zement- bzw. Ziegelindustrie sowie für Natursteine bzw. Hartschotter umfassen. Im Grossraum der Standortgebiete in der Nordschweiz liegt der Schwerpunkt einer möglichen Nutzung auf den Effinger Schichten von ausreichender Mächtigkeit für die Zementindustrie.

Bewertung des Indikators 'Rohstoffvorkommen oberhalb des Wirtgesteins': Dies führt für den Indikator 'Rohstoffvorkommen oberhalb des Wirtgesteins' für alle Standortgebiete zur Bewertung *sehr günstig*, mit Ausnahme des Standortgebiets Jura Ost im Bereich des SMA-Lagerperimeters, der wegen der dort im nördlichsten Bereich des Lagerperimeters vorkommenden mächtigen Effinger Schichten nur als *günstig* bewertet wird.

Indikator 'Mineral- und Thermalwassernutzungen'

Für die **Mineral- und Thermalwassernutzungen** wird wegen der Bedeutung der lokalen Aspekte auf eine generelle Bewertung verzichtet; hier wird für jeden Lagerperimeter spezifisch eine Bewertung vorgenommen (vgl. Kap. 4.4.3 und 4.4.4).

4.4.3 Charakterisierung und Bewertung der geologischen Standortgebiete für das SMA-Lager

4.4.3.1 Einleitung

Nachdem die Unterlagen zur geologisch-tektonischen Situation und zu den Nutzungskonflikten im Untergrund dargestellt und die Bewertung der Lagerperimeter diesbezüglich für das SMA- und HAA-Lager gemeinsam vorgenommen wurde (Kap. 4.4.2), werden nachfolgend für das SMA-Lager die einzelnen Lagerperimeter behandelt¹⁵⁴ (Kap. 4.4.3.2 bis Kap. 4.4.3.7). Am Schluss folgt eine zusammenfassende Darstellung der Bewertungen für das SMA-Lager (Kap. 4.4.3.8).

4.4.3.2 SMA-Lagerperimeter Südranden (SMA-SR)

Hauptmerkmale

Im Lagerperimeter SMA-SR weist der Opalinuston eine Mächtigkeit von ca. 105 m auf und liefert den Hauptbeitrag zur Barrierenwirkung des Gesamtsystems. Die unteren Rahmengesteine (Toniger Lias) tragen ebenfalls zur Barrierenwirkung bei.

¹⁵³ Die Angaben zur Bewertung des Indikators 'Rohstoffvorkommen oberhalb des Wirtgesteins' gelten auch für die Bewertung des Indikators 'Rohstoffvorkommen innerhalb des Wirtgesteins', wie er bei der Bewertung der Wirtgesteine in Kap. 3.3 verwendet wurde.

Der Umgang mit diesem Indikator wurde gegenüber Etappe 1 angepasst; in Etappe 2 wird auf eine Kombination mit der Bewertung des Indikators 'Rohstoffvorkommen unterhalb des Wirtgesteins' verzichtet.

¹⁵⁴ Die Bewertungen werden für den "massgebenden Fall" durchgeführt. Am Schluss der Bewertung für jeden Lagerperimeter folgen Betrachtungen zur Sensitivität bzgl. alternativer Lagerperimeter bzw. bzgl. alternativer Konzeptualisierungen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs.

Der Lagerperimeter SMA-SR liegt im Tafeljura s.str. im Gebiet des Hügelszugs Wannenberg – Lauferberg. Der Lagerperimeter wird geographisch durch die Klettgaurinne (im Norden), die Landesgrenze (im Süden) sowie geologisch durch die Neuhausen-Störung bzw. die Neuhauserwald-Rinne (im Nordosten) und durch die Tiefenlage (im Norden) begrenzt; er weist eine beschränkte laterale Ausdehnung auf und ist ruhig gelagert (Tafeljura s.str.).

Der Lagerperimeter ist durch die für Etappe 2 durchgeführte 2D-Seismik, drei ältere Seismiklinien sowie durch die im Detail bekannte Oberflächengeologie gut dokumentiert. Zahlreiche der detaillierten Kenntnisse über das Standortgebiet Zürich Nordost, die im Rahmen des Projekts 'Entsorgungsnachweis' für das HAA-Lager erworben wurden, lassen sich auf den Lagerperimeter SMA-SR übertragen.

A) Eigenschaften des Opalinustons mit seinen Rahmengesteinen im Lagerperimeter SMA-SR unter Berücksichtigung seiner Konfiguration

Räumliche Ausdehnung (Kriterium 1.1)

Im Lagerperimeter SMA-SR liegt der Top Opalinuston im Tiefenbereich von ca. 270 – 340 m u.T.; die für die Bewertung massgebende minimale Überdeckung beträgt ca. 270 m, sodass die oberen Rahmengesteine als Barriere dort nicht wirksam sind. Wegen der Mächtigkeit des Opalinustons und der barrierenwirksamen unteren Rahmengesteine wird der Indikator 'Mächtigkeit' im Lagerperimeter SMA-SR trotz fehlendem Beitrag der oberen Rahmengesteine als *günstig* beurteilt. Auch unter Berücksichtigung der Resultate der Dosisberechnungen zur Barrierenwirkung bleibt die Bewertung für den Indikator 'Mächtigkeit' *günstig*.

Die laterale Ausdehnung des Lagerperimeters beträgt 3.7 km² (ohne östlichen Teil). Der Lagerperimeter liegt im Tafeljura s.str. und innerhalb des Lagerperimeters SMA-SR ergeben sich aus den seismischen Daten keine konkreten Hinweise auf Störungszonen oder kleinräumige Störungen, sodass keine erheblichen Platzreserven einzuplanen sind. In Bezug auf den Indikator 'Platzangebot untertags' wird der Lagerperimeter SMA-SR wegen des Flächenangebots von nur 3.7 km² knapp als *günstig* eingestuft.

Fazit: Das Kriterium 'Räumliche Ausdehnung' wird im Lagerperimeter SMA-SR insgesamt als *günstig* beurteilt; durch die tektonische Überprägung ist keine weitere signifikante Beschränkung der knappen Platzverhältnisse zu erwarten.

Hydraulische Barrierenwirkung (Kriterium 1.2)

Die Tiefenlage der Obergrenze des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs wird bezüglich des Indikators 'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteins-Dekompaktion' für den Lagerperimeter SMA-SR als *bedingt günstig* eingestuft, denn die minimale Überdeckung der Obergrenze des Opalinustons beträgt nur ca. 270 m, sodass die oberen Rahmengesteine (Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger' und Effinger Schichten) nicht als Barriere wirksam sind; die hydraulische Barrierenwirkung des Opalinustons (massgebend für Bewertung des Indikators 'Hydraulische Durchlässigkeit') hingegen ist vollständig wirksam. Auch die unteren Rahmengesteine (Toniger Lias) tragen zur Barrierenwirkung bei. Aufgrund der stratigraphischen Verhältnisse wird im Lagerperimeter SMA-SR ein ausgeprägter Grundwasserstockwerkbau erwartet; dieser wurde südlich des Lagerperimeters in der Bohrung Benken nachgewiesen. Deshalb wird der Indikator 'Grundwasserstockwerke' knapp mit *sehr günstig* bewertet.

Fazit: Zusammen mit der wirtgesteinsspezifisch vorgenommenen *sehr günstigen* Beurteilung des Opalinustons bezüglich des Indikators 'Hydraulische Durchlässigkeit' (vgl. Kap. 3.3) fällt die Bewertung des Kriteriums 'Hydraulische Barrierenwirkung' für den Lagerperimeter SMA-SR insgesamt *günstig* aus.

Geochemische Bedingungen (Kriterium 1.3)

Das Kriterium 'Geochemische Bedingungen' wird wirtgesteinsspezifisch beurteilt (vgl. Kap. 3.3); die Bewertung für den Lagerperimeter SMA-SR fällt insgesamt *sehr günstig* aus.

Freisetzungspfade (Kriterium 1.4)

Alle Indikatoren des Kriteriums 'Freisetzungspfade' werden wirtgesteinsspezifisch beurteilt, auch der Indikator 'Länge der massgebenden Freisetzungspfade' (vgl. Kap. 3.3). Die Bewertung des Kriteriums 'Freisetzungspfade' für den Lagerperimeter SMA-SR fällt insgesamt *sehr günstig* aus.

Gesamtbewertung der Kriteriengruppe 'Eigenschaften des Wirtgesteins / einschlusswirksamen Gebirgsbereichs' für den Opalinuston mit seinen Rahmengesteinen im Lagerperimeter SMA-SR: *günstig*.

B) Langzeitstabilität im Lagerperimeter SMA-SR

Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften (Kriterium 2.1)

Die Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften im Lagerperimeter SMA-SR wird einerseits aus Sicht der geologisch-tektonischen Situation beurteilt (vgl. Kap. 4.4.2). Andererseits wird der Indikator 'Potenzial zur Bildung neuer Wasserwegsamkeiten (Verkarstung)' wirtgesteinsspezifisch beurteilt (vgl. Kap. 3.3); im Falle des Opalinustons erübrigt sich eine diesbezügliche Beurteilung der Konfiguration, weil eine Verkarstung im Opalinuston ausgeschlossen werden kann; es ergibt sich für diesen Indikator eine *sehr günstige* Bewertung. In Ergänzung zu Kap. 4.4.2 wird beim Indikator 'Modellvorstellungen zur Langzeitentwicklung (Geodynamik und Neotektonik; weitere Prozesse)' auch die Möglichkeit der Bildung einer Durchbruchsrinne berücksichtigt. Da sich im Lagerperimeter SMA-SR innerhalb des Betrachtungszeitraums für ein SMA-Lager von 100'000 Jahren eine Durchbruchsrinne bilden könnte, wird dieser Indikator insgesamt als *bedingt günstig* bewertet. Die Bewertung des Kriteriums 'Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften' fällt für den Lagerperimeter SMA-SR insgesamt *günstig* aus.

Erosion (Kriterium 2.2)

Innerhalb des für ein SMA-Lager relevanten Betrachtungszeitraums von 100'000 Jahren und für die erwarteten grossräumigen Hebungsraten (vgl. Kap. 4.4.2) wird die zukünftige Erosion in der Nordschweiz im Bereich von maximal 50 m liegen. Im Lagerperimeter SMA-SR liegt die Obergrenze des Opalinustons in einem Tiefenbereich von ca. 100 – 220 m unter der lokalen Erosionsbasis. Die massgebende minimale Tiefe des Opalinustons unter lokaler Erosionsbasis beträgt 100 m. Deshalb wird der Indikator 'Tiefenlage unter lokaler Erosionsbasis im Hinblick auf die Bildung neuer Rinnen' im Lagerperimeter SMA-SR insgesamt als *günstig* beurteilt, auch wenn die Reserven klein sind.

Westlich grenzt der Lagerperimeter SMA-SR an die pleistozäne Neuhauserwald-Rinne, und nördlich reicht er teilweise nahe an die Klettgaurinne. Der Indikator 'Tiefenlage unter Fels im Hinblick auf glaziale Tiefenerosion' wird für den Lagerperimeter SMA-SR insgesamt als *bedingt günstig* beurteilt¹⁵⁵.

Fazit: Zusammen mit der *sehr günstigen* Beurteilung des Indikators 'Erosion im Betrachtungszeitraum' in der Nordschweiz (vgl. Kap. 4.4.2) fällt die Bewertung des Kriteriums 'Erosion' im Lagerperimeter SMA-SR insgesamt *günstig* aus.

Lagerbedingte Einflüsse (Kriterium 2.3)

Das Kriterium 'Lagerbedingte Einflüsse' wird wirtgesteinsspezifisch beurteilt (vgl. Kap. 3.3); die Bewertung für den Lagerperimeter SMA-SR fällt insgesamt *günstig* aus.

Nutzungskonflikte (Kriterium 2.4)

Die möglichen Nutzungskonflikte wurden in Kap. 4.4.2 behandelt. Unter Berücksichtigung der dort aufgeführten Unterlagen werden der Indikator 'Rohstoffvorkommen unterhalb des Wirtgesteins' für den Lagerperimeter SMA-SR insgesamt als *günstig* und der Indikator 'Rohstoffvorkommen oberhalb des Wirtgesteins' als *sehr günstig* beurteilt.

Im Lagerperimeter SMA-SR sind keine bedeutenden Mineral- und Thermalwassernutzungen vorhanden. In Lottstetten-Nack, rund 6 km vom Lagerperimeter entfernt, befindet sich eine Bohrung, die thermales Wasser im Malm-Aquifer fasst. Das Wasser besitzt eine hohe Verweilzeit. Es fliesst artesisch in einen Brunnen aus und wird zurzeit nicht genutzt. Je nach Linienführung könnte der Zugangstunnel die hydraulisch verbundenen Malmkalke in einem Abstand von rund 6 km durchfahren. Eine qualitative Beeinflussung ist aufgrund der hohen Verweilzeit praktisch ausgeschlossen, und eine quantitative Beeinflussung ist unwahrscheinlich. Da beim Durchfahren des Malms – falls erforderlich – spezielle Abdichtungsmassnahmen vorgenommen würden, sinkt die Wahrscheinlichkeit für eine signifikante Beeinträchtigung noch weiter. Für die ungenutzte Bohrung in den Muschelkalk in Trasadingen ist eine Beeinflussung ausgeschlossen. Entsprechend fällt die Beurteilung des Indikators 'Mineral- und Thermalwassernutzungen' für den Lagerperimeter SMA-SR *günstig* aus.

Die Unterlagen zur Geothermie und zu weiteren energiebezogenen Nutzungen des Untergrunds finden sich in Kap. 4.4.2; dort wurden auch die Lagerperimeter beurteilt. Basierend auf den dort aufgeführten Aussagen ergibt sich für den Indikator 'Geothermie und weitere energiebezogene Nutzungen des Untergrunds' für den Lagerperimeter SMA-SR die Beurteilung *günstig*.

Fazit: Zusammen mit der *sehr günstigen* Beurteilung des nicht als nutzungswürdig eingestuften Rohstoffvorkommens innerhalb des Opalinustons (vgl. Kap. 3.3) fällt die Bewertung des Kriteriums 'Nutzungskonflikte' im Lagerperimeter SMA-SR insgesamt *günstig* aus.

Gesamtbewertung der Kriteriengruppe 'Langzeitstabilität' für den Lagerperimeter SMA-SR: *günstig*.

¹⁵⁵ Bei der Bewertung des Indikators 'Tiefenlage unter Fels im Hinblick auf glaziale Tiefenerosion' wird die Neuhauserwald-Rinne wie eine bestehende glazial übertiefte Rinne behandelt.

C) Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen im Lagerperimeter SMA-SR

Charakterisierbarkeit der Gesteine (Kriterium 3.1)

Das Kriterium 'Charakterisierbarkeit der Gesteine' wird wirtgesteinsspezifisch beurteilt (vgl. Kap. 3.3); die Bewertung für den Lagerperimeter SMA-SR fällt insgesamt *sehr günstig* aus.

Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse (Kriterium 3.2)

Die Explorationsverhältnisse im geologischen Untergrund des Wirtgesteins Opalinuston sind generell *sehr günstig*, vgl. Kap. 3.3. Durch die eingeschränkte Abbildungsqualität im Südosten des Lagerperimeters SMA-SR und die eingeschränkte Abbildung der oberen Wirtgesteinsgrenzen wird der Indikator 'Explorationsverhältnisse im geologischen Untergrund' für den Lagerperimeter SMA-SR lokal knapp als *sehr günstig* beurteilt.

Der Lagerperimeter SMA-SR kann mit einer geeigneten 3D-seismischen Messung erkundet werden. Aufgrund der geringen Tiefenlage ist ein erhöhter Aufwand zur strikten Einhaltung der Messgeometrie erforderlich. Daher wird der Indikator 'Explorationsbedingungen an Oberfläche' für den Lagerperimeter SMA-SR knapp als *sehr günstig* bewertet.

Fazit: Insgesamt wird das Kriterium 'Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse' im Lagerperimeter SMA-SR knapp als *sehr günstig* beurteilt.

Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen (Kriterium 3.3)

Das Kriterium 'Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen' wird einerseits bezüglich der geologisch-tektonischen Situation (vgl. Kap. 4.4.2) und andererseits wirtgesteinsspezifisch beurteilt (vgl. Kap. 3.3). In Ergänzung zu Kap. 4.4.2 wird beim Indikator 'Modellvorstellungen zur Langzeitentwicklung (Geodynamik und Neotektonik; weitere Prozesse)' auch die Möglichkeit der Bildung einer Durchbruchsrinne berücksichtigt. Da sich im Standortgebiet Südranden innerhalb des Betrachtungszeitraums für ein SMA-Lager von 100'000 Jahren eine Durchbruchsrinne bilden und die Überdeckung stark reduzieren könnte, wird dieser Indikator insgesamt als *bedingt günstig* bewertet. Zusammen mit der *sehr günstigen* Bewertung des Indikators 'Unabhängige Evidenzen der Langzeitisolation' (Kap. 3.3) fällt die Bewertung des Kriteriums 'Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen' für den Lagerperimeter SMA-SR insgesamt *günstig* aus.

Gesamtbewertung der Kriteriengruppe 'Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen' für den Lagerperimeter SMA-SR: knapp *sehr günstig*.

D) Bautechnische Eignung des Lagerperimeters SMA-SR

Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen (Kriterium 4.1)

Im Lagerperimeter SMA-SR weist die Lagerebene (Annahme: Lagerebene in der Mitte des Opalinustons) eine Tiefenlage von ca. 320 – 390 m u.T. auf; die für die Bewertung massgebende maximale Tiefe der Lagerebene beträgt ca. 390 m u.T. Dies ergibt für den Indikator 'Tiefenlage im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit (u.B. Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften)' für den Lagerperimeter SMA-SR die Bewertung *sehr günstig*.

Fazit: Zusammen mit dem für den Opalinuston als *günstig* eingestuften Indikator 'Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften' für den Opalinuston, wird das Kriterium 'Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen' im Lagerperimeter SMA-SR für die betrachteten Tiefenlagen insgesamt knapp als *sehr günstig* beurteilt.

Untertägige Erschliessung und Wasserhaltung (Kriterium 4.2)

Der Zugang nach Untertag vom Standortareal SR-4 zum untertägigen Lagerperimeter kann über eine Rampe oder über einen Schacht erfolgen. Die im Fall der Verwendung einer Rampe zu durchquerenden Gesteinsformationen (Lockergestein, Malmkalke, Effinger Schichten, Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger' und Opalinuston) werden aus bautechnischer und hydrogeologischer Sicht u.a. aufgrund der geringen Tektonisierung als mehrheitlich unproblematisch erachtet, auch wenn Verkarstungsphänomene in den Malmkalken erwartet und somit von Wasserzutritten bzw. -einbrüchen ausgegangen werden muss, allerdings ohne hohe Wasserüberdrücke. Wasserzutritte sind für alle kalkigen bzw. spröderen Einheiten auch aus offenen Klüften und gegebenenfalls entlang von Störungszonen möglich. Auch die erforderlichen Schachtbauwerke (Lüftungs- bzw. Betriebsschacht und der Förderschacht, falls keine Rampe verwendet wird) durchqueren die gleichen Gesteinsformationen. Der Indikator 'Geotechnische und hydrogeologische Verhältnisse in überlagernden Gesteinsformationen' kann für den Lagerperimeter SMA-SR wegen der möglichen technischen Massnahmen trotz des erwarteten Karsts insgesamt als *günstig* bewertet werden. Weiter ist zu beachten, dass der Lagerperimeter SMA-SR die Flexibilität bietet, für den Zugang nach Untertag vom Standortareal SR-4 aus sowohl Schacht als auch Rampe verwenden zu können.

Eine natürliche Gasführung im Opalinuston kann praktisch ausgeschlossen werden; dies ergibt für den Indikator 'Natürliche Gasführung (im Wirtgestein)' für den Lagerperimeter SMA-SR die Beurteilung *sehr günstig*.

Fazit: Das Kriterium 'Untertägige Erschliessung und Wasserhaltung' im Lagerperimeter SMA-SR wird insgesamt knapp als *sehr günstig* beurteilt.

Gesamtbewertung der Kriteriengruppe 'Bautechnische Eignung' für den Lagerperimeter SMA-SR: knapp *sehr günstig*.

Prüfung der Sensitivität der Bewertungen für den Lagerperimeter SMA-SR

Zur Prüfung der Sensitivität der oben für den "massgebenden Fall" durchgeführten Bewertungen werden diese mit den Bewertungen der alternativen Lagerperimeter verglichen, vgl. die Darstellungen der abgegrenzten Lagerperimeter in Anhang B (inkl. tabellarische Kurzcharakterisierung) sowie die Bewertung der "bewertbaren" Lagerperimeter¹⁵⁶ in Anhang C.3.1.2. Der Vergleich der Bewertungen ergibt folgendes Bild:

Eine Verbesserung des Platzangebots gegenüber dem "massgebenden Fall" ergibt sich nur, wenn die Anforderungen an die Erosion über das zulässige Mass hinaus gelockert werden (Fälle *SMA-SR-aL1-r* und *SMA-SR-aL3-r*), die Bewertung des Platzangebots bleibt jedoch immer bei *günstig* mit Ausnahme des Falls *SMA-SR-aL4-t*, wo eine *bedingt günstige* Bewertung resultiert. Wird angestrebt, die Situation bezüglich Erosion bzw. Dekompaktion zu verbessern, dann resultiert ein ungenügendes Platzangebot. Nur im Fall der Annahme eines tiefer liegenden

¹⁵⁶ In Tab. 4.2-3 bzw. Tab. B-1 ist aufgeführt, welche von den abgegrenzten und in Anhang B dargestellten Lagerperimetern bewertet werden.

Wirtgesteins (Berücksichtigung der Ungewissheiten in der Tiefenlage in den Fällen *SMA-SR-aL4-t* und *SMA-SR-aL5-t*) ergibt sich bezüglich Erosion eine leicht vorteilhaftere Situation, ohne dass sich jedoch die Gesamtbewertung signifikant ändert. Der Fall mit untieferem Wirtgestein (*SMA-SR-aL6u*) ergibt bezüglich Erosion eine etwas weniger vorteilhafte Situation. Die detaillierten Bewertungen sind in Anhang C.3.1.2 zu finden. Insgesamt bietet das Standortgebiet Südranden nur eine sehr beschränkte Flexibilität zur untertägigen Anordnung des Lagers.

Fazit: Die Bewertungen der alternativen Lagerperimeter für das Standortgebiet Südranden führen nicht zu einer signifikant anderen Gesamtbewertung. Die Flexibilität bei der untertägigen Anordnung des Lagers ist insgesamt sehr beschränkt.

4.4.3.3 SMA-Lagerperimeter Zürich Nordost (SMA-ZNO)

Hauptmerkmale

Im Lagerperimeter SMA-ZNO weist der Opalinuston eine Mächtigkeit von ca. 110 m auf und liefert den Hauptbeitrag zur Barrierenwirkung des Gesamtsystems. Die Rahmengesteine unterhalb und oberhalb des Opalinustons (Toniger Lias bzw. Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger' und Effinger Schichten) steuern zusätzlich signifikante Beiträge zur Barrierenwirkung bei.

Der Lagerperimeter SMA-ZNO liegt im Tafeljura s.str. und wird geographisch durch den Rhein (im Westen und Nordwesten) und geologisch durch die Neuhausen-Störung (im Nordosten) sowie durch die maximale Tiefenlage bzw. die 'zu meidende tektonische Zone' (im Süden) begrenzt; der Lagerperimeter weist eine grosse laterale Ausdehnung auf und ist sehr ruhig gelagert. Es existieren detaillierte Kenntnisse über den geologischen Untergrund des Lagerperimeters, die für das Projekt 'Entsorgungsnachweis' für HAA mit einer 3D-Seismikkampagne und der Bohrung Benken erworben wurden.

A) **Eigenschaften des Opalinustons mit seinen Rahmengesteinen im Lagerperimeter SMA-ZNO unter Berücksichtigung seiner Konfiguration**

Räumliche Ausdehnung (Kriterium 1.1)

Im Lagerperimeter SMA-ZNO liegt der Top Opalinuston im Tiefenbereich von ca. 400 – 550 m u.T.; die für die Bewertung massgebende minimale Überdeckung beträgt ca. 400 m, sodass die gesamten oberen Rahmengesteine (rund 90 m mächtig) als Barriere wirksam sind. Damit wird der Indikator 'Mächtigkeit' im Lagerperimeter SMA-ZNO als *sehr günstig* beurteilt. Auch unter Berücksichtigung der Resultate der Dosisberechnungen zur Barrierenwirkung bleibt die Bewertung für den Indikator 'Mächtigkeit' sehr günstig.

Die laterale Ausdehnung des Lagerperimeters beträgt 6.5 km². Der Lagerperimeter liegt im Tafeljura und in der 3D-Seismik sind nur beschränkte Anzeichen einer tektonischen Beanspruchung sichtbar, sodass nur wenig Platzreserven einzuplanen sind. Der Lagerperimeter SMA-ZNO bietet mit einer Fläche von 6.5 km² grosse Platzreserven, die etwas mehr als dem Zweifachen des Platzbedarfs des umhüllenden Abfallinventars entsprechen. In Bezug auf den Indikator 'Platzangebot untertags' wird der Lagerperimeter SMA-ZNO knapp als *sehr günstig* eingestuft.

Fazit: Das Kriterium 'Räumliche Ausdehnung' wird im Lagerperimeter SMA-ZNO insgesamt als *sehr günstig* beurteilt.

Hydraulische Barrierenwirkung (Kriterium 1.2)

Die Tiefenlage der Obergrenze des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs wird bezüglich des Indikators 'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteins-Dekompaktion' für den Lagerperimeter SMA-ZNO als *sehr günstig* eingestuft, denn die minimale Überdeckung der Obergrenze des Opalinustons beträgt ca. 400 m, sodass die oberen Rahmengesteine grösstenteils (Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger'; rund 90 m mächtig) als Barriere wirksam sind. Weiter kommt auch die hydraulische Barrierenwirkung des Opalinustons (massgebend für Bewertung des Indikators 'Hydraulische Durchlässigkeit') voll zur Entfaltung. Zusätzlich tragen auch die unteren Rahmengesteine (Toniger Lias) zur Barrierenwirkung bei. Im Lagerperimeter SMA-ZNO wurde in der Bohrung Benken ein ausgeprägter Grundwasserstockwerkbau nachgewiesen; dies ergibt für den Indikator 'Grundwasserstockwerke' die Bewertung *sehr günstig*.

Fazit: Zusammen mit der wirtgesteinsspezifisch vorgenommenen *sehr günstigen* Beurteilung des Opalinustons bezüglich des Indikators 'Hydraulische Durchlässigkeit'(vgl. Kap. 3.3) fällt die Bewertung des Kriteriums 'Hydraulische Barrierenwirkung' für den Lagerperimeter SMA-ZNO insgesamt *sehr günstig* aus.

Geochemische Bedingungen (Kriterium 1.3)

Das Kriterium 'Geochemische Bedingungen' wird wirtgesteinsspezifisch beurteilt (vgl. Kap. 3.3); die Bewertung für den Lagerperimeter SMA-ZNO fällt insgesamt *sehr günstig* aus.

Freisetzungspfade (Kriterium 1.4)

Alle Indikatoren des Kriteriums 'Freisetzungspfade' werden wirtgesteinsspezifisch beurteilt, auch der Indikator 'Länge der massgebenden Freisetzungspfade' (vgl. Kap. 3.3). Die Bewertung des Kriteriums 'Freisetzungspfade' für den Lagerperimeter SMA-ZNO fällt insgesamt *sehr günstig* aus.

Gesamtbewertung der Kriteriengruppe 'Eigenschaften des Wirtgesteins / einschlusswirksamen Gebirgsbereichs' für den Opalinuston mit seinen Rahmengesteinen im Lagerperimeter SMA-ZNO: *sehr günstig*.

B) Langzeitstabilität im Lagerperimeter SMA-ZNO

Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften (Kriterium 2.1)

Die Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften im Lagerperimeter SMA-ZNO wird einerseits aus Sicht der geologisch-tektonischen Situation beurteilt (vgl. Kap. 4.4.2). Andererseits wird der Indikator 'Potenzial zur Bildung neuer Wasserwegsamkeiten (Verkarstung)' wirtgesteinsspezifisch beurteilt (vgl. Kap. 3.3); im Falle des Opalinustons erübrigt sich eine diesbezügliche Beurteilung der Konfiguration, weil eine Verkarstung im Opalinuston ausgeschlossen werden kann; es ergibt sich für diesen Indikator eine *sehr günstige* Bewertung. In Ergänzung zu Kap. 4.4.2 wird beim Indikator 'Modellvorstellungen zur Langzeitentwicklung (Geodynamik und Neotektonik; weitere Prozesse)' auch die Möglichkeit der Bildung einer Durchbruchsrinne berücksichtigt. Im Lagerperimeter könnte sich zwar innerhalb des Betrachtungszeitraums für ein SMA-Lager von 100'000 Jahren eine Durchbruchsrinne bilden, diese kann jedoch das Lager wegen der grossen Tiefenlage nicht beeinträchtigen. Dieser Indikator wird deshalb insgesamt als *sehr günstig* bewertet. Die Bewertung des Kriteriums 'Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften' fällt für den Lagerperimeter SMA-ZNO insgesamt *sehr günstig* aus.

Erosion (Kriterium 2.2)

Innerhalb des für ein SMA-Lager relevanten Betrachtungszeitraums von 100'000 Jahren und für die erwarteten grossräumigen Hebungsraten (vgl. Kap. 4.4.2) wird die zukünftige Erosion in der Nordschweiz im Bereich von maximal 50 m liegen. Im Lagerperimeter SMA-ZNO liegt die Obergrenze des Opalinustons in einem Tiefenbereich von ca. 300 – 480 m unter der Erosionsbasis. Die massgebende minimale Tiefe des Opalinustons unter Erosionsbasis beträgt ca. 300 m. Aus diesen Gründen wird der Indikator 'Tiefenlage unter lokaler Erosionsbasis im Hinblick auf die Bildung neuer Rinnen' im Lagerperimeter SMA-ZNO insgesamt als *sehr günstig* beurteilt.

Südlich des Lagerperimeters SMA-ZNO befindet sich das glazial übertiefte Thurtal mit einer nach Norden abzweigenden Felsrinne. Der Lagerperimeter liegt nicht direkt im Bereich von übertiefen Felsrinnen und der Top Opalinuston mindestens ca. 380 m unter der Felsoberfläche. Der Indikator 'Tiefenlage unter Fels im Hinblick auf glaziale Tiefenerosion' wird für den Lagerperimeter SMA-ZNO bei einem Betrachtungszeitraum von 100'000 Jahren insgesamt als *sehr günstig* beurteilt.

Fazit: Zusammen mit der *sehr günstigen* Beurteilung des Indikators 'Erosion im Betrachtungszeitraum' in der Nordschweiz (vgl. Kap. 4.4.2) fällt die Bewertung des Kriteriums 'Erosion' im Lagerperimeter SMA-ZNO insgesamt *sehr günstig* aus.

Lagerbedingte Einflüsse (Kriterium 2.3)

Das Kriterium 'Lagerbedingte Einflüsse' wird wirtgesteinsspezifisch beurteilt (vgl. Kap. 3.3); die Bewertung für den Lagerperimeter SMA-ZNO fällt insgesamt *günstig* aus.

Nutzungskonflikte (Kriterium 2.4)

Die möglichen Nutzungskonflikte wurden in Kap. 4.4.2 behandelt. Unter Berücksichtigung der dort aufgeführten Unterlagen wird der Indikator 'Rohstoffvorkommen unterhalb des Wirtgesteins' für den Lagerperimeter SMA-ZNO insgesamt als *günstig* beurteilt. Der Indikator 'Rohstoffvorkommen oberhalb des Wirtgesteins' erhält die Bewertung *sehr günstig*.

Im Lagerperimeter SMA-ZNO sind keine bedeutenden Mineral- und Thermalwassernutzungen vorhanden. Die Thermalwasserbohrung Lottstetten-Nack liegt ca. 1 km westlich des geologischen Standortgebiets. Das Thermalwasser aus dem Malm-Aquifer fliesst artesisch in einen öffentlich zugänglichen Brunnen aus. Eine direkte qualitative Beeinflussung durch den Bau der Zugangsbauwerke ist nicht zu erwarten. In gespannten Grundwasserleitern können Druckspiegelabsenkungen jedoch bedeutende Reichweiten haben. Bei Bauwerken ohne Möglichkeiten für eine gravitative Wasserentsorgung ist es generell das Ziel, den Wasserzufluss durch eine optimierte Linienführung und Abdichtungsmassnahmen (Grouting) so gering wie möglich zu halten. Dadurch ist auch ein maximaler Schutz des artesisch gespannten Thermalwasservorkommens gewährleistet. Da in grösseren Tiefen keine vollständige Abdichtung der Bauwerke möglich ist, kann eine quantitative Beeinflussung des Thermalwasserbrunnens Lottstetten-Nack nicht ausgeschlossen werden. Die heute nicht mehr genutzten sogenannten Mineralquellen von Eglisau befinden sich rund 6 km vom Südwestrand des geologischen Standortgebiets. Das Mineralwasser wurde mittels Bohrungen aus durchlässigen Abschnitten der USM gefördert. Aus diversen Überlegungen ist eine qualitative Beeinflussung auszuschliessen. In Schlattingen wurden zwei Bohrungen in den Muschelkalk-Aquifer abgeteuft, um Gewächshäuser mit dem Thermalwasser zu beheizen. Eine Beeinflussung wird hier ausgeschlossen. Insgesamt wird der Indikator 'Mineral- und Thermalwassernutzungen' knapp als *günstig* beurteilt.

Die Unterlagen zur Geothermie und zu weiteren energiebezogenen Nutzungen des Untergrunds finden sich in Kap. 4.4.2; dort wurden auch die Lagerperimeter beurteilt. Basierend auf den dort aufgeführten Aussagen ergibt sich für den Indikator 'Geothermie und weitere energiebezogene Nutzungen des Untergrunds' für den Lagerperimeter SMA-ZNO die Beurteilung *günstig*.

Fazit: Zusammen mit der *sehr günstigen* Beurteilung des nicht als nutzungswürdig eingestuften Rohstoffvorkommens innerhalb des Opalinustons (vgl. Kap. 3.3) fällt die Bewertung des Kriteriums 'Nutzungskonflikte' im Lagerperimeter SMA-ZNO insgesamt *günstig* aus.

Gesamtbewertung der Kriteriengruppe 'Langzeitstabilität' für den Lagerperimeter SMA-ZNO: knapp sehr günstig.

C) Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen im Lagerperimeter SMA-ZNO

Charakterisierbarkeit der Gesteine (Kriterium 3.1)

Das Kriterium 'Charakterisierbarkeit der Gesteine' wird wirtgesteinsspezifisch beurteilt (vgl. Kap. 3.3); die Bewertung für den Lagerperimeter SMA-ZNO fällt insgesamt *sehr günstig* aus.

Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse (Kriterium 3.2)

Die Explorationsverhältnisse im geologischen Untergrund des Wirtgesteins Opalinuston sind generell *sehr günstig* (vgl. Kap. 3.3). Im Bereich des Lagerperimeters SMA-ZNO ist das seismische Abbild gut bis sehr gut. Der Indikator 'Explorationsverhältnisse im geologischen Untergrund' des Lagerperimeters SMA-ZNO wird deshalb unter Einbezug der geplanten ergänzenden Seismik¹⁵⁷ als *sehr günstig* beurteilt.

Die geplante ergänzende seismische Erkundung des Lagerperimeters SMA-ZNO ist mit einer geeigneten 3D-seismischen Messung gut durchführbar. Die Abbildung im Bereich Neuhausen / Rheinfall erfordert jedoch einen erhöhten operativen Aufwand. Daher wird der Indikator 'Explorationsbedingungen an Oberfläche' im Lagerperimeter SMA-ZNO nur als *günstig* eingestuft.

Fazit: Insgesamt wird das Kriterium 'Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse' im Lagerperimeter SMA-ZNO knapp als *sehr günstig* beurteilt.

Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen (Kriterium 3.3)

Das Kriterium 'Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen' wird einerseits bezüglich der geologisch-tektonischen Situation (vgl. Kap. 4.4.2) und andererseits wirtgesteinsspezifisch beurteilt (vgl. Kap. 3.3). In Ergänzung zu Kap. 4.4.2 wird beim Indikator 'Modellvorstellungen zur Langzeitentwicklung (Geodynamik und Neotektonik; weitere Prozesse)' auch die Möglichkeit der Bildung einer Durchbruchrinne berücksichtigt. Im Lagerperimeter könnte sich zwar innerhalb des Betrachtungszeitraums für ein SMA-Lager von 100'000 Jahren eine Durchbruchrinne bilden, diese kann jedoch das Lager wegen der grossen Tiefenlage nicht beeinträchtigen. Dieser Indikator wird deshalb insgesamt als *sehr günstig* bewertet. Zusammen mit der *sehr*

¹⁵⁷ Vergleiche dazu die Hinweise auf erdwissenschaftliche Untersuchungen für Etappe 3 in Kap. 6.

günstigen Bewertung des Indikators 'Unabhängige Evidenzen der Langzeitisolation' (Kap. 3.3) fällt die Bewertung des Kriteriums 'Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen' für den Lagerperimeter SMA-ZNO insgesamt *sehr günstig* aus.

Gesamtbewertung der Kriteriengruppe 'Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen' für den Lagerperimeter SMA-ZNO: *sehr günstig*.

D) Bautechnische Eignung des Lagerperimeters SMA-ZNO

Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen (Kriterium 4.1)

Im Lagerperimeter SMA-ZNO weist die Lagerebene (Annahme: Lagerebene in der Mitte des Opalinustons) eine Tiefenlage von 450 – 600 m u.T. auf; die für die Bewertung massgebende maximale Tiefe der Lagerebene beträgt 600 m u.T. Dies ergibt für den Indikator 'Tiefenlage im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit (u.B. Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften)' für den Lagerperimeter SMA-ZNO insgesamt die Bewertung *günstig*.

Fazit: Zusammen mit dem für den Opalinuston als *günstig* eingestuften Indikator 'Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften', wird das Kriterium 'Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen' im Lagerperimeter SMA-ZNO für die betrachteten Tiefenlagen für das Wirtgestein Opalinuston insgesamt als *günstig* beurteilt.

Untertägige Erschliessung und Wasserhaltung (Kriterium 4.2)

Der Zugang nach Untertag vom Standortareal ZNO-6b zum untertägigen Lagerperimeter kann über eine Rampe oder über einen Schacht erfolgen. Im Fall der Verwendung einer Rampe müssen zuerst die quartären Ablagerungen durchörtert werden, die allerdings nur seicht sind; dann folgt das mächtige Schichtpaket der Unteren Süsswassermolasse (USM). Die restlichen Gesteinsformationen (Malmkalke, Effinger Schichten, Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger' und Opalinuston) werden aus bautechnischer und hydrogeologischer Sicht u.a. aufgrund der geringen Tektonisierung als mehrheitlich unproblematisch erachtet. In den Malmkalken muss zumindest lokal mit einer Verkarstung gerechnet werden; es wird allerdings durchwegs eozäner Paläokarst erwartet, dessen Hohlräume weitgehend verfüllt sein dürften. Es wird zwar keine erhöhte Wasserführung erwartet, sie kann aber auch nicht vollständig ausgeschlossen werden. Vor allem in den kalkigen bzw. spröderen Einheiten sind auch Wasserzutritte aus offenen Klüften und gegebenenfalls entlang von Störungszonen nicht vollständig auszuschliessen. Auch die erforderlichen Schachtbauwerke (Lüftungs- bzw. Betriebsschacht und der Förderschacht, falls keine Rampe verwendet wird) durchqueren die gleichen Gesteinsformationen. Der Indikator 'Geotechnische und hydrogeologische Verhältnisse in überlagernden Gesteinsformationen' wird für den Lagerperimeter SMA-ZNO unter Berücksichtigung der möglichen technischen Massnahmen insgesamt als *günstig* beurteilt. Weiter ist zu beachten, dass der Lagerperimeter SMA-ZNO die Flexibilität bietet, für den Zugang nach Untertag vom Standortareal ZNO-6b aus sowohl Schacht als auch Rampe verwenden zu können.

Eine natürliche Gasführung im Opalinuston kann praktisch ausgeschlossen werden, dies ergibt für den Indikator 'Natürliche Gasführung (im Wirtgestein)' für den Lagerperimeter SMA-ZNO die Bewertung *sehr günstig*.

Fazit: Das Kriterium 'Untertägige Erschliessung und Wasserhaltung' wird im Lagerperimeter SMA-ZNO insgesamt knapp als *sehr günstig* beurteilt.

Gesamtbewertung der Kriteriengruppe 'Bautechnische Eignung' für den Lagerperimeter SMA-ZNO: *günstig*.

Prüfung der Sensitivität der Bewertungen für den Lagerperimeter SMA-ZNO

Zur Prüfung der Sensitivität der oben für den "massgebenden Fall" durchgeführten Bewertungen werden diese mit den Bewertungen der alternativen Lagerperimeter verglichen, vgl. die Darstellungen der abgegrenzten Lagerperimeter in Anhang B (inkl. tabellarische Kurzcharakterisierung) sowie die Bewertung der "bewertbaren" Lagerperimeter¹⁵⁸ in Anhang C.3.1.2. Der Vergleich der Bewertungen ergibt folgendes Bild:

Die bei der Abgrenzung der Lagerperimeter vorgenommenen Änderungen an den Optimierungsanforderungen (Fall *SMA-ZNO-aLI-r*) resultieren in einer mässigen Änderung des Platzangebots (*günstig* statt knapp sehr *günstig*); die weiteren Bewertungen und die Gesamtbewertung ändern dabei nur wenig bzw. gar nicht. Dabei zeigt sich, dass der für die Bewertung oben angenommene "massgebende Fall" eine ausgewogene Variante darstellt. Auch die alternativen Lagerperimeter mit anderer Tiefenlage des Wirtgesteins (Berücksichtigung der Ungewissheiten in der Tiefenlage, Fälle *SMA-ZNO-mLE-t* und *SMA-ZNO-mLE-u*) ergeben ein praktisch gleiches Bild. Die detaillierten Bewertungen sind in Anhang C.3.1.2 zu finden. Insgesamt bietet das Standortgebiet Zürich Nordost eine grosse Flexibilität zur untertägigen Anordnung des Lagers.

Fazit: Die Bewertungen der alternativen Lagerperimeter für das Standortgebiet Zürich Nordost führen nicht zu einer signifikant anderen Gesamtbewertung. Die Flexibilität bei der untertägigen Anordnung des Lagers ist insgesamt gross.

4.4.3.4 SMA-Lagerperimeter Nördlich Lägern (SMA-NL)

Hauptmerkmale

Im Lagerperimeter SMA-NL weist der Opalinuston eine Mächtigkeit von ca. 110 m auf und liefert den Hauptbeitrag zur Barrierenwirkung des Gesamtsystems. Die Rahmengesteine unterhalb und oberhalb des Opalinustons (Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger' und Effinger Schichten bzw. Toniger Lias) steuern zusätzlich signifikante Beiträge zur Barrierenwirkung bei. Es kann jedoch nicht ausgeschlossen werden, dass die oberen Rahmengesteine zumindest in einem Teil des Lagerperimeters von schlechterer Qualität sind und deshalb deutlich weniger zur Barrierenwirkung des Gesamtsystems beisteuern.

Der Lagerperimeter SMA-NL liegt in der Vorfaltenzone und wird geographisch durch die 'zu meidende tektonische Zone' (im Norden) und durch die Tiefenlage des Wirtgesteins (im Westen, Süden und Osten) begrenzt. Der Lagerperimeter ist weniger ruhig gelagert als der Lagerperimeter SMA-ZNO; er ist durch die für Etappe 2 durchgeführte 2D-Seismik, einige ältere Seismiklinien und durch die Bohrung Weiach gut dokumentiert.

¹⁵⁸ In Tab. 4.2-3 bzw. Tab. B-1 ist aufgeführt, welche von den abgegrenzten und in Anhang B dargestellten Lagerperimetern bewertet werden.

A) **Eigenschaften des Opalinustons und seiner Rahmengesteine im Lagerperimeter SMA-NL unter Berücksichtigung seiner Konfiguration**

Räumliche Ausdehnung (Kriterium 1.1)

Im Lagerperimeter SMA-NL liegt der Top Opalinuston im Tiefenbereich von ca. 590 – 700 m u.T.; die für die Bewertung minimale massgebende Überdeckung beträgt ca. 590 m, sodass die gesamten oberen Rahmengesteine (rund 160 m mächtig) als Barriere wirksam sind. Damit wird der Indikator 'Mächtigkeit' im Lagerperimeter SMA-NL als *sehr günstig* beurteilt. Auch unter Berücksichtigung der Resultate der Dosisberechnungen zur Barrierenwirkung bleibt die Bewertung für den Indikator 'Mächtigkeit' sehr günstig.

Es gibt jedoch Hinweise, dass die oberen Rahmengesteine von schlechterer Qualität sein könnten (mächtigeres wasserführendes Sissach-Member im westlichen Teil des Standortgebiets (vgl. Nagra 2014b, Dossier II, Anhang 2), ungünstige Eigenschaften der anhand der Seismik vermuteten "Schwellenzone" im östlichen Teil des Standortgebiets (vgl. Nagra 2014b, Dossier II)¹⁵⁹.

Die laterale Ausdehnung des Lagerperimeters beträgt 1.2 km². Der Lagerperimeter liegt in der Vorfaltenzone und es sind Anzeichen für eine erhöhte Anzahl von Strukturen vorhanden, sodass erhebliche Platzreserven einzuplanen sind. Das Platzangebot ist in einem Tiefenbereich bis zu 750 m u.T. mit einer Fläche von 1.2 km² sehr beschränkt bzw. im bevorzugten Tiefenbereich von weniger als 600 m u.T. nicht existent, sodass die Bewertung des Indikators 'Platzangebot untertags' für den Lagerperimeter SMA-NL *ungünstig* ausfällt.

Fazit: Das Kriterium 'Räumliche Ausdehnung' wird im Lagerperimeter SMA-NL insgesamt als *bedingt günstig* beurteilt, auch wenn das Platzangebot ungünstig bewertet wird und durch die tektonische Überprägung Reserven beim Platzangebot vorzusehen sind.

Hydraulische Barrierenwirkung (Kriterium 1.2)

Die Tiefenlage der Obergrenze des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs wird bezüglich des Indikators 'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteins-Dekompaktion' für den Lagerperimeter SMA-NL als *sehr günstig* eingestuft, denn die minimale Überdeckung der Obergrenze des Opalinustons beträgt ca. 590 m, sodass die gesamten oberen Rahmengesteine (Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger' und Effinger Schichten, rund 160 m mächtig) als Barriere wirksam sind, auch wenn diese in ihrer Qualität in einem Teil des Lagerperimeters beschränkt sein können. Zusätzlich kommt auch die hydraulische Barrierenwirkung des Opalinustons (massgebend für Bewertung des Indikators 'Hydraulische Durchlässigkeit') voll zur Entfaltung. Weiter tragen auch die unteren Rahmengesteine (Toniger Lias) zur Barrierenwirkung bei. Im Lagerperimeter SMA-NL wurde in der Bohrung Weiach ein ausgeprägter Grundwasserstockwerkbau nachgewiesen; dies ergibt für den Indikator 'Grundwasserstockwerke' die Bewertung *sehr günstig*.

¹⁵⁹ Die Konzeptualisierung mit einer ungünstigeren Barrierenwirkung der oberen Rahmengesteine wird in einem alternativen Fall (*SMA-NL-mLE-r-ORG*) bewertet. Wegen des in der alternativen Konzeptualisierung angenommenen vernachlässigbaren Beitrags der oberen Rahmengesteine (Wirkung des mächtigeren kalkigen Sissach-Members bzw. der "Schwellenzone" direkt im Hangenden des Opalinustons) führt dies für den alternativen Fall auch unter Berücksichtigung der Resultate der Dosisberechnungen nur noch zu einer *günstigen* Bewertung für den Indikator 'Mächtigkeit'.

Fazit: Zusammen mit der wirtgesteinsspezifisch vorgenommenen *sehr günstigen* Beurteilung des Opalinustons bezüglich des Indikators 'Hydraulische Durchlässigkeit' (vgl. Kap. 3.3) fällt die Bewertung des Kriteriums 'Hydraulische Barrierenwirkung' für den Lagerperimeter SMA-NL insgesamt *sehr günstig* aus.

Geochemische Bedingungen (Kriterium 1.3)

Das Kriterium 'Geochemische Bedingungen' wird wirtgesteinsspezifisch beurteilt (vgl. Kap. 3.3); die Bewertung für den Lagerperimeter SMA-NL fällt insgesamt *sehr günstig* aus.

Freisetzungspfade (Kriterium 1.4)

Alle Indikatoren des Kriteriums 'Freisetzungspfade' werden wirtgesteinsspezifisch beurteilt, auch der Indikator 'Länge der massgebenden Freisetzungspfade' (vgl. Kap. 3.3). Die Bewertung des Kriteriums 'Freisetzungspfade' für den Lagerperimeter SMA-NL fällt insgesamt *sehr günstig* aus.

Gesamtbewertung der Kriteriengruppe 'Eigenschaften des Wirtgesteins / einschlusswirksamen Gebirgsbereichs' für den Opalinuston mit seinen Rahmengesteinen im Lagerperimeter SMA-NL: knapp *sehr günstig*.

B) Langzeitstabilität im Lagerperimeter SMA-NL

Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften (Kriterium 2.1)

Die Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften im Lagerperimeter SMA-NL wird einerseits aus Sicht der geologisch-tektonischen Situation beurteilt (vgl. Kap. 4.4.2). Andererseits wird der Indikator 'Potenzial zur Bildung neuer Wasserwegsamkeiten (Verkarstung)' wirtgesteinsspezifisch beurteilt (vgl. Kap. 3.3); im Falle des Opalinustons erübrigt sich eine diesbezügliche Beurteilung der Konfiguration, weil eine Verkarstung im Opalinuston ausgeschlossen werden kann; es ergibt sich für diesen Indikator eine *sehr günstige* Bewertung. In Ergänzung zu Kap. 4.4.2 wird beim Indikator 'Modellvorstellungen zur Langzeitentwicklung (Geodynamik und Neotektonik; weitere Prozesse)' auch die Möglichkeit der Bildung einer Durchbruchsrinne berücksichtigt. Im Lagerperimeter könnte sich zwar innerhalb des Betrachtungszeitraums für ein SMA-Lager von 100'000 Jahren eine Durchbruchsrinne bilden, diese kann jedoch das Lager wegen der grossen Tiefenlage nicht beeinträchtigen. Dieser Indikator wird deshalb insgesamt als *sehr günstig* bewertet. Die Bewertung des Kriteriums 'Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften' fällt für den Lagerperimeter SMA-NL insgesamt *sehr günstig* aus.

Erosion (Kriterium 2.2)

Innerhalb des für ein SMA-Lager relevanten Betrachtungszeitraums von 100'000 Jahren und für die erwarteten grossräumigen Hebungsraten (vgl. Kap. 4.4.2) wird die zukünftige Erosion in der Nordschweiz im Bereich von maximal 50 m liegen. Im Lagerperimeter SMA-NL liegt die Obergrenze des Opalinustons in einem Tiefenbereich von ca. 560 – 660 m unter der Erosionsbasis. Die massgebende minimale Tiefe des Opalinustons unter Erosionsbasis beträgt ca. 560 m. Aus diesen Gründen wird der Indikator 'Tiefenlage unter lokaler Erosionsbasis im Hinblick auf die Bildung neuer Rinnen' im Lagerperimeter SMA-NL insgesamt als *sehr günstig* beurteilt.

Der Lagerperimeter SMA-NL liegt nicht im Bereich von übertieften Felsrinnen und der Top Opalinuston mindestens ca. 560 m unter der Felsoberfläche. Der Indikator 'Tiefenlage unter Fels im Hinblick auf glaziale Tiefenerosion' wird für den Lagerperimeter SMA-NL bei einem Betrachtungszeitraum von 100'000 Jahren insgesamt als *sehr günstig* beurteilt.

Fazit: Zusammen mit der *sehr günstigen* Beurteilung des Indikators 'Erosion im Betrachtungszeitraum' in der Nordschweiz (vgl. Kap. 4.4.2) fällt die Bewertung des Kriteriums 'Erosion' im Lagerperimeter SMA-NL insgesamt *sehr günstig* aus.

Lagerbedingte Einflüsse (Kriterium 2.3)

Das Kriterium 'Lagerbedingte Einflüsse' wird wirtgesteinsspezifisch beurteilt (vgl. Kap. 3.3); die Bewertung für den Lagerperimeter SMA-NL fällt insgesamt *günstig* aus.

Nutzungskonflikte (Kriterium 2.4)

Die möglichen Nutzungskonflikte wurden in Kap. 4.4.2 behandelt. Unter Berücksichtigung der dort aufgeführten Unterlagen werden der Indikator 'Rohstoffvorkommen unterhalb des Wirtgesteins' für den Lagerperimeter SMA-NL insgesamt als *bedingt günstig* und der Indikator 'Rohstoffvorkommen oberhalb des Wirtgesteins' als *sehr günstig* beurteilt.

Im Lagerperimeter SMA-NL sind keine bedeutenden Mineral- und Thermalwassernutzungen vorhanden. Die heute nicht mehr genutzten sogenannten Mineralquellen von Eglisau befinden sich am Nordrand des geologischen Standortgebiets. Das Mineralwasser wurde mittels Bohrungen aus durchlässigen Abschnitten der USM gefördert. Die Hydrogeologie der USM ist wegen des heterogenen internen Aufbaus komplex. Die generelle Vorflutsituation und die hydrochemische Charakteristik (Na-Cl-Typ) deuten auf einen Zufluss aus dem südlichen bis südöstlichen Sektor hin. Demnach würde die USM mit den Zugangsbauwerken stromabwärts von der früher genutzten Mineralwasserfassung Eglisau durchfahren. Eine Beeinflussung dieser nicht mehr genutzten Fassung kann aktuell nicht ausgeschlossen werden. Bereits einige Kilometer südwestlich resp. westlich des geologischen Standortgebiets finden sich die Thermalquellen von Baden/Ennetbaden und die Thermalbäder von Zurzach. Die relevanten Aquifere werden mit den Zugangsbauwerken nicht durchfahren, und zwischen diesen und dem Opalinuston finden sich mächtige Aquitarde. Auch die für das Thermalwasser Baden/Ennetbaden potenziell relevante Jura-Hauptüberschiebung wird nicht durchfahren. Eine Beeinträchtigung dieser überregional bedeutenden Thermalwasservorkommen kann deshalb ausgeschlossen werden. Daraus resultiert für den Indikator 'Mineral- und Thermalwassernutzungen' für den Lagerperimeter SMA-NL insgesamt die Beurteilung *knapp günstig*.

Die Unterlagen zur Geothermie und zu weiteren energiebezogenen Nutzungen des Untergrunds finden sich in Kap. 4.4.2; dort wurden auch die Lagerperimeter beurteilt. Basierend auf den dort aufgeführten Aussagen ergibt sich für den Indikator 'Geothermie und weitere energiebezogene Nutzungen des Untergrunds' für den Lagerperimeter SMA-NL die Beurteilung *bedingt günstig*.

Fazit: Zusammen mit der *sehr günstigen* Beurteilung des nicht als nutzungswürdig eingestuften Rohstoffvorkommens innerhalb des Opalinustons (vgl. Kap. 3.3) fällt die Bewertung des Kriteriums 'Nutzungskonflikte' im Lagerperimeter SMA-NL insgesamt *günstig* aus.

Gesamtbewertung der Kriteriengruppe 'Langzeitstabilität' für den Lagerperimeter SMA-NL: *günstig*.

C) Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen im Lagerperimeter SMA-NL

Charakterisierbarkeit der Gesteine (Kriterium 3.1)

Das Kriterium 'Charakterisierbarkeit der Gesteine' wird wirtgesteinsspezifisch beurteilt (vgl. Kap. 3.3); die Bewertung für den Lagerperimeter SMA-NL fällt insgesamt *sehr günstig* aus.

Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse (Kriterium 3.2)

Die Explorationsverhältnisse im geologischen Untergrund des Wirtgesteins Opalinuston sind generell *sehr günstig*, vgl. Kap. 3.3. Im Bereich des Lagerperimeters SMA-NL ist das seismische Abbild gut bis sehr gut. Der Indikator 'Explorationsverhältnisse im geologischen Untergrund' des Lagerperimeters SMA-NL wird als *sehr günstig* beurteilt.

Der Lagerperimeter SMA-NL kann mit einer geeigneten 3D-seismischen Messung erkundet werden. Die teilweise dichte Bebauung (Glattfelden) und Kiesgruben im Bereich des Lagerperimeters SMA-NL führen zu Einschränkungen in der Durchführung der Messungen. Beeinträchtigungen der Datenqualität durch den Fluglärm des Flughafens Zürich sind möglich. Daher wird der Indikator 'Explorationsbedingungen an Oberfläche' für den Lagerperimeter SMA-NL nur als *günstig* bewertet.

Fazit: Insgesamt wird das Kriterium 'Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse' im Lagerperimeter SMA-NL knapp als *sehr günstig* beurteilt.

Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen (Kriterium 3.3)

Das Kriterium 'Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen' wird einerseits bezüglich der geologisch-tektonischen Situation (vgl. Kap. 4.4.2) und andererseits wirtgesteinsspezifisch beurteilt (vgl. Kap. 3.3). In Ergänzung zu Kap. 4.4.2 wird beim Indikator 'Modellvorstellungen zur Langzeitentwicklung (Geodynamik und Neotektonik; weitere Prozesse)' auch die Möglichkeit der Bildung einer Durchbruchsrinne berücksichtigt. Im Lagerperimeter könnte sich zwar innerhalb des Betrachtungszeitraums für ein SMA-Lager von 100'000 Jahren eine Durchbruchsrinne bilden, diese kann jedoch das Lager wegen der grossen Tiefenlage nicht beeinträchtigen. Dieser Indikator wird deshalb insgesamt als *sehr günstig* bewertet. Zusammen mit der *sehr günstigen* Bewertung des Indikators 'Unabhängige Evidenzen der Langzeitisolation' (Kap. 3.3) fällt die Bewertung des Kriteriums 'Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen' für den Lagerperimeter SMA-NL insgesamt *sehr günstig* aus.

Gesamtbewertung der Kriteriengruppe 'Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen' für den Lagerperimeter SMA-NL: *sehr günstig*.

D) Bautechnische Eignung des Lagerperimeters SMA-NL

Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen (Kriterium 4.1)

Im Lagerperimeter SMA-NL weist die Lagerebene (Annahme: Lagerebene in der Mitte des Opalinustons) eine geotechnisch anspruchsvolle Tiefenlage von ca. 640 – 750 m u.T. auf; die für die Bewertung massgebende maximale Tiefe der Lagerebene beträgt 750 m u.T.¹⁶⁰. Dies

¹⁶⁰ Nur dann ergibt sich ein bewertbares, wenn auch deutlich zu kleines Platzangebot.

ergibt für den Indikator 'Tiefenlage im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit (u.B. Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften)' für den Lagerperimeter SMA-NL die Bewertung *ungünstig*.

Fazit: Zusammen mit dem für den Opalinuston als *günstig* eingestuften Indikator 'Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften'¹⁶¹, wird das Kriterium 'Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen' im Lagerperimeter SMA-NL für die betrachteten Tiefenlagen insgesamt als *bedingt günstig* beurteilt.

Untertägige Erschliessung und Wasserhaltung (Kriterium 4.2)

Der Zugang nach Untertag vom Standortareal NL-2 und vom Standortareal NL-6 zum untertägigen Lagerperimeter kann über eine Rampe oder über einen Schacht erfolgen. Im Fall der Verwendung einer Rampe müssen anfänglich Lockergesteine (Niederterrassenschotter, Moräne und Gehängeablagerungen bei NL-2 und evtl. Gehänge- bzw. Bachschutt bei NL-6) durchörtert werden, dann folgt das mächtige Schichtpaket der Unteren Süsswassermolasse (USM). Die restlichen Gesteinsformationen (Malmkalke, Effinger Schichten, Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger' und Opalinuston) werden aus bautechnischer und hydrogeologischer Sicht als mehrheitlich wenig problematisch erachtet, auch wenn die Tektonisierung im Standortgebiet Nördlich Lägern etwas stärker ausgeprägt sein dürfte als im Standortgebiet Zürich Nordost. In den Malmkalken muss zumindest lokal mit einer Verkarstung gerechnet werden; es wird allerdings durchwegs eozäner Paläokarst erwartet, dessen Hohlräume weitgehend verfüllt sein dürften. Es wird zwar keine erhöhte Wasserführung erwartet, sie kann aber auch nicht vollständig ausgeschlossen werden. In den kalkigen bzw. spröderen Einheiten sind auch Wasserzutritte aus offenen Klüften und gegebenenfalls entlang von Störungszonen nicht vollständig auszuschliessen. Auch die erforderlichen Schachtbauwerke (Lüftungs- bzw. Betriebsschacht und der Förderschacht, falls keine Rampe verwendet wird) durchqueren die gleichen Gesteinsformationen. Der Indikator 'Geotechnische und hydrogeologische Verhältnisse in überlagernden Gesteinsformationen' wird für den Lagerperimeter SMA-NL unter Berücksichtigung der möglichen technischen Massnahmen insgesamt als *günstig* beurteilt. Weiter ist zu beachten, dass der Lagerperimeter SMA-NL die Flexibilität bietet, für den Zugang nach Untertag von den Standortarealen NL-2 und NL-6 aus sowohl Schacht als auch Rampe verwenden zu können.

Eine natürliche Gasführung im Opalinuston kann praktisch ausgeschlossen werden, dies führt für den Indikator 'Natürliche Gasführung (im Wirtgestein)' für den Lagerperimeter SMA-NL zur Bewertung *sehr günstig*.

Fazit: Das Kriterium 'Untertägige Erschliessung und Wasserhaltung' wird im Lagerperimeter SMA-NL insgesamt knapp als *sehr günstig* beurteilt.

Gesamtbewertung der Kriteriengruppe 'Bautechnische Eignung' für den Lagerperimeter SMA-NL: *günstig*.

¹⁶¹ Zur Berücksichtigung der im Standortgebiet Nördlich Lägern erwarteten tektonischen Überprägung des Wirtgesteins (Lage in der Vorfaltenzone) wird der Indikator für den Lagerperimeter SMA-NL im Vergleich zur Bewertung in Kap. 3.3 etwas schlechter, aber immer noch als *günstig* bewertet.

Prüfung der Sensitivität der Bewertungen für den Lagerperimeter SMA-NL

Zur Prüfung der Sensitivität der oben für den "massgebenden Fall" durchgeführten Bewertungen werden diese mit den Bewertungen der alternativen Lagerperimeter verglichen, vgl. die Darstellungen der abgegrenzten Lagerperimeter in Anhang B (inkl. tabellarische Kurzcharakterisierung) sowie die Bewertung der "bewertbaren" Lagerperimeter¹⁶² in Anhang C.3.1.2. In Anhang C.3.1.2 findet sich auch eine Bewertung für eine Variante mit einer alternativen Interpretation der Qualität der oberen Rahmengesteine. Der Vergleich der Bewertungen ergibt folgendes Bild:

Auch bei Verwendung von alternativen Optimierungsanforderungen kann die angestrebte maximale Tiefe der Lagerebene von ca. 600 m u.T. nicht erreicht werden: Auch bei Lockerung der Anforderung bezüglich Tiefenlage (maximale Lagertiefe ca. 800 m u.T. im Fall *SMA-NL-aL1-r* gegenüber ca. 750 m u.T. im "massgebenden Fall") ergibt sich nur ein *bedingt günstiges* Platzangebot. Selbst unter der Annahme eines weniger tief liegenden Wirtgesteins (Berücksichtigung der Ungewissheiten in der Tiefenlage im Fall *SMA-NL-mLE-u*) kann die angestrebte maximale Tiefe nicht erreicht werden, auch wenn die Gesamtbewertung dort wegen dem knapp als *günstig* beurteilten Platzangebot etwas besser ausfällt. Die detaillierten Bewertungen sind in Anhang C.3.1.2 zu finden. Insgesamt bietet das Standortgebiet Nördlich Lägern keine Möglichkeiten zur untertägigen Anordnung des Lagers in einer Tiefe, die den angestrebten Wert von 600 m u.T. nicht deutlich übersteigt.

Die alternative Konzeptualisierung zur Barrierenwirkung der oberen Rahmengesteine des Opalinustons (Fall *SMA-NL-mLE-r-oRG*) führt zu einer etwas niedrigeren Bewertung für den Indikator 'Mächtigkeit' und damit auch zu einer etwas niedrigeren Bewertung der Kriterien-Gruppe 'Eigenschaften des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs', aber nicht zu einer signifikanten Änderung der Gesamtbewertung.

Fazit: Die Bewertungen der alternativen Lagerperimeter sowie die alternative Konzeptualisierung der oberen Rahmengesteine führen für das Standortgebiet Nördlich Lägern nicht zu einer signifikant anderen Gesamtbewertung. Bei der untertägigen Anordnung des Lagers bestehen keine Möglichkeiten, die Lagerkammern in einer Tiefe anzuordnen, die den angestrebten Wert von 600 m u.T. nicht deutlich übersteigt.

4.4.3.5 SMA-Lagerperimeter Jura Ost (SMA-JO)

Hauptmerkmale

Im Lagerperimeter SMA-JO weist der Opalinuston eine Mächtigkeit von ca. 110 m auf und liefert den Hauptbeitrag zur Barrierenwirkung des Gesamtsystems. Die oberen Rahmengesteine (Passwang-Formation und Untere Acuminata-Schichten) sind bedeutend weniger mächtig als im Faziesraum Ost, steuern aber auch zur Barrierenwirkung bei. Weiter wird erwartet, dass die oberen Rahmengesteine im Vergleich zum Faziesraum Ost eher von schlechterer Qualität sind (erhöhte Durchlässigkeit innerhalb der Passwang-Formation und der Unteren Acuminata-Schichten). Die unteren Rahmengesteine (Toniger Lias) hingegen sind in ihrer Barrierenwirkung vergleichbar mit denjenigen im Faziesraum Ost.

¹⁶² In Tab. 4.2-3 bzw. Tab. B-1 ist aufgeführt, welche von den abgegrenzten und in Anhang B dargestellten Lagerperimetern bewertet werden.

Der Lagerperimeter SMA-JO liegt in der Vorfaltenzone und wird geologisch durch die Jura-Hauptüberschiebung bzw. durch eine 'zu meidende tektonische Zone' (im Süden und Nordosten) sowie durch die minimale Tiefenlage im Norden begrenzt. Der Lagerperimeter wurde durch Fernschub von seiner Unterlage leicht abgeschert. Eine interne Deformation der abgescherten Schichttafel durch kompressive Lokalstrukturen oder relevante Verwerfungen kann aber mit den heute vorhandenen Daten nicht nachgewiesen werden. Die ruhig gelagerte, leicht nach Südosten einfallende Schichttafel erinnert stark an den wenig gestörten Tafeljura s.str. Der Lagerperimeter ist durch die für Etappe 2 durchgeführte 2D-Seismik, einige ältere Seismiklinien und die nahegelegene Bohrung Riniken gut dokumentiert.

A) **Eigenschaften des Opalinustons mit seinen Rahmengesteinen im Lagerperimeter SMA-JO unter Berücksichtigung seiner Konfiguration**

Räumliche Ausdehnung (Kriterium 1.1)

Im Lagerperimeter SMA-JO liegt der Top Opalinuston im Tiefenbereich von 350 – 500 m u.T.; die für die Bewertung massgebende minimale Überdeckung beträgt 350 m, sodass die gesamten oberen Rahmengesteine (rund 50 m mächtig) grundsätzlich als Barriere wirksam sind. Wegen der angenommenen beschränkten Barrierenqualität der oberen Rahmengesteine wird der Indikator 'Mächtigkeit' im Lagerperimeter SMA-JO jedoch nur als *günstig* beurteilt. Auch unter Berücksichtigung der Resultate der Dosisberechnungen zur Barrierenwirkung bleibt die Bewertung für den Indikator 'Mächtigkeit' *günstig*.

Es besteht jedoch die Möglichkeit, dass die Barrierenqualität der oberen Rahmengesteine auch besser sein könnte (keine erhöhte Wasserführung innerhalb der Passwang-Formation und der Unteren Acuminata-Schichten, vgl. Nagra 2014b, Dossier II, Anhang 3). Deshalb wird zusätzlich eine Variante mit einer günstigeren Barrierenwirkung der oberen Rahmengesteine betrachtet¹⁶³.

Die laterale Ausdehnung des Lagerperimeters beträgt 23.4 km². Der Lagerperimeter mit seiner Lage in der Vorfaltenzone hat eine gewisse tektonische Überprägung erfahren. Auf der Seismik sind jedoch keine Anzeichen einer erhöhten Zergliederung zu erkennen, sodass nur mässige Platzreserven einzuplanen sind. Der Lagerperimeter SMA-JO bietet mit einer Fläche von 23.4 km² sehr grosse Platzreserven, die um ein Vielfaches über den Platzbedarf des umhüllenden Abfallinventars hinausgehen. In Bezug auf den Indikator 'Platzangebot untertags' wird der Lagerperimeter SMA-JO wegen seiner grossen räumlichen Ausdehnung als *sehr günstig* eingestuft.

Fazit: Das Kriterium 'Räumliche Ausdehnung' wird im Lagerperimeter SMA-JO insgesamt als *sehr günstig* beurteilt; durch die tektonische Überprägung kann eine gewisse Einschränkung des Platzangebots nicht ausgeschlossen werden.

¹⁶³ Die Konzeptualisierung mit einer günstigeren Barrierenwirkung der oberen Rahmengesteine wird in einem alternativen Fall (*SMA-JO-mLE-r-ORG*) bewertet. Wegen der in der alternativen Konzeptualisierung angenommenen guten Barrierenwirkung der oberen Rahmengesteine (keine Wirkung der Sandkalkabfolgen innerhalb der Passwang-Formation und der Unteren Acuminata-Schichten im Hangenden des Opalinustons) führt dies für den alternativen Fall auch unter Berücksichtigung der Resultate der Dosisberechnungen zu einer *sehr günstigen* Bewertung für den Indikator 'Mächtigkeit'.

Hydraulische Barrierenwirkung (Kriterium 1.2)

Die Tiefenlage der Obergrenze des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs wird bezüglich des Indikators 'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteins-Dekompaktion' für den Lagerperimeter SMA-JO knapp als *sehr günstig* eingestuft, denn die minimale Überdeckung der Obergrenze des Opalinustons beträgt 350 m, sodass von den oberen Rahmengesteinen (Passwang-Formation und Untere Acuminata-Schichten) ca. 50 m als Barriere wirksam sind; sie sind aber im Vergleich zum Faziesraum Ost etwas weniger mächtig, und es besteht die Möglichkeit der erhöhten Wasserführung innerhalb der Passwang-Formation und der Unteren Acuminata-Schichten. Die hydraulische Barrierenwirkung des Opalinustons (massgebend für Bewertung des Indikators 'Hydraulische Durchlässigkeit') hingegen kommt voll zur Entfaltung. Weiter tragen auch die unteren Rahmengesteine (Toniger Lias) zur Barrierenwirkung bei. Aufgrund der stratigraphischen Verhältnisse wird im Lagerperimeter SMA-JO ein ausgeprägter Grundwasserstockwerkbau erwartet; dies ergibt für den Indikator 'Grundwasserstockwerke' die Bewertung knapp *sehr günstig*.

Fazit: Zusammen mit der wirtgesteinsspezifisch vorgenommenen *sehr günstigen* Beurteilung des Opalinustons bezüglich des Indikators 'Hydraulische Durchlässigkeit' (vgl. Kap. 3.3) fällt die Bewertung des Kriteriums 'Hydraulische Barrierenwirkung' für den Lagerperimeter SMA-JO insgesamt *sehr günstig* aus.

Geochemische Bedingungen (Kriterium 1.3)

Das Kriterium 'Geochemische Bedingungen' wird wirtgesteinsspezifisch beurteilt (vgl. Kap. 3.3); die Bewertung für den Lagerperimeter SMA-JO fällt insgesamt *sehr günstig* aus.

Freisetzungspfade (Kriterium 1.4)

Alle Indikatoren des Kriteriums 'Freisetzungspfade' werden wirtgesteinsspezifisch beurteilt, auch der Indikator 'Länge der massgebenden Freisetzungspfade' (vgl. Kap. 3.3). Die Bewertung des Kriteriums 'Freisetzungspfade' für den Lagerperimeter SMA-JO fällt insgesamt *sehr günstig* aus.

Gesamtbewertung der Kriteriengruppe 'Eigenschaften des Wirtgesteins / einschlusswirksamen Gebirgsbereichs' für den Opalinuston mit seinen Rahmengesteinen im Lagerperimeter SMA-JO: *sehr günstig*.

B) Langzeitstabilität im Lagerperimeter SMA-JO

Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften (Kriterium 2.1)

Die Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften im Lagerperimeter SMA-JO wird einerseits aus Sicht der geologisch-tektonischen Situation beurteilt (Kap. 4.4.2). Andererseits wird der Indikator 'Potenzial zur Bildung neuer Wasserwegsamkeiten (Verkarstung)' wirtgesteinsspezifisch beurteilt (vgl. Kap. 3.3); im Falle des Opalinustons erübrigt sich eine diesbezügliche Beurteilung der Konfiguration, weil eine Verkarstung im Opalinuston ausgeschlossen werden kann; es ergibt sich für diesen Indikator eine *sehr günstige* Bewertung. In Ergänzung zu Kap. 4.4.2 wird beim Indikator 'Modellvorstellungen zur Langzeitentwicklung (Geodynamik und Neotektonik; weitere Prozesse)' auch die Möglichkeit der Bildung einer Durchbruchsrinne berücksichtigt. Da im Lagerperimeter die Bildung einer Durchbruchsrinne wegen der Topographie und der günstigen Lage des Lagerperimeters bezüglich Vergletscherung

innerhalb des Betrachtungszeitraums für ein SMA-Lager von 100'000 Jahren praktisch ausgeschlossen werden kann, wird dieser Indikator insgesamt als *sehr günstig* bewertet. Die Bewertung des Kriteriums 'Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften' fällt für den Lagerperimeter SMA-JO insgesamt *sehr günstig* aus.

Erosion (Kriterium 2.2)

Innerhalb des für ein SMA-Lager relevanten Betrachtungszeitraums von 100'000 Jahren und für die erwarteten grossräumigen Hebungsraten (vgl. Kap. 4.4.2) wird die zukünftige Erosion in der Nordschweiz im Bereich von maximal 50 m liegen. Im Lagerperimeter SMA-JO liegt die Obergrenze des Opalinustons in einem Tiefenbereich von ca. 80 – 340 m unter der Erosionsbasis. Die massgebende minimale Tiefe des Opalinustons unter Erosionsbasis beträgt lediglich ca. 80 m. Da die Bildung einer Durchbruchrinne im Lagerperimeter innerhalb des Betrachtungszeitraums für ein SMA-Lager jedoch praktisch ausgeschlossen werden kann, wird der Indikator 'Tiefenlage unter lokaler Erosionsbasis im Hinblick auf die Bildung neuer Rinnen' im Lagerperimeter SMA-JO insgesamt trotzdem als *sehr günstig* beurteilt.

Der Lagerperimeter SMA-JO liegt ausserhalb der Haupttäler; er hat deshalb kaum Potenzial für glaziale Tiefenerosion im Betrachtungszeitraum für ein SMA-Lager. Der Indikator 'Tiefenlage unter Fels im Hinblick auf glaziale Tiefenerosion' wird deshalb für den Lagerperimeter SMA-JO als *sehr günstig* beurteilt.

Fazit: Zusammen mit der *sehr günstigen* Beurteilung des Indikators 'Erosion im Betrachtungszeitraum' in der Nordschweiz (vgl. Kap. 4.4.2) fällt die Bewertung des Kriteriums 'Erosion' im Lagerperimeter SMA-JO insgesamt *sehr günstig* aus.

Lagerbedingte Einflüsse (Kriterium 2.3)

Das Kriterium 'Lagerbedingte Einflüsse' wird wirtgesteinsspezifisch beurteilt (vgl. Kap. 3.3); die Bewertung für den Lagerperimeter SMA-JO fällt insgesamt *günstig* aus.

Nutzungskonflikte (Kriterium 2.4)

Die möglichen Nutzungskonflikte wurden in Kap. 4.4.2 behandelt. Unter Berücksichtigung der dort aufgeführten Unterlagen werden der Indikator 'Rohstoffvorkommen unterhalb des Wirtgesteins' für den Lagerperimeter SMA-JO insgesamt als *bedingt günstig* und der Indikator 'Rohstoffvorkommen oberhalb des Wirtgesteins' knapp als *günstig* beurteilt.

Im Lagerperimeter SMA-JO sind keine bedeutenden Mineral- und Thermalwassernutzungen vorhanden. Im erweiterten Umkreis finden sich bedeutende Thermalkurorte wie Baden/Ennetbaden, Bad Schinznach und Bad Zurzach. Bereits deutlich weiter westlich liegt Bad Säkingen. Mit den Zugangsbauwerken werden die für die Mineral- und Thermalwassernutzungen relevanten Aquifere (Kristallin, Muschelkalk) nicht durchfahren. Zwischen den von den Zugangsbauwerken durchfahrenen Grundwasserleitern und den Einheiten, aus denen die Mineral- und Thermalwässer gefördert werden, liegen mächtige Aquitarde (Grundwasserstauer), welche eine hydraulische Entkoppelung der Systeme bewirken. Auch die für die Thermalwassersysteme von Baden/Ennetbaden und Bad Schinznach potenziell relevante Jura-Hauptüberschiebung wird nicht durchfahren. Eine Gefährdung der Mineral- und Thermalwassernutzungen durch die Zugangsbauwerke kann somit ausgeschlossen werden. Deshalb wird der Indikator 'Mineral- und Thermalwassernutzungen' als *sehr günstig* beurteilt.

Die Unterlagen zur Geothermie und zu weiteren energiebezogenen Nutzungen des Untergrunds finden sich in Kap. 4.4.2; dort wurden auch die Lagerperimeter beurteilt. Basierend auf den dort aufgeführten Aussagen ergibt sich für den Indikator 'Geothermie und weitere energiebezogene Nutzungen des Untergrunds' für den Lagerperimeter SMA-JO die Beurteilung *bedingt günstig*.

Fazit: Zusammen mit der *sehr günstigen* Beurteilung des nicht als nutzungswürdig eingestuften Rohstoffvorkommens innerhalb des Opalinustons (vgl. Kap. 3.3) fällt die Bewertung des Kriteriums 'Nutzungskonflikte' im Lagerperimeter SMA-JO insgesamt *günstig* aus.

Gesamtbewertung der Kriteriengruppe 'Langzeitstabilität' für den Lagerperimeter SMA-JO: *günstig*.

C) Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen im Lagerperimeter SMA-JO

Charakterisierbarkeit der Gesteine (Kriterium 3.1)

Das Kriterium 'Charakterisierbarkeit der Gesteine' wird wirtgesteinsspezifisch beurteilt (vgl. Kap. 3.3); die Bewertung für den Lagerperimeter SMA-JO fällt insgesamt *sehr günstig* aus.

Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse (Kriterium 3.2)

Die Explorationsverhältnisse im geologischen Untergrund des Wirtgesteins Opalinuston sind generell *sehr günstig* (vgl. Kap. 3.3). Im Bereich des Lagerperimeters SMA-JO ist das seismische Abbild gut bis sehr gut. Der Indikator 'Explorationsverhältnisse im geologischen Untergrund' des Lagerperimeters SMA-JO wird als *sehr günstig* beurteilt.

Der Lagerperimeter SMA-JO kann mit einer geeigneten 3D-seismischen Messung erkundet werden. Nur wenige Objekte müssen bei der Durchführung einer seismischen Messung zur Abbildung des Lagerperimeters SMA-JO berücksichtigt werden. Nur im nördlichsten Bereich nimmt die Tiefenlage dahingehend ab, dass ein erhöhter Aufwand zum Erreichen einer ausreichenden seismischen Überdeckung erforderlich werden könnte. Daher wird der Indikator 'Explorationsbedingungen an Oberfläche' für den Lagerperimeter SMA-JO als *sehr günstig* bewertet.

Fazit: Insgesamt wird das Kriterium 'Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse' im Lagerperimeter SMA-JO als *sehr günstig* beurteilt.

Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen (Kriterium 3.3)

Das Kriterium Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen wird einerseits bezüglich der geologisch-tektonischen Situation (Kap. 4.4.2) und andererseits wirtgesteinsspezifisch beurteilt (Kap. 3.3). In Ergänzung zu Kap. 4.4.2 wird beim Indikator 'Modellvorstellungen zur Langzeitentwicklung (Geodynamik und Neotektonik; weitere Prozesse)' auch die Möglichkeit der Bildung einer Durchbruchsrinne berücksichtigt. Da im Lagerperimeter die Bildung einer Durchbruchsrinne wegen der Topographie und der günstigen Lage des Lagerperimeters bezüglich Vergletscherung innerhalb des Betrachtungszeitraums für ein SMA-Lager von 100'000 Jahren praktisch ausgeschlossen werden kann, wird dieser Indikator insgesamt als *sehr günstig* bewertet. Zusammen mit der *sehr günstigen* Bewertung des Indikators 'Unabhängige Evidenzen der Langzeitisolation' (Kap. 3.3) fällt die Bewertung des Kriteriums 'Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen' für den Lagerperimeter SMA-JO insgesamt *sehr günstig* aus.

Gesamtbewertung der Kriteriengruppe 'Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen' für den Lagerperimeter SMA-JO: *sehr günstig*.

D) Bautechnische Eignung des Lagerperimeters SMA-JO

Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen (Kriterium 4.1)

Im Lagerperimeter SMA-JO weist die Lagerebene (Annahme: Lagerebene in der Mitte des Opalinustons) eine Tiefenlage von 400 – 550 m u.T. auf; die für die Bewertung massgebende maximale Tiefe der Lagerebene beträgt 550 m u.T. Dementsprechend wird der Indikator 'Tiefenlage im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit (u.B. Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften)' für den Lagerperimeter SMA-JO als *günstig* eingestuft.

Fazit: Zusammen mit dem für den Opalinuston als *günstig* eingestuften Indikator 'Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften'¹⁶⁴, wird das Kriterium 'Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen' im Lagerperimeter SMA-JO für die betrachteten Tiefenlagen insgesamt als *günstig* beurteilt.

Untertägige Erschliessung und Wasserhaltung (Kriterium 4.2)

Der Zugang nach Untertag vom Standortareal JO-3+ zum untertägigen Lagerperimeter erfolgt über eine Rampe. Mit der Rampe wird zuerst Hangschutt durchfahren, anschliessend ist gemäss heutiger Planung mit Ausnahme des ersten steigend aufgefahrenen Rampenabschnitts eine Linienführung im Opalinuston geplant. Dort sind Verkarstungsphänomene und / oder deutliche Wasserzutritte aus offenen Klüften oder Störungszonen bei einer genügenden Überlagerung ausgeschlossen. Aus bautechnischer und hydrogeologischer Sicht wird diese Linienführung auch aufgrund der beschränkten Tektonisierung als mehrheitlich unproblematisch beurteilt. Die erforderlichen Schachtbauwerke (Lüftungs- bzw. Betriebsschacht) hingegen durchqueren auch Kalke, wo die Bedingungen bezüglich Wasserführung ungünstiger sind und wo auch Karst nicht ausgeschlossen werden kann. Der Indikator 'Geotechnische und hydrogeologische Verhältnisse in überlagernden Gesteinsformationen' kann für den Lagerperimeter SMA-JO trotzdem insgesamt als *sehr günstig* bewertet werden.

Eine natürliche Gasführung im Opalinuston kann praktisch ausgeschlossen werden; dies ergibt für den Indikator 'Natürliche Gasführung (im Wirtgestein)' für den Lagerperimeter SMA-JO die Bewertung *sehr günstig*.

Fazit: Das Kriterium 'Untertägige Erschliessung und Wasserhaltung' wird im Lagerperimeter SMA-JO insgesamt als *sehr günstig* beurteilt.

Gesamtbewertung der Kriteriengruppe 'Bautechnische Eignung' für den Lagerperimeter SMA-JO: *günstig*.

¹⁶⁴ Zur Berücksichtigung der im Standortgebiet Jura Ost erwarteten tektonischen Überprägung des Wirtgesteins (Lage in der Vorfaltenzone) wird der Indikator für den Lagerperimeter SMA-JO im Vergleich zur Bewertung in Kap. 3.3 etwas schlechter aber immer noch als *günstig* bewertet.

Prüfung der Sensitivität der Bewertungen für den Lagerperimeter SMA-JO

Zur Prüfung der Sensitivität der oben für den "massgebenden Fall" durchgeführten Bewertungen werden diese mit den Bewertungen der alternativen Lagerperimeter verglichen, vgl. die Darstellungen der abgegrenzten Lagerperimeter in Anhang B (inkl. tabellarische Kurzcharakterisierung) sowie die Bewertung der "bewertbaren" Lagerperimeter¹⁶⁵ in Anhang C.3.1.2. In Anhang C.3.1.2 findet sich auch eine Bewertung für eine Variante mit einer alternativen Interpretation der Qualität der oberen Rahmengesteine. Der Vergleich der Bewertungen ergibt folgendes Bild:

Wenn die Tiefenlage des Wirtgesteins geringer ist als angenommen (Fall *SMA-JO-aL2-u*), ergibt sich selbst bei einer maximalen Tiefenlage von 500 m u.T. noch ein knapp *sehr günstiges* Platzangebot. Bei Annahme eines tiefer liegenden Wirtgesteins (Fall *SMA-JO-mLE-t*) resultiert noch ein *günstiges* Platzangebot. In beiden Fällen ändern die weiteren Bewertungen und die Gesamtbewertung wenig bzw. nicht. Die detaillierten Bewertungen sind in Anhang C.3.1.2 zu finden. Insgesamt bietet das Standortgebiet Jura Ost eine grosse Flexibilität zur untertägigen Anordnung des Lagers.

Die alternative Konzeptualisierung zur Barrierenwirkung der oberen Rahmengesteine des Opalinustons (Fall *SMA-JO-mLE-r-oRG*) führt neu zu einer *sehr günstigen* Bewertung für den Indikator 'Mächtigkeit', aber nur zu minimalen Änderungen der Bewertung des Kriteriums 'Räumliche Ausdehnung' und der Bewertung der Kriteriengruppe 'Eigenschaften des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs', die Gesamtbewertung bleibt gleich.

Fazit: Die Bewertungen der alternativen Lagerperimeter sowie die alternative Konzeptualisierung der oberen Rahmengesteine führen für das Standortgebiet Jura Ost nicht zu einer merklich anderen Gesamtbewertung. Die Flexibilität bei der untertägigen Anordnung des Lagers ist insgesamt gross.

4.4.3.6 SMA-Lagerperimeter Jura-Südfuss (SMA-JS)

Hauptmerkmale

Im Lagerperimeter SMA-JS weist der Opalinuston eine Mächtigkeit von ca. 90 m auf und liefert den Hauptbeitrag zur Barrierenwirkung des Gesamtsystems. Die oberen Rahmengesteine (Top Opalinuston bis Basis Haupttrogenstein-Formation sind z.T. heterogen aufgebaut, tragen aber ebenfalls zur Barrierenwirkung bei, auch wenn sie weniger mächtig sind als die Rahmengesteine im Faziesraum Ost. Weiter wird erwartet, dass die oberen Rahmengesteine im Vergleich zum Faziesraum Ost eher von schlechterer Qualität sind (erhöhte Durchlässigkeit innerhalb der Passwang-Formation und der Unteren Acuminata-Schichten). Auch die unteren Rahmengesteine sind z.T. heterogen aufgebaut mit Schichten von teilweise erhöhter Durchlässigkeit; sie tragen wegen des Kalkigen Lias direkt unterhalb des Opalinustons kaum zur Barrierenwirkung des Gesamtsystems bei.

Der Lagerperimeter SMA-JS liegt am Jura-Südfuss beidseits der Aare im Raum östlich von Olten. Aus tektonischer Sicht gehört der Lagerperimeter zur Subjurassischen Zone, welche durch die Bildung des Faltenjuras mitgeprägt und teilweise tektonisch stark zergliedert ist. Der Lagerperimeter wird geologisch durch regionale Störungszonen (im Nordwesten, Südwesten und Süden) sowie durch die Tiefenlage (im Südosten) begrenzt. Auch unter Berücksichtigung

¹⁶⁵ In Tab. 4.2-3 bzw. Tab. B-1 ist aufgeführt, welche von den abgegrenzten und in Anhang B dargestellten Lagerperimetern bewertet werden.

der relativ starken tektonischen Zergliederung ist der Lagerperimeter durch die für Etappe 2 durchgeführte 2D-Seismik und drei ältere Seismiklinien und durch die Tiefbohrung Gösgen SB4 recht gut dokumentiert.

A) **Eigenschaften des Opalinustons mit seinen Rahmengesteinen im Lagerperimeter SMA-JS unter Berücksichtigung seiner Konfiguration**

Räumliche Ausdehnung (Kriterium 1.1)

Im Lagerperimeter SMA-JS liegt der Top Opalinuston im Tiefenbereich von 365 – 550 m u.T.; die für die Bewertung massgebende minimale Überdeckung beträgt 365 m, sodass die oberen Rahmengesteine als Barriere eine genügende Überdeckung haben. Die unteren Rahmengesteine tragen wegen des Kalkigen Lias direkt unterhalb des Opalinustons kaum zur Barrierenwirkung des Gesamtsystems bei. Unter Berücksichtigung der erwarteten beschränkten Mächtigkeit des Opalinustons (angetroffene Mächtigkeit in der Bohrung Gösgen SB4: 90 m) und der beschränkten Barrierenwirkung der oberen Rahmengesteine wird der Indikator 'Mächtigkeit' im Lagerperimeter SMA-JS deshalb nur als *bedingt günstig* beurteilt. Auch unter Berücksichtigung der Resultate der Dosisberechnungen zur Barrierenwirkung bleibt die Bewertung für den Indikator 'Mächtigkeit' bedingt günstig.

Wegen der Ungewissheiten in der Qualität der oberen Rahmengesteine (keine erhöhte Wasserführung innerhalb der Passwang-Formation und der Unteren Acuminata-Schichten, vgl. Nagra 2014b, Dossier II, Anhang 4) wird zusätzlich eine Variante mit einer etwas günstigeren Barrierenwirkung der oberen Rahmengesteine betrachtet¹⁶⁶.

Die laterale Ausdehnung des Lagerperimeters beträgt 12.6 km². Wegen seiner Lage in der Subjurassischen Zone und wegen des tektonischen Baustils im Bereich des Lagerperimeters und unter Berücksichtigung der auf der Seismik sichtbaren Strukturen ist mit einer vergleichsweise starken tektonischen Überprägung bzw. kleinräumigen Zergliederung des geologischen Untergrunds zu rechnen. Deshalb müssen grosszügige Platzreserven eingerechnet werden. Der Lagerperimeter SMA-JS bietet mit einer Fläche von 12.6 km² zwar gewisse Platzreserven, diese sind jedoch unter Berücksichtigung der unruhigen Lagerung eher als knapp einzustufen. In Bezug auf den Indikator 'Platzangebot untertags' wird der Lagerperimeter SMA-JS als *günstig* eingestuft.

Fazit: Das Kriterium 'Räumliche Ausdehnung' wird im Lagerperimeter SMA-JS insgesamt als *bedingt günstig* beurteilt, auch wenn durch die tektonische Überprägung eine gewisse Einschränkung des Platzangebots nicht ausgeschlossen werden kann.

Hydraulische Barrierenwirkung (Kriterium 1.2)

Die Tiefenlage der Obergrenze des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs wird bezüglich des Indikators 'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteins-Dekompaktion' für den Lagerperimeter SMA-JS knapp als *sehr günstig* eingestuft, denn die minimale Überdeckung der Obergrenze des Opalinustons beträgt 365 m, sodass die oberen Rahmengesteine (Passwang-

¹⁶⁶ Die Konzeptualisierung mit einer günstigen Barrierenwirkung der oberen Rahmengesteine wird in einem alternativen Fall (*SMA-JS-mLE-r-oRG*) bewertet. Wegen der in der alternativen Konzeptualisierung angenommenen guten Barrierenwirkung der oberen Rahmengesteine (keine Wirkung der Sandkalkabfolgen in der Passwang-Formation und in den Unteren Acuminata-Schichten im Hangenden des Opalinustons) führt dies für den alternativen Fall auch unter Berücksichtigung der Resultate der Dosisberechnungen zu einer *günstigen* Bewertung für den Indikator 'Mächtigkeit'.

Formation und Untere Acuminata-Schichten) aus Sicht der Überdeckung als Barriere zwar wirksam sind; sie sind aber im Vergleich zum Faziesraum Ost etwas weniger mächtig, und es besteht die Möglichkeit der erhöhten Wasserführung innerhalb der Passwang-Formation und der Unteren Acuminata-Schichten. Die hydraulische Barrierenwirkung des Opalinustons (massgebend für Bewertung des Indikators 'Hydraulische Durchlässigkeit') kommt vollständig zum Tragen; die unteren Rahmengesteine hingegen sind als Barriere nicht wirksam. Aufgrund der stratigraphischen Verhältnisse wird im Lagerperimeter SMA-JS ein ausgeprägter Grundwasserstockwerkbau erwartet; dies ergibt für den Indikator 'Grundwasserstockwerke' die Bewertung knapp *sehr günstig*.

Fazit: Zusammen mit der wirtgesteinsspezifisch vorgenommenen *sehr günstigen* Beurteilung des Opalinustons bezüglich des Indikators 'Hydraulische Durchlässigkeit' (vgl. Kap. 3.3) fällt die Bewertung des Kriteriums 'Hydraulische Barrierenwirkung' für den Lagerperimeter SMA-JS insgesamt *sehr günstig* aus, trotz der beschränkten Qualität der Rahmengesteine.

Geochemische Bedingungen (Kriterium 1.3)

Das Kriterium 'Geochemische Bedingungen' wird wirtgesteinsspezifisch beurteilt (vgl. Kap. 3.3); die Bewertung für den Lagerperimeter SMA-JS fällt insgesamt *sehr günstig* aus.

Freisetzungspfade (Kriterium 1.4)

Alle Indikatoren des Kriteriums 'Freisetzungspfade' werden wirtgesteinsspezifisch beurteilt, auch der Indikator 'Länge der massgebenden Freisetzungspfade' (vgl. Kap. 3.3). Die Bewertung des Kriteriums 'Freisetzungspfade' für den Lagerperimeter SMA-JS fällt insgesamt *sehr günstig* aus.

Gesamtbewertung der Kriteriengruppe 'Eigenschaften des Wirtgesteins / einschlusswirksamen Gebirgsbereichs' für den Opalinuston mit seinen Rahmengesteinen im Lagerperimeter SMA-JS: knapp *sehr günstig*.

B) Langzeitstabilität im Lagerperimeter SMA-JS

Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften (Kriterium 2.1)

Die Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften im Lagerperimeter SMA-JS wird einerseits aus Sicht der geologisch-tektonischen Situation beurteilt (vgl. Kap. 4.4.2). Andererseits wird der Indikator 'Potenzial zur Bildung neuer Wasserwegsamkeiten (Verkarstung)' wirtgesteinsspezifisch beurteilt (vgl. Kap. 3.3); im Falle des Opalinustons erübrigt sich eine diesbezügliche Beurteilung der Konfiguration, weil eine Verkarstung im Opalinuston ausgeschlossen werden kann; es ergibt sich für diesen Indikator eine *sehr günstige* Bewertung. In Ergänzung zu Kap. 4.4.2 wird beim Indikator 'Modellvorstellungen zur Langzeitentwicklung (Geodynamik und Neotektonik; weitere Prozesse)' auch die Möglichkeit der Bildung einer Durchbruchsrinne berücksichtigt. Da im Lagerperimeter wegen der günstigen Lage des Lagerperimeters bezüglich Vergletscherung die Bildung einer Durchbruchsrinne innerhalb des Betrachtungszeitraums für ein SMA-Lager von 100'000 Jahren als sehr unwahrscheinlich eingestuft wird und zusätzlich auch die Tiefenlage des Lagers gross ist, ist dieser Aspekt nicht relevant. Aufgrund der Modellvorstellungen zur Geodynamik wird dieser Indikator insgesamt als *günstig* bewertet. Die Bewertung des Kriteriums 'Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften' fällt für den Lagerperimeter SMA-JS insgesamt knapp *sehr günstig* aus.

Erosion (Kriterium 2.2)

Innerhalb des für ein SMA-Lager relevanten Betrachtungszeitraums von 100'000 Jahren und für die erwarteten grossräumigen Hebungsraten (vgl. Kap. 4.4.2) wird die zukünftige Erosion in der Nordschweiz im Bereich von maximal 50 m liegen. Im Lagerperimeter SMA-JS liegt die Obergrenze des Opalinustons in einem Tiefenbereich von ca. 290 – 510 m unter der Erosionsbasis. Die massgebende minimale Tiefe des Opalinustons unter Erosionsbasis beträgt ca. 290 m. Weiter wird die Bildung einer Durchbruchsrinne im Lagerperimeter als sehr unwahrscheinlich eingeschätzt. Aus diesen Gründen wird der Indikator 'Tiefenlage unter lokaler Erosionsbasis im Hinblick auf die Bildung neuer Rinnen' im Lagerperimeter SMA-JS insgesamt als *sehr günstig* beurteilt.

Innerhalb und in der Nähe des Lagerperimeters SMA-JS gibt es keine glazial übertieften Felsrinnen. Zwar liegt der Lagerperimeter SMA-JS im Aaretal, dieses wurde im Raum Olten in der Vergangenheit aber nicht glazial übertieft. Da der Lagerperimeter nicht im Bereich von übertieften Felsrinnen liegt und die Felsüberdeckung im gesamten Lagerperimeter mehr als ca. 325 m beträgt, wird der Indikator 'Tiefenlage unter Fels im Hinblick auf glaziale Tiefenerosion' für den Lagerperimeter SMA-JS insgesamt als *sehr günstig* eingestuft.

Fazit: Zusammen mit der *sehr günstigen* Beurteilung des Indikators 'Erosion im Betrachtungszeitraum' in der Nordschweiz (vgl. Kap. 4.4.2) fällt die Bewertung des Kriteriums 'Erosion' im Lagerperimeter SMA-JS insgesamt *sehr günstig* aus.

Lagerbedingte Einflüsse (Kriterium 2.3)

Das Kriterium 'Lagerbedingte Einflüsse' wird wirtgesteinsspezifisch beurteilt (vgl. Kap. 3.3); die Bewertung für den Lagerperimeter SMA-JS fällt insgesamt *günstig* aus.

Nutzungskonflikte (Kriterium 2.4)

Die möglichen Nutzungskonflikte wurden in Kap. 4.4.2 behandelt. Unter Berücksichtigung der dort aufgeführten Unterlagen werden der Indikator 'Rohstoffvorkommen unterhalb des Wirtgesteins' für den Lagerperimeter SMA-JS insgesamt als *günstig* und der Indikator 'Rohstoffvorkommen oberhalb des Wirtgesteins' als *sehr günstig* beurteilt.

Innerhalb des Lagerperimeters SMA-JS sind keine bedeutenden Mineral- und Thermalwassernutzungen vorhanden. Für die Nutzung von Mineral- und Thermalwasservorkommen in der Region ist insbesondere der Muschelkalk-Aquifer von Bedeutung, beispielsweise in Bad Lostorf (seit einigen Jahren ungenutzt). Mit den Zugangsbauwerken werden nur hydrogeologische Einheiten bis zum Opalinuston durchfahren. Es werden also keine mit dem Muschelkalk-Aquifer hydraulisch verbundenen Formationen durchfahren. Deshalb wird der Indikator 'Mineral- und Thermalwassernutzungen' als *sehr günstig* beurteilt.

Die Unterlagen zur Geothermie und zu weiteren energiebezogenen Nutzungen des Untergrunds finden sich in Kap. 4.4.2 und dort wurden auch die Lagerperimeter beurteilt. Basierend auf den dort aufgeführten Aussagen ergibt sich für den Indikator 'Geothermie und weitere energiebezogene Nutzungen des Untergrunds' für den Lagerperimeter SMA-JS die Beurteilung *günstig*.

Fazit: Zusammen mit der *sehr günstigen* Beurteilung des nicht als nutzungswürdig eingestuften Rohstoffvorkommens innerhalb des Opalinustons (vgl. Kap. 3.3) fällt die Bewertung des Kriteriums 'Nutzungskonflikte' im Lagerperimeter SMA-JS insgesamt knapp *sehr günstig* aus.

Gesamtbewertung der Kriteriengruppe 'Langzeitstabilität' für den Lagerperimeter SMA-JS: knapp *sehr günstig*.

C) Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen im Lagerperimeter SMA-JS

Charakterisierbarkeit der Gesteine (Kriterium 3.1)

Das Kriterium 'Charakterisierbarkeit der Gesteine' wird wirtgesteinsspezifisch beurteilt (vgl. Kap. 3.3); die Bewertung für den Lagerperimeter SMA-JS fällt insgesamt *sehr günstig* aus.

Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse (Kriterium 3.2)

Die Explorationsverhältnisse im geologischen Untergrund des Wirtgesteins Opalinuston sind generell *sehr günstig* (vgl. Kap. 3.3). Wegen der eingeschränkten Abbildung der oberen Wirtgesteinsgrenzen wird der Indikator 'Explorationsverhältnisse im geologischen Untergrund' für den Lagerperimeter SMA-JS knapp als *sehr günstig* beurteilt.

Der Lagerperimeter SMA-JS kann mit einer geeigneten 3D-seismischen Messung erkundet werden. Die teilweise dichte Besiedlung im Aaretal, der Verlauf der Aare mit Aareinsel und die teilweise dichte Infrastruktur erschweren die Durchführung. Der Lagerperimeter bietet es jedoch an, den westlichen Teil wegzulassen (vgl. Fig. 4.2-18), womit sich die Situation diesbezüglich etwas verbessert. Einbussen in der Abbildbarkeit müssen möglicherweise im Bereich des Aare-Knies-Winznau in Kauf genommen werden. Insgesamt wird daher der Indikator 'Explorationsbedingungen an Oberfläche' für den Lagerperimeter SMA-JS als *günstig* bewertet.

Fazit: Insgesamt wird das Kriterium 'Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse' im Lagerperimeter SMA-JS knapp als *sehr günstig* beurteilt.

Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen (Kriterium 3.3)

Das Kriterium 'Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen' wird einerseits bezüglich der geologisch-tektonischen Situation (vgl. Kap. 4.4.2) und andererseits wirtgesteinsspezifisch beurteilt (vgl. Kap. 3.3). In Ergänzung zu Kap. 4.4.2 wird beim Indikator 'Modellvorstellungen zur Langzeitentwicklung (Geodynamik und Neotektonik; weitere Prozesse)' auch die Möglichkeit der Bildung einer Durchbruchsrinne berücksichtigt. Da im Lagerperimeter die Bildung einer Durchbruchsrinne wegen der günstigen Lage des Lagerperimeters bezüglich Vergletscherung innerhalb des Betrachtungszeitraums als sehr unwahrscheinlich eingestuft wird und zusätzlich auch die Tiefenlage des Lagers gross ist, ist dieser Aspekt nicht relevant. Wegen der für die Bewertung massgebenden Modellvorstellungen zur Geodynamik wird dieser Indikator insgesamt als *günstig* bewertet. Zusammen mit der *sehr günstigen* Bewertung des Indikators 'Unabhängige Evidenzen der Langzeitisolation' (Kap. 3.3) fällt die Bewertung des Kriteriums 'Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen' für den Lagerperimeter SMA-JS insgesamt knapp *sehr günstig* aus.

Gesamtbewertung der Kriteriengruppe 'Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen' für den Lagerperimeter SMA-JS: *sehr günstig*.

D) Bautechnische Eignung des Lagerperimeters SMA-JS

Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen (Kriterium 4.1)

Im Lagerperimeter SMA-JS liegt die Lagerebene (Annahme: Lagerebene in der Mitte des Opalinuston) in einer Tiefe von ca. 410 – 600 m u.T.; die für die Bewertung massgebende maximale Tiefe der Lagerebene beträgt 600 m u.T. Dies ergibt für den Indikator 'Tiefenlage im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit (u.B. Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften)' für den Lagerperimeter SMA-JS die Bewertung *günstig*.

Fazit: Zusammen mit dem für den Opalinuston als *günstig* eingestuften Indikator 'Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften'¹⁶⁷, wird das Kriterium 'Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen' im Lagerperimeter SMA-JS für die betrachteten Tiefenlagen insgesamt als *günstig* beurteilt.

Untertägige Erschliessung und Wasserhaltung (Kriterium 4.2)

Der Zugang nach Untertag vom Standortareal JS-1 zum untertägigen Lagerperimeter kann über eine Rampe oder über einen Schacht erfolgen. Im Fall der Verwendung einer Rampe müssen zuerst die quartären Ablagerungen durchquert werden, die allerdings seicht sind; dann folgt das Schichtpaket der Unteren Süswassermolasse (USM). Die restlichen Gesteinsformationen (Malmkalke, Effinger Schichten, Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger' und Opalinuston) werden aus bautechnischer und hydrogeologischer Sicht wegen der lokal etwas stärkeren Tektonisierung für die Bauphase teilweise als anspruchsvoll erachtet. In den Kalken können Verkarstungsphänomene und somit Wassereinbrüche nicht ausgeschlossen werden. Wasserzutritte sind vor allem für alle kalkigen bzw. spröderen Einheiten auch aus offenen Klüften und entlang von Störungszonen möglich. Weiter können auch Gaszutritte nicht ausgeschlossen werden. Auch die erforderlichen Schachtbauwerke (Lüftungs- bzw. Betriebsschacht und der Förderschacht, falls keine Rampe verwendet wird) durchqueren die gleichen Gesteinsformationen; die Bauphase wird jedoch für die Schächte als weniger anspruchsvoll beurteilt als die Rampe. Der Indikator 'Geotechnische und hydrogeologische Verhältnisse in überlagernden Gesteinsformationen' wird für den Lagerperimeter SMA-JS unter Berücksichtigung der möglichen technischen Massnahmen insgesamt mit *bedingt günstig* bewertet. Diese Bewertung zeigt auf, dass geologische Erschwernisse zu erwarten sind; diese können jedoch bei geeigneter Auslegung und geeignetem Vorgehen beherrscht werden, sodass die technische Machbarkeit und die Sicherheit trotz dieser Bewertung gewährleistet sind. Dabei ist zu beachten, dass der Lagerperimeter SMA-JS die Flexibilität bietet, für den Zugang nach Untertag vom Standortareal JS-1 aus sowohl Schacht als auch Rampe verwenden zu können.

Eine natürliche Gasführung im Opalinuston kann praktisch ausgeschlossen werden; dies ergibt für den Indikator 'Natürliche Gasführung (im Wirtgestein)' für den Lagerperimeter SMA-JS die Bewertung *sehr günstig*.

Fazit: Das Kriterium 'Untertägige Erschliessung und Wasserhaltung' wird im Lagerperimeter SMA-JS insgesamt als *günstig* beurteilt.

¹⁶⁷ Zur Berücksichtigung der im Standortgebiet Jura-Südfuss erwarteten tektonischen Überprägung des Wirtgesteins (Lage in der Subjurassischen Zone) wird der Indikator für den Lagerperimeter SMA-JS im Vergleich zur Bewertung in Kap. 3.3 etwas schlechter, aber immer noch als *günstig* bewertet.

Gesamtbewertung der Kriteriengruppe 'Bautechnische Eignung' für den Lagerperimeter SMA-JS: *günstig*.

Prüfung der Sensitivität der Bewertungen für den Lagerperimeter SMA-JS

Zur Prüfung der Sensitivität der oben für den "massgebenden Fall" durchgeführten Bewertungen werden diese mit den Bewertungen der alternativen Lagerperimeter verglichen, vgl. die Darstellungen der abgegrenzten Lagerperimeter in Anhang B (inkl. tabellarische Kurzcharakterisierung) sowie die Bewertung der "bewertbaren" Lagerperimeter¹⁶⁸ in Anhang C.3.1.2. In Anhang C.3.1.2 findet sich auch eine Bewertung für eine Variante mit einer alternativen Interpretation der Qualität der oberen Rahmengesteine. Der Vergleich der Bewertungen ergibt folgendes Bild:

Wenn die Tiefenlage des Wirtgesteins grösser ist als angenommen (Fall *SMA-JS-aL1-t*), ergibt sich ein knapp *günstiges* Platzangebot, allerdings unter Inkaufnahme einer *bedingt günstigen* maximalen Tiefenlage von 650 m u.T. und einer *bedingt günstigen* Bewertung des Kriteriums 'Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen'. Fällt die Tiefenlage des Wirtgesteins geringer aus als angenommen (Fall *SMA-JO-aL3-u*), ergibt sich ein knapp *sehr günstiges* Platzangebot, allerdings mit einer nur noch *günstigen* Bewertung der Tiefenlage bezüglich glazialer Tiefenerosion und Gesteins-Dekompaktion. In beiden Fällen ändern die weiteren Bewertungen und die Gesamtbewertung wenig. Die detaillierten Bewertungen sind in Anhang C.3.1.2 zu finden. Insgesamt bietet das Standortgebiet Jura-Südfuss eine ausreichende Flexibilität zur untertägigen Anordnung des Lagers.

Die alternative Konzeptualisierung zur Barrierenwirkung der oberen Rahmengesteine des Opalinustons (Fall *SMA-JS-mLE-r-oRG*) führt neu zu einer *günstigen* Bewertung des Indikators 'Mächtigkeit' und damit auch des Kriteriums 'Räumliche Ausdehnung', aber zu keiner wesentlichen Änderung für die Kriteriengruppe 'Eigenschaften des Wirtgesteins bzw. des einschliesswirksamen Gebirgsbereichs'. Auch die Gesamtbewertung ändert sich nicht merkbar.

Fazit: Die Bewertungen der alternativen Lagerperimeter sowie die alternative Konzeptualisierung der oberen Rahmengesteine führen für das Standortgebiet Jura-Südfuss nicht zu einer signifikant anderen Gesamtbewertung. Die Flexibilität bei der untertägigen Anordnung des Lagers ist insgesamt ausreichend.

4.4.3.7 SMA-Lagerperimeter Wellenberg (SMA-WLB)

Hauptmerkmale

Im Standortgebiet Wellenberg liegen die Mergel-Formationen des Helvetikums (Palfris-Formation und Vitznau-Mergel der Drusberg-Decke, Globigerinenmergel und Schimberg-Schiefer der Axen-Decke) als Akkumulation vor, mit einer Ausdehnung im Kilometerbereich in allen drei Raumrichtungen und liefern den Hauptbeitrag zur Barrierenwirkung des Gesamtsystems, während die angrenzenden Formationen (mehrheitlich Karbonatgesteine) keine nennenswerten Beiträge beisteuern.

¹⁶⁸ In Tab. 4.2-3 bzw. Tab. B-1 ist aufgeführt, welche von den abgegrenzten und in Anhang B dargestellten Lagerperimetern bewertet werden.

Das Standortgebiet Wellenberg liegt geographisch zwischen dem Engelbergertal (im Talabschnitt Grafenort bis Wolfenschiessen) und dem Tal des Secklisbachs (Oberrickenbach). Die Ost- und die Westgrenze der Lagerperimeter werden durch die beschränkte Überdeckung im Bereich des Engelbergertals und des Secklisbach-Tals gebildet, die Nord- und Südgrenze durch Kalke der Drusberg- und der Axen-Decke. Es existieren detaillierte Kenntnisse über den geologischen Aufbau des Standortgebiets Wellenberg, die im Rahmen der umfangreichen Standortuntersuchungen für ein SMA-Lager in den 1990er Jahren mit sechs Tiefbohrungen, Seismik und einer detaillierten Oberflächenkartierung erworben wurden.

Für die hier vorgenommene Bewertung wurden in Kap. 4.2 auf unterschiedlichen Niveaus (Lagerebenen) anhand der vorhandenen Unterlagen geeignete Flächen abgegrenzt, die sinngemäss als Lagerperimeter gelten und nachfolgend bewertet werden. Die Niveaus (540 m ü.M., 400 m ü.M. und 200 m ü.M.) sind modellhaft und abdeckend gewählt worden¹⁶⁹.

A) **Eigenschaften der Mergel-Formationen des Helvetikums im Lagerperimeter SMA-WLB unter Berücksichtigung ihrer Konfiguration**

Räumliche Ausdehnung (Kriterium 1.1)

Der Indikator 'Mächtigkeit' wird wirtgesteinsspezifisch beurteilt (vgl. Kap. 3.3). Die Bewertung fällt *sehr günstig* aus.

Im Lagerperimeter SMA-WLB¹⁷⁰ liegt die Obergrenze der Mergel-Formationen an der Erdoberfläche im Bereich von ca. 500 – 1200 m ü.M. Die laterale Ausdehnung der Flächen auf den verschiedenen Lagerebenen beträgt insgesamt ca. 4 – 5 km². Der Lagerperimeter SMA-WLB bietet unter Berücksichtigung der verschiedenen Lagerebenen somit genügend Platz. In Bezug auf den Indikator 'Platzangebot untertags' wird der Lagerperimeter SMA-WLB wegen der vorhandenen Flexibilitäten (ausgedehnter Gesteinskörper, Möglichkeit der Anordnung des Lagers auf verschiedenen Ebenen) knapp als *günstig* eingestuft.

Aus dem Lötschbergtunnel gibt es jedoch Hinweise (durchlässige Störungszone in Globigerinenschiefer/Schimberg-Schiefern bei 600 m Überdeckung, vgl. Nagra 2014b, Dossier VII), dass das Tertiär der Axen-Decke möglicherweise eine weniger gute Barrierenqualität haben könnte als angenommen und nicht als Wirtgestein genutzt werden kann, sodass deshalb weniger Platz für die Anordnung der Lagerkammern zur Verfügung steht¹⁷¹.

Fazit: Das Kriterium 'Räumliche Ausdehnung' wird im Lagerperimeter SMA-WLB insgesamt als *günstig* beurteilt.

¹⁶⁹ Für die Baugrundmodelle wurde für den sogenannten Haupterschliessungspunkt eine Tiefenlage von 420 m ü.M. bzw. 220 m ü.M. gewählt.

¹⁷⁰ Im Standortgebiet Wellenberg besteht die modellhafte Möglichkeit, das Lager auf 3 Ebenen aufzuteilen (540 m ü.M., 400 m ü.M. und 200 m ü.M.), wovon die Lagerebene mit 540 m ü.M. wegen der beschränkten Überdeckung nur für Abfälle mit vergleichsweise kleinem Nuklidinventar verwendet würde.

¹⁷¹ Deshalb wird bei der Abgrenzung der Lagerperimeter als alternative Konzeptualisierung die Annahme getroffen, dass das Tertiär der Axen-Decke keine Wirtgesteinsqualität hat und nur die Palfris-Formation der Drusberg-Decke als Wirtgestein berücksichtigt werden kann (*SMA-WLB-aL1-r* und *SMA-WLB-aL1-re200*).

Hydraulische Barrierenwirkung (Kriterium 1.2)

Die Tiefenlage des Wirtgesteinskörpers wird bezüglich des Indikators 'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteins-Dekompaktion' für den Lagerperimeter SMA-WLB knapp als *sehr günstig* eingestuft, da die Überdeckung in den abgegrenzten Flächen auf den verschiedenen Lagerebenen (mit Ausnahme von Teilflächen auf der Lagerebene von 540 m ü.M.) mindestens ca. 600 m beträgt, je nach gewähltem Lagerniveau auch deutlich mehr; dadurch kommt die hydraulische Barrierenwirkung der Mergel-Formationen voll zur Entfaltung. Im Lagerperimeter SMA-WLB liegt kein klassischer Grundwasserstockwerkbau wie in den subhorizontal gelagerten sedimentären Schichtstapeln der Nordschweiz vor. Es gibt allerdings in keiner der Sondierbohrungen am Wellenberg Anzeichen, dass Grundwässer aus den Kalken im Liegenden in die Mergel-Formationen migriert sind, weshalb der Lagerperimeter SMA-WLB in Analogie zu den Lagerperimetern in der Nordschweiz für den Indikator 'Grundwasserstockwerke' als *sehr günstig* eingestuft wird.

Fazit: Zusammen mit der wirtgesteinsspezifisch vorgenommenen *günstigen* Beurteilung der Mergel-Formationen bezüglich des Indikators 'Hydraulische Durchlässigkeit' (vgl. Kap. 3.3) fällt die Bewertung des Kriteriums 'Hydraulische Barrierenwirkung' für den Lagerperimeter SMA-WLB insgesamt knapp *sehr günstig* aus.

Geochemische Bedingungen (Kriterium 1.3)

Das Kriterium 'Geochemische Bedingungen' wird wirtgesteinsspezifisch beurteilt (vgl. Kap. 3.3); die Bewertung für den Lagerperimeter SMA-WLB fällt insgesamt *günstig* aus.

Freisetzungspfade (Kriterium 1.4)

Alle Indikatoren des Kriteriums 'Freisetzungspfade' werden wirtgesteinsspezifisch beurteilt, auch der Indikator 'Länge der massgebenden Freisetzungspfade' (vgl. Kap. 3.3). Die Bewertung des Kriteriums 'Freisetzungspfade' für den Lagerperimeter SMA-WLB fällt für den massgebenden Fall insgesamt *günstig* aus. Wie in Kap. 3.3 aufgeführt, wird bezüglich der Ausbildung des Transportpfads auch eine alternative Konzeptualisierung betrachtet¹⁷².

Gesamtbewertung der Kriteriengruppe 'Eigenschaften des Wirtgesteins / einschlusswirksamen Gebirgsbereichs' für die Mergel-Formationen des Helvetikums im Lagerperimeter SMA-WLB: *günstig*.

B) Langzeitstabilität im Lagerperimeter SMA-WLB

Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften (Kriterium 2.1)

Die Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften im Lagerperimeter SMA-WLB wird einerseits aus Sicht der geologisch-tektonischen Situation beurteilt. Andererseits wird der Indikator 'Potenzial zur Bildung neuer Wasserwegsamkeiten (Verkarstung)' wirtgesteinsspezifisch beurteilt (vgl. Kap. 3.3). Im Lagerperimeter SMA-WLB wird aufgrund des lithologischen Gesamtaufbaus bzw. der Zerschering der Kalkbänke keine Verkarstung erwartet, und es existieren auch keine Hinweise auf eine Verkarstung von Mergel-Formationen des Helvetikums,

¹⁷² Falls der grösste Teil der Transportpfadlänge in boudinierten Kalkbankabfolgen verläuft (entspricht alternativer Konzeptualisierung in Fall *SMA-WLB-mLE-r-KBA*), beträgt die wirksame Transportpfadlänge nur noch 20 m und der Indikator 'Länge der massgebenden Freisetzungspfade' wird nur noch als *bedingt günstig* bewertet.

trotz teilweise grosser hydraulischer Gradienten; es ergibt sich für diesen Indikator eine *sehr günstige* Bewertung. Beim Indikator 'Modellvorstellungen zur Langzeitentwicklung (Geodynamik und Neotektonik; weitere Prozesse)' werden neben der Geodynamik und Neotektonik auch die Aspekte der Erosion berücksichtigt. Alle diese Aspekte werden wegen der alpinen Lage (Erosionspotenzial, zukünftige Vergletscherungen) und der tektonischen Situation im Vergleich mit den Standortgebieten in der Nordschweiz als bedingt günstig eingestuft. Der Indikator 'Modellvorstellungen zur Langzeitentwicklung (Geodynamik und Neotektonik; weitere Prozesse)' wird deshalb insgesamt als *bedingt günstig* bewertet. Die Bewertung des Kriteriums 'Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften' fällt für den Lagerperimeter SMA-WLB insgesamt *günstig* aus.

Erosion (Kriterium 2.2)

Innerhalb des für ein SMA-Lager relevanten Betrachtungszeitraums von 100'000 Jahren und für die erwarteten grossräumigen Hebungsraten (vgl. Kap. 4.4.2) wird die zukünftige Erosion im Lagerperimeter SMA-WLB im Bereich von ca. 50 – 200 m liegen, lokal evtl. auch höher. Im Unterschied zur Nordschweiz wird aber nicht mit einer Durchbruchsrinne bis auf das Talniveau gerechnet. Innerhalb des Betrachtungszeitraums kann bei der Wahl einer geeigneten Lagerebene eine Lagerfreilegung ausgeschlossen werden. Die Überdeckung der abgegrenzten Flächen auf den verschiedenen Lagerebenen (400 m ü.M. und 200 m ü.M.) beträgt am Anfang des Betrachtungszeitraums überall mindestens ca. 600 m¹⁷³, teilweise auch deutlich mehr. Am Ende des Betrachtungszeitraums nimmt die Überdeckung auf mindestens 250 m (Lagerebene 540 m ü.M.) bzw. mindestens 400 m (untere Lagerebenen) ab bei einer angenommenen Übertiefung von 50 m (vgl. Fig. 4.2-25). Das Szenarium mit einer Übertiefung von 200 m wird in einem alternativen Fall bewertet¹⁷⁴. Aus diesen Gründen wird der Indikator 'Tiefenlage unter lokaler Erosionsbasis im Hinblick auf die Bildung neuer Rinnen'¹⁷⁵ für die Mergel-Formationen im Lagerperimeter SMA-WLB insgesamt als *sehr günstig* beurteilt.

Das Engelbergertal wurde in der Vergangenheit mehrfach glazial übertieft, ohne dass der seitlich angrenzende, teils über der Talsohle liegende Wirtgesteinskörper dadurch abgetragen wurde. Für den vorliegenden Lagerperimeter SMA-WLB (Abstände zur Talachse, grosse Tiefenlage) ist in den nächsten 100'000 Jahren nicht mit einer Freilegung oder einer signifikanten Beeinträchtigung des Wirtgesteinskörpers und seiner sicherheitsrelevanten Eigenschaften zu rechnen. Der Indikator 'Tiefenlage unter Fels im Hinblick auf glaziale Tiefenerosion'¹⁷⁶ wird für den Lagerperimeter SMA-WLB deshalb knapp als *sehr günstig* eingestuft.

¹⁷³ Als Alternative wird auch ein Lagerperimeter abgegrenzt, wo die Überdeckung auf den Lagerebenen 400 m ü. M. und 200 m ü. M. nur 500 m beträgt (Fall *SMA-WLB-aL2-r*).

¹⁷⁴ Bezüglich Übertiefung gibt es Ungewissheiten. Dies wird mit einem alternativen Szenarium mit einer Übertiefung von 200 m abgedeckt mit den Fällen *SMA-WLB-mLE-re200* bzw. *SMA-WLB-aL1-re200* (vgl. Anhang B). Auch für diese Fälle ergibt sich eine *sehr günstige* Bewertung.

¹⁷⁵ Für den Bereich des Standortgebiets Wellenberg ist die Festlegung einer lokalen Erosionsbasis wie in der Nordschweiz nicht direkt möglich. Bei der Bewertung des Indikators 'Tiefenlage unter lokaler Erosionsbasis im Hinblick auf die Bildung neuer Rinnen' wird deshalb nicht wie in der Nordschweiz vorgegangen sondern von der Terrainoberfläche am Ende des Betrachtungszeitraums ausgegangen und der Einfluss der Dekompaktion bewertet. Dazu wird folgende Bewertungsskala verwendet: Überdeckung in 100'000 Jahren ≥ 400 m: *sehr günstig*; $300 \text{ m} \leq x < 400$ m: *günstig*; $x < 300$ m: *bedingt günstig*.

¹⁷⁶ Für den Standort Wellenberg wird für die Bewertung des Indikators 'Tiefenlage unter Fels im Hinblick auf glaziale Tiefenerosion' vom Grundsatz her gleich vorgegangen wie in der Nordschweiz. Im Gegensatz zur Nordschweiz wird jedoch als Ausgangspunkt nicht die Felsoberfläche heute verwendet, sondern die Felsoberfläche, wie sie am Ende des Betrachtungszeitraums erwartet wird. Für eine *sehr günstige* Bewertung muss dann die Lagerebene 150 m unter der Felsoberfläche, für eine *günstige* Bewertung 50 m unter der Felsoberfläche liegen.

Fazit: Zusammen mit der *günstigen* Beurteilung des Indikators 'Erosion im Betrachtungszeitraum' im Alpenraum für ein SMA-Lager (vgl. Kap. 4.4.2) fällt die Bewertung des Kriteriums 'Erosion' im Lagerperimeter SMA-WLB insgesamt knapp *sehr günstig* aus.

Lagerbedingte Einflüsse (Kriterium 2.3)

Das Kriterium 'Lagerbedingte Einflüsse' wird wirtgesteinsspezifisch beurteilt (Kap. 3.3); die Bewertung für den Lagerperimeter SMA-WLB fällt insgesamt *günstig* aus.

Nutzungskonflikte (Kriterium 2.4)

Im Lagerperimeter SMA-WLB wurden unterhalb des Wirtgesteins Anzeichen von Gas in geklüfteten Sandsteinen des Nordhelvetischen Flyschs nachgewiesen. Die Gasreservoirs sind aufgrund der starken Tektonisierung tendenziell sehr klein. Falls in Zukunft eine tiefe Explorationsbohrung abgeteuft würde, würde dies wahrscheinlich von der Talsohle aus erfolgen, d.h. ein im zentralen Teil des Wirtgesteins platziertes Lager würde dadurch nicht beeinträchtigt. Andere Rohstoffvorkommen sind nicht bekannt. Insgesamt wird deshalb der Indikator 'Rohstoffvorkommen unterhalb des Wirtgesteins' für den Lagerperimeter SMA-WLB mit *günstig* beurteilt. Oberhalb des Wirtgesteins befinden sich keine speziell nutzungswürdigen Rohstoffe, sodass der Indikator 'Rohstoffvorkommen oberhalb des Wirtgesteins' als *sehr günstig* beurteilt wird.

Innerhalb und in der Nähe des Lagerperimeters SMA-WLB existieren keine Mineral- und Thermalwassernutzungen; dies ergibt für den Indikator 'Mineral- und Thermalwassernutzungen' die Beurteilung *sehr günstig*.

Das geothermische Potenzial wird im Lagerperimeter SMA-WLB als gering eingestuft¹⁷⁷; die Beurteilung des Indikators 'Geothermie und weitere energiebezogene Nutzungen des Untergrunds' für den Lagerperimeter SMA-WLB fällt knapp *sehr günstig* aus.

Fazit: Zusammen mit der *sehr günstigen* Beurteilung des als nicht nutzungswürdig eingestuften Rohstoffvorkommens innerhalb der Mergel-Formationen (vgl. Kap. 3.3) fällt die Bewertung des Kriteriums 'Nutzungskonflikte' im Lagerperimeter SMA-WLB insgesamt *sehr günstig* aus.

Gesamtbewertung der Kriteriengruppe 'Langzeitstabilität' für den Lagerperimeter SMA-WLB: *günstig*.

C) Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen im Lagerperimeter SMA-WLB

Charakterisierbarkeit der Gesteine (Kriterium 3.1)

Das Kriterium 'Charakterisierbarkeit der Gesteine' wird wirtgesteinsspezifisch beurteilt (vgl. Kap. 3.3); die Bewertung für den Lagerperimeter SMA-WLB fällt insgesamt *günstig* aus.

¹⁷⁷ Vergleiche dazu Nagra (2014b, Dossier VII).

Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse (Kriterium 3.2)

Die Bedingungen für seismische Untersuchungen von der Oberfläche aus sind durch die geologisch-tektonische Situation und die Topographie in erheblichem Masse erschwert bzw. nicht zielführend, da keine adäquaten Reflektoren vorhanden sind. Aufgrund der spezifischen Situation des Wirtgesteinskörpers ist aber eine erste Abklärung der Wirtgesteinsgrenzen mit Sondierbohrungen (bei Bedarf teilweise von einem Sondierstollen aus) durchaus möglich. Der Indikator 'Explorationsbedingungen an Oberfläche' wird deshalb knapp als *bedingt günstig* beurteilt. Die Erkundung von auslegungsbestimmenden wasserführenden Störungszonen und Fremdgesteins-einschlüssen bzw. von Störungszonen, die potenziell reaktiviert werden können, wird als anspruchsvoll und schwierig beurteilt. Die Möglichkeiten, im Rahmen einer untertägigen Exploration mit Sondierstollen diese Explorationsziele zu erreichen, werden aus heutiger Sicht kritischer beurteilt als in Etappe 1. Entsprechend wird der Indikator 'Explorationsverhältnisse im geologischen Untergrund' für den Lagerperimeter SMA-WLB als *ungünstig* beurteilt.

Fazit: Das Kriterium 'Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse' im Lagerperimeter SMA-WLB wird insgesamt als *ungünstig* beurteilt.

Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen (Kriterium 3.3)

Das Kriterium 'Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen' wird einerseits bezüglich der geologisch-tektonischen Situation (vgl. Kap. 4.4.2) und andererseits wirtgesteinspezifisch beurteilt (vgl. Kap. 3.3). Beim Indikator 'Modellvorstellungen zur Langzeitentwicklung (Geodynamik und Neotektonik; weitere Prozesse)' werden neben der Geodynamik und Neotektonik auch die Aspekte der Erosion berücksichtigt. Dieser Indikator wird wegen der eher schwierigen Prognostizierbarkeit insbesondere der Neotektonik (inkl. Explorierbarkeit potenziell reaktivierbarer Störungszonen) insgesamt als *bedingt günstig* bewertet. Zusammen mit der *sehr günstigen* Bewertung des Indikators 'Unabhängige Evidenzen der Langzeitisolation' (Kap. 3.3) fällt die Bewertung des Kriteriums 'Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen' für den Lagerperimeter SMA-WLB insgesamt *günstig* aus.

Gesamtbewertung der Kriteriengruppe 'Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen' für den Lagerperimeter SMA-WLB: *bedingt günstig*.

D) Bautechnische Eignung des Lagerperimeters SMA-WLB

Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen (Kriterium 4.1)

In den abgegrenzten Flächen der verschiedenen Lagerniveaus beträgt die Überdeckung der Lagerebenen (400 m ü.M. und 200 m ü.M.) praktisch überall mindestens ca. 600 m, teilweise auch deutlich mehr als 800 m. Bautechnisch werden Tiefenlagen bis 450 m u.T. als sehr günstig, Tiefenlagen zwischen 450 und 800 m u.T. als günstig und Tiefenlagen grösser als 800 m u.T. als bedingt günstig betrachtet. Die grosse vertikale Ausdehnung des Wirtgesteinskörpers bietet bautechnisch eine grosse Flexibilität; dies ergibt für den Indikator 'Tiefenlage im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit (u.B. Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften)' für den Lagerperimeter SMA-WLB insgesamt die Bewertung *bedingt günstig*.

Fazit: Zusammen mit dem für die Mergel-Formationen als *sehr günstig* eingestuften Indikator 'Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften', wird das Kriterium 'Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen' im Lagerperimeter SMA-WLB insgesamt als *günstig* beurteilt.

Untertägige Erschliessung und Wasserhaltung (Kriterium 4.2)

Der Zugang nach Untertag vom Standortareal WLB-1 zum untertägigen Lagerperimeter erfolgt anfänglich über einen leicht ansteigenden Tunnel, nach Übergang in die Helvetischen Mergel dann über eine abfallende Rampe. Die mit dem leicht ansteigenden Tunnel zu durchfahrenden Gesteinsformationen (Kalkformationen der Drusberg- und Axen-Decke) werden insgesamt als wenig problematisch erachtet, auch wenn vereinzelte Störungszonen möglich sind und die Kalke (Kieselkalk und Valanginien-Kalk) verkarstet sein können. Generell sind für alle kalkigen Einheiten auch Wasserzutritte aus offenen Klüften und gegebenenfalls entlang von Störungszonen möglich. Auch die mit der Rampe zu durchfahrenden Helvetischen Mergel werden als wenig problematisch beurteilt. Der Indikator 'Geotechnische und hydrogeologische Verhältnisse in überlagernden Gesteinsformationen' wird daher für den Lagerperimeter SMA-WLB insgesamt knapp mit *sehr günstig* bewertet.

Eine natürliche Gasführung im Wirtgestein mit Ausgasen über lange Zeit kann aufgrund von Hinweisen (Seelisbergtunnel) nicht ausgeschlossen werden; dies ergibt für den Indikator 'Natürliche Gasführung (im Wirtgestein)' für den Lagerperimeter SMA-WLB die Bewertung *bedingt günstig*.

Fazit: Das Kriterium 'Untertägige Erschliessung und Wasserhaltung' wird im Lagerperimeter SMA-WLB insgesamt als *günstig* beurteilt.

Gesamtbewertung der Kriteriengruppe 'Bautechnische Eignung' für den Lagerperimeter SMA-WLB: *günstig*.

Prüfung der Sensitivität der Bewertungen für den Lagerperimeter SMA-WLB

Zur Prüfung der Sensitivität der oben für den "massgebenden Fall" durchgeführten Bewertungen werden diese mit den Bewertungen der alternativen Lagerperimeter verglichen, vgl. die Darstellungen der abgegrenzten Lagerperimeter in Anhang B (inkl. tabellarische Kurzcharakterisierung) sowie die Bewertung der alternativen Lagerperimeter¹⁷⁸ in Anhang C.3.1.2. In Anhang C.3.1.2 findet sich auch eine Bewertung für eine Variante mit einer alternativen Interpretation der Qualität der tertiären Schiefer und deren Nutzung als Wirtgestein. Der Vergleich der Bewertungen ergibt folgendes Bild:

Wird das Szenarium einer glazialen Übertiefung um 200 m angenommen (Fall *SMA-WLB-mLere200*), so ergibt dies bezüglich Erosion nur noch eine *günstige* Bewertung bei sonst praktisch gleich bleibender Bewertung. Die Konzeptualisierung, wo nur die Palfris-Formation als Wirtgestein betrachtet wird (*SMA-WLB-aL1-r*), ergibt für das deutlich kleinere Platzangebot nur noch eine *bedingt günstige* Bewertung; dies kann aber durch Einschieben einer weiteren Lagerebene teilweise wieder kompensiert werden. Wenn die Anforderung an die Überdeckung gelockert wird (*SMA-WLB-aL2-r*), so ergibt dies eine etwas bessere Bewertung für das Platzangebot, aber nur noch eine *günstige* Bewertung bezüglich Dekompaktion.

Die Lagerperimeter sind alle eher von beschränkter Grösse. Insgesamt bietet das Standortgebiet Wellenberg Flexibilität bezüglich der Anzahl an Lagerebenen, aber nur eine beschränkte Flexibilität auf jeder der Lagerebenen.

¹⁷⁸ In Tab. 4.2-3 bzw. Tab. B-1 ist aufgeführt, welche von den abgegrenzten und in Anhang B dargestellten Lagerperimetern bewertet werden.

In Anhang C.3.1.2 findet sich auch eine Bewertung für eine Variante mit einer alternativen Interpretation der Qualität des Wirtgesteins, wo angenommen wird, dass der grösste Teil des massgebenden Transportpfads durch boudinierte Kalkbankabfolgen verläuft (*SMA-WLB-mLE-r-KBA*). Dies führt bei sonst gleich bleibender Bewertung zu einer *bedingt günstigen* Bewertung für den Indikator 'Länge der massgebenden Freisetzungspfade' und des Kriteriums 'Freisetzungspfade'.

Fazit: Die Bewertungen der alternativen Lagerperimeter und der alternativen Konzeptualisierung des Wirtgesteins führen für das Standortgebiet Wellenberg nicht zu einer signifikant anderen Gesamtbewertung. Die Flexibilität bei der untertägigen Anordnung der Lagerkammern ist insgesamt beschränkt.

4.4.3.8 Zusammenfassung der Bewertung der geologischen Standortgebiete für das SMA-Lager

Bewertung für den 'massgebenden Fall für die Einengung'

Die Lagerperimeter in den geologischen Standortgebieten für das SMA-Lager wurden in den vorhergehenden Kapiteln auf der Hierarchiestufe der Indikatoren, Kriterien und Kriteriengruppen qualitativ bewertet (massgebender Fall für die Einengung). Eine Zusammenfassung der Bewertungsergebnisse findet sich in Tab. 4.4-2; Fig. 4.4-9 zeigt die Häufigkeit der Bewertungsstufen für die Indikatoren, Kriterien und Kriteriengruppen für die Lagerperimeter in den verschiedenen Standortgebieten.

Die Lagerperimeter erreichen unter Berücksichtigung aller vier Kriteriengruppen in den Standortgebieten Zürich Nordost und Jura Ost die Bewertung *sehr geeignet* und in allen anderen Standortgebieten (Südranden, Nördlich Lägern, Jura-Südfuss und Wellenberg) die Bewertung *geeignet*; damit genügen alle Standortgebiete bezüglich Gesamtbewertung der 13 Kriterien des SGT den Anforderungen für die weitere Betrachtung in SGT Etappe 3.

Die Bewertung ergibt auf den Hierarchiestufen der Kriteriengruppen bzw. Kriterien folgendes Bild:

Für die **Kriteriengruppe 'Eigenschaften des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs'** werden die Lagerperimeter in fast allen Standortgebieten insgesamt mit *sehr günstig* bewertet. Einzig für die Lagerperimeter in den Standortgebieten Südranden und Wellenberg ergibt sich die Bewertung *günstig*. Diese Bewertung resultiert aus der nachfolgend kurz diskutierten Bewertung der zu dieser Kriteriengruppe gehörenden Kriterien. Die Bewertung des Kriteriums 'Räumliche Ausdehnung' fällt in den Lagerperimetern der Standortgebiete Zürich Nordost und Jura Ost *sehr günstig*, in den Lagerperimetern der Standortgebiete Südranden und Wellenberg *günstig* und im Lagerperimeter der Standortgebiete Nördlich Lägern und Jura-Südfuss *bedingt günstig* aus. Wegen der geringen hydraulischen Durchlässigkeit des Wirtgesteins und der genügenden Überdeckung werden die Lagerperimeter bezüglich des Kriteriums 'Hydraulische Barrierenwirkung' fast durchwegs als *sehr günstig* eingestuft. Eine Ausnahme bildet der Lagerperimeter des Standortgebiets Südranden, wo aufgrund der relativ geringen Tiefenlage die oberen Rahmengesteine wegen Dekompaktion nicht barriierenwirksam sind, was zur Bewertung *günstig* führt. Die Bewertung des Kriteriums 'Geochemische Bedingungen' fällt für die Lagerperimeter der Standortgebiete mit Opalinuston *sehr günstig* und für den Lagerperimeter des Standortgebiets Wellenberg mit den Mergel-Formationen des Helvetikums *günstig* aus. Das Kriterium 'Freisetzungspfade' wird für die Lagerperimeter mit Opalinuston (Standortgebiete Südranden, Zürich Nordost, Nördlich Lägern, Jura Ost und Jura-Südfuss) als *sehr günstig*, im Falle des Lagerperimeters mit Mergel-Formationen des Helvetikums (Standort-

gebiet Wellenberg) als *günstig* bewertet, weil dort von höher durchlässigen Diskontinuitäten und einer ungünstigeren Ausbildung des Porenraums (insbesondere bezüglich Klüftung und lokalisiertem Wasserfluss) auszugehen ist.

Die **Kriteriengruppe 'Langzeitstabilität'** führt in allen Standortgebieten insgesamt zur Bewertung *günstig*, mit Ausnahme der Lagerperimeter in den Standortgebieten Zürich Nordost und Jura-Südfuss, wo sich insgesamt eine *sehr günstige* Bewertung ergibt. Diese Bewertung resultiert aus der nachfolgend kurz diskutierten Bewertung der zu dieser Kriteriengruppe gehörenden Kriterien. Das Kriterium 'Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften' wird in den Lagerperimetern der Standortgebiete Südranden und Wellenberg als *günstig* bewertet und in den Lagerperimetern der anderen Standortgebiete als *sehr günstig*. Beim Kriterium 'Erosion' ergibt sich ein ähnliches Bild: Im Lagerperimeter des Standortgebiets Südranden fällt die Bewertung *günstig* aus, während in den Lagerperimeter der anderen Standortgebiete die Bewertung *sehr günstig* resultiert. Unter Berücksichtigung der entsprechenden technischen Massnahmen (insbesondere bezüglich der Gasbildung bzw. der Freisetzung von im Lager gebildetem Gas) wird das Kriterium 'Lagerbedingte Einflüsse' in allen Standortgebieten insgesamt als *günstig* beurteilt. Bezüglich des Kriteriums 'Nutzungskonflikte' sind die Lagerperimeter in den Standortgebieten Jura-Südfuss und Wellenberg *sehr günstig*, in den Lagerperimetern der anderen Standortgebiete *günstig* bewertet worden.

Für die **Kriteriengruppe 'Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen'** ergibt sich in den Lagerperimetern aller Standortgebiete insgesamt die Bewertung *sehr günstig*, mit Ausnahme des Lagerperimeters des Standortgebiets Wellenberg, welcher als *bedingt günstig* bewertet wird. Diese Bewertung resultiert aus der nachfolgend kurz diskutierten Bewertung der zu dieser Kriteriengruppe gehörenden Kriterien. Das Kriterium 'Charakterisierbarkeit der Gesteine' wird in den Standortgebieten mit Opalinuston als *sehr günstig* und für das Standortgebiet Wellenberg mit den Mergel-Formationen des Helvetikums als *günstig* beurteilt, was insbesondere auf die Variabilität der Gesteinseigenschaften in den Mergel-Formationen zurückzuführen ist. Beim Kriterium 'Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse' gibt es erhebliche Unterschiede zwischen den Standortgebieten: Die Bewertung fällt im Standortgebiet Wellenberg *ungünstig* aus und in den Lagerperimetern aller anderen Standortgebiete *sehr günstig*. Das Kriterium 'Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen' ergibt in den Lagerperimetern der Standortgebiete Südranden und Wellenberg die Bewertung *günstig* und in den Lagerperimetern der anderen Standortgebieten die Bewertung *sehr günstig*. Die Differenzierung ist primär bedingt durch Unterschiede in der Bewertung des Indikators 'Modellvorstellungen zur Langzeitentwicklung (Geodynamik und Neotektonik; weitere Prozesse)'.
'

Für die **Kriteriengruppe 'Bautechnische Eignung'** ergibt sich im Lagerperimeter des Standortgebiets Südranden die Bewertung *sehr günstig* und in den Lagerperimetern der anderen Standortgebiete die Bewertung *günstig*. Diese Bewertung resultiert aus der nachfolgend kurz diskutierten Bewertung der zu dieser Kriteriengruppe gehörenden Kriterien. Die felsmechanischen Eigenschaften erlauben bei Beschränkung der Tiefe der Lagerebene und unter Berücksichtigung der verschiedenen technischen Möglichkeiten für den Ausbruch und die Sicherung der Untertagebauten – teilweise unter Inkaufnahme eines erhöhten technischen Aufwands (Kosten, Zeitbedarf) – die zuverlässige Erstellung der untertägigen Bauten, ohne dass die Eigenschaften des Barrierensystems übermässig beeinträchtigt würden; deshalb werden die Lagerperimeter der Standortgebiete bezüglich des Kriteriums 'Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen' als *sehr günstig* (Südranden) bzw. *günstig* (Zürich Nordost, Jura Ost, Jura-Südfuss und Wellenberg) beurteilt. Eine Ausnahme bildet der Lagerperimeter des Standortgebiets Nördlich Lägern, wo die grosse Tiefenlage des Wirtgesteins zur Bewertung *bedingt günstig* führt. Beim Kriterium 'Untertägige Erschliessung und Wasserhaltung' fällt die Bewertung in den Lagerperimetern der Standortgebiete Jura-Südfuss und Wellenberg *günstig* und in den Lagerperimetern der anderen Standortgebiete *sehr günstig* aus.

Tab. 4.4-2: Zusammenfassende Darstellung der Bewertungsergebnisse für die Lagerperimeter in den geologischen Standortgebieten für das SMA-Lager (massgebender Fall für die Einengung).

Legende: Farben (abgestuft) bzw. Zahlen: rosa: ungünstig ($1 \leq x < 2$); gelb: bedingt günstig ($2 \leq x < 3$); hellgrün: günstig ($3 \leq x < 4$); dunkelgrün: sehr günstig ($4 \leq x \leq 5$).

Die Bewertung der Kriterien und Kriteriengruppen erfolgt durch Aggregation der 5-stufigen Bewertung der zugehörigen Indikatoren und Kriterien (vgl. Erläuterungen in Anhang C.1).

Nr.	Kriteriengruppe / Kriterium / Indikator	Bewertungsobjekt	SMA-SR	SMA-ZNO	SMA-NL	SMA-JO	SMA-JS	SMA-WLB
KG1	Eigenschaften des WG/EG		3.9	4.4	4.1	4.3	4.0	3.7
1.1	Räumliche Ausdehnung		3.3	4.3	2.9	4.1	2.9	3.8
5	Mächtigkeit	EG/LPmin	3.5	4.5	4.5	3.5	2.5	4.5
8	Platzangebot untertags	LP	3.1	4.1	1.3	4.7	3.3	3.1
1.2	Hydraulische Barrierenwirkung		3.7	4.5	4.6	4.2	4.2	4.1
9	Hydraulische Durchlässigkeit	WG-ss/LP	4.3	4.5	4.5	4.5	4.5	3.7
2	Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteins-Dekompaktion	EG/LPmin	2.7	4.5	4.7	4.1	4.1	4.1
10	Grundwasserstockwerke	EG/LP	4.1	4.5	4.5	4.1	4.1	4.5
1.3	Geochemische Bedingungen		4.3	4.3	4.3	4.3	4.3	3.6
11	Mineralogie	WG-ss/LP	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	3.5
12	pH	WG-ss/LP	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
13	Redox-Bedingungen	WG-ss/LP	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
14	Salinität	WG-ss/LP	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5
15	Mikrobielle Prozesse	WG-ss/LP	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	3.3
16	Kolloide	WG-ss/LP	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	2.5
1.4	Freisetzungspfade		4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	3.2
17	Art der Transportpfade und Ausbildung des Porenraums	WG-ss/LP	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	3.1
20	Transmissivität präferenzierter Freisetzungspfade	WG-ss/LP	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	3.1
22	Selbstabdichtungsvermögen	WG-ss/LP	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	2.5
18	Homogenität des Gesteinsaufbaus	WG/LP	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	2.7
19	Länge der massgebenden Freisetzungspfade	WG-ss/LP	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5

Tab. 4.4-2: (Fortsetzung)

Nr.	Kriteriengruppe / Kriterium / Indikator	Bewertungsobjekt	SMA-SR	SMA-ZNO	SMA-NL	SMA-JO	SMA-JS	SMA-WLB
KG2	Langzeitstabilität		3.6	4.0	3.9	3.9	4.0	3.7
2.1	Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften		3.7	4.2	4.2	4.2	4.0	3.3
23	Modellvorstellungen zur Langzeitentwicklung (Geodynamik und Neotektonik; weitere Prozesse)	EG/LP	2.9	4.5	4.3	4.3	3.7	2.9
24	Seismizität	EG/LP	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	2.7
27	Potenzial zur Bildung neuer Wasserwegsamkeiten (Verkarstung)	WG/LP	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.3
2.2	Erosion		3.4	4.5	4.6	4.5	4.4	4.0
28	Erosion im Betrachtungszeitraum	EG/LP	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	3.5
3	Tiefenlage unter lokaler Erosionsbasis im Hinblick auf die Bildung neuer Rinnen	EG/LPmin	3.1	4.5	4.7	4.5	4.5	4.1
4	Tiefenlage unter Fels im Hinblick auf glaziale Tiefenerosion	EG/LPmin	2.5	4.5	4.7	4.5	4.3	4.5
2.3	Lagerbedingte Einflüsse		3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.3
29	Auflockerungszone im Nahbereich der Untertagebauten	WG-ss/LP	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.1
30	Chemische Wechselwirkungen	WG-ss/LP	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	3.5
31	Verhalten des Wirtgesteins bzgl. Gas	WG-ss/LP	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	3.3
32	Verhalten des Wirtgesteins bzgl. Temperatur	WG-ss/LP						
2.4	Nutzungskonflikte		3.9	3.8	3.5	3.5	4.1	4.2
33	Rohstoffvorkommen innerhalb des Wirtgesteins	WG/LP	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
34	Rohstoffvorkommen unterhalb des Wirtgesteins	EG/LP	3.5	3.5	2.5	2.5	3.5	3.5
35	Rohstoffvorkommen oberhalb des Wirtgesteins	EG/LP	4.5	4.5	4.5	3.1	4.5	4.5
36	Mineral- und Thermalwassernutzungen	EG/LP	3.7	3.1	3.1	4.5	4.5	4.5
37	Geothermie und weitere energiebezogene Nutzungen des Untergrunds	EG/LP	3.3	3.3	2.7	2.7	3.3	4.1
KG3	Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen		4.1	4.4	4.3	4.4	4.2	2.9
3.1	Charakterisierbarkeit der Gesteine		4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	3.3
39	Variabilität der Gesteinseigenschaften im Hinblick auf ihre Charakterisierbarkeit	WG-ss/LP	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	2.5
40	Erfahrungen	WG/LP	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.1
3.2	Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse		4.1	4.1	4.1	4.3	4.0	1.8
43	Explorationsverhältnisse im geologischen Untergrund	WG/LP	4.1	4.3	4.3	4.3	4.1	1.5
44	Explorationsbedingungen an Oberfläche	LP	4.1	3.9	3.9	4.3	3.9	2.1
3.3	Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen		3.7	4.5	4.4	4.4	4.1	3.6
23	Modellvorstellungen zur Langzeitentwicklung (Geodynamik und Neotektonik; weitere Prozesse)	EG/LP	2.9	4.5	4.3	4.3	3.7	2.9
46	Unabhängige Evidenzen der Langzeitisolation	WG/LP	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.3

Tab. 4.4-2: (Fortsetzung)

Nr.	Kriteriengruppe / Kriterium / Indikator	Bewertungsobjekt	SMA-SR	SMA-ZNO	SMA-NL	SMA-JO	SMA-JS	SMA-WLB
KG4	Bautechnische Eignung		4.1	3.8	3.2	3.9	3.6	3.5
4.1	Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen		4.1	3.5	2.4	3.4	3.4	3.5
47	Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften	WG-ss/LP	3.5	3.5	3.3	3.3	3.3	4.3
1	Tiefenlage im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit (u.B. Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften)	WG-ss/LPmax	4.7	3.5	1.5	3.5	3.5	2.7
4.2	Untertägige Erschliessung und Wasserhaltung		4.0	4.0	4.0	4.4	3.7	3.4
48	Geotechnische und hydrogeologische Verhältnisse in überlagernden Gesteinsformationen	EG/LP	3.5	3.5	3.5	4.3	2.9	4.1
49	Natürliche Gasführung (im Wirtgestein)	WG/LP	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	2.7
KG1-4	Gesamtbewertung		3.9	4.1	3.9	4.1	3.9	3.4



Fig. 4.4-9: Zusammenfassende Darstellung der Bewertungsergebnisse für die Lagerperimeter in den geologischen Standortgebieten für das SMA-Lager (massgebender Fall für die Einengung).

Die Histogramme zeigen die Anzahl Bewertungen für die verschiedenen Bewertungsstufen.

Sensitivität der Bewertung bezüglich der alternativen Fälle und der Ungewissheiten in der Tiefenlage

Die Bewertungen zu den alternativen Lagerperimetern bzw. den alternativen Konzeptualisierungen zur Barrierenwirkung der Rahmengesteine sind in Anhang C.3.1.2 aufgeführt.

Die dort aufgeführten Bewertungen zeigen, dass für alle Standortgebiete die alternativen Lagerperimeter zu keiner grundsätzlich anderen Beurteilung als im "massgebenden Fall" führen. Die Standortgebiete **Zürich Nordost** und **Jura Ost** weisen selbst für alternative Annahmen bei der Abgrenzung der Lagerperimeter und unter Berücksichtigung der Ungewissheiten bezüglich der Tiefenlage ein günstiges bis sehr günstiges Platzangebot auf und bieten eine grosse Flexibilität bei der untertägigen Anordnung der Lagerkammern. Dies gilt – mit gewissen Einschränkungen wegen der zu erwartenden tektonischen Überprägung – auch für das Standortgebiet **Jura-Südfuss**, welches ein insgesamt günstiges Platzangebot und eine ausreichende Flexibilität aufweist. Im Falle des Standortgebiets **Südranden** kann das knappe Platzangebot nur verbessert werden, wenn die Anforderungen an die Erosion über das zulässige Mass hinaus gelockert werden. Nur bei Annahme eines tiefer liegenden Wirtgesteins (Berücksichtigung der Ungewissheiten in der Tiefenlage) ergibt sich bezüglich Erosion eine leicht vorteilhaftere Situation, ohne dass sich jedoch die Gesamtbewertung signifikant ändert. Insgesamt bietet das Standortgebiet Südranden nur eine sehr beschränkte Flexibilität bei der untertägigen Anordnung der Lagerkammern. Im Standortgebiet **Wellenberg** bleibt das Platzangebot selbst bei mehrstöckiger Anordnung in allen betrachteten Fällen knapp bemessen und die Flexibilität bei der untertägigen Anordnung der Lagerkammern ist beschränkt. Eine Sonderstellung nimmt das Standortgebiet **Nördlich Lägern** ein: Hier kann auch bei Verwendung von alternativen Optimierungsanforderungen die angestrebte maximale Tiefe der Lagerebene von ca. 600 m u.T. nicht erreicht werden bzw. bleibt das Platzangebot in bevorzugter Tiefenlage ungenügend. Selbst unter der Annahme eines weniger tief liegenden Wirtgesteins (Berücksichtigung der Ungewissheiten in der Tiefenlage) kann die angestrebte maximale Tiefe nicht erreicht werden. Insgesamt bietet das Standortgebiet Nördlich Lägern keine Möglichkeiten, die Lagerkammern in einer Tiefe anzuordnen, die den angestrebten Wert von 600 m u.T. nicht deutlich übersteigt.

Die alternativen konzeptuellen Annahmen zur Barrierenwirkung der oberen Rahmengesteine des Opalinustons betreffen nur die Standortgebiete Nördlich Lägern, Jura Ost und Jura-Südfuss. In den Standortgebieten Zürich Nordost und Südranden gibt es bezüglich der Barrierenwirkung der Rahmengesteine keine wesentlichen Ungewissheiten, während die Mergel-Formationen im Standortgebiet Wellenberg gar keine Rahmengesteine mit nennenswerten Beiträgen zur Barrierenwirkung aufweisen. Die alternativen konzeptuellen Annahmen führen für das Standortgebiet **Nördlich Lägern** für den Indikator 'Mächtigkeit' zu einer etwas tieferen Bewertung und für die Standortgebiete **Jura Ost** und **Jura-Südfuss** zu einer höheren Bewertung. Dies führt aber für diese Standortgebiete nicht zu einer signifikanten Änderung in der Gesamtbewertung. Die alternative Konzeptualisierung des Wirtgesteins führt für das Standortgebiet **Wellenberg** zu einer tieferen Bewertung des Indikators 'Länge der massgebenden Freisetzungspfade', ohne jedoch die Gesamtbewertung signifikant zu beeinflussen.

Fazit

Auch unter Berücksichtigung der alternativen Konzeptualisierungen erreichen alle Standortgebiete für das SMA-Lager mindestens die Bewertung *geeignet*. Es qualifizieren sich also alle SMA-Standortgebiete für den nächsten Bewertungsschritt – die Bewertung anhand der entscheidungsrelevanten Merkmale, die Identifikation von eindeutigen Nachteilen und der sicherheitstechnische Vergleich – in Kap. 5.

4.4.4 Charakterisierung und Bewertung der geologischen Standortgebiete für das HAA-Lager

4.4.4.1 Einleitung

Nachdem die Unterlagen zur geologisch-tektonischen Situation und zu den Nutzungskonflikten im Untergrund dargestellt und die Bewertung der Lagerperimeter diesbezüglich für das SMA- und HAA-Lager gemeinsam vorgenommen wurde (Kap. 4.4.2), werden nachfolgend für das HAA-Lager die einzelnen Lagerperimeter behandelt¹⁷⁹ (Kap. 4.4.4.2 bis Kap. 4.4.4.4). Am Schluss folgt eine zusammenfassende Darstellung der Bewertungen für das HAA-Lager (Kap. 4.4.4.5).

4.4.4.2 HAA-Lagerperimeter Zürich Nordost (HAA-ZNO)

Hauptmerkmale

Im Lagerperimeter HAA-ZNO weist der Opalinuston eine Mächtigkeit von ca. 110 m auf und liefert den Hauptbeitrag zur Barrierenwirkung des Gesamtsystems. Die Rahmengesteine unterhalb und oberhalb des Opalinustons (Toniger Lias bzw. Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger' und Effinger Schichten) steuern zusätzlich signifikante Beiträge zur Barrierenwirkung bei.

Der Lagerperimeter HAA-ZNO liegt im Tafeljura s.str. und wird geographisch durch den Rhein (im Westen und Nordwesten) und geologisch durch die Neuhausen-Störung (im Nordosten) sowie durch die maximale Tiefenlage bzw. die 'zu meidende tektonische Zone' (im Süden) begrenzt; der Lagerperimeter weist eine grosse laterale Ausdehnung auf und ist sehr ruhig gelagert. Es existieren detaillierte Kenntnisse über den geologischen Untergrund des Lagerperimeters, die für das Projekt 'Entsorgungsnachweis' für HAA mit einer 3D-Seismikkampagne und der Bohrung Benken erworben wurden.

A) Eigenschaften des Opalinustons mit seinen Rahmengesteinen im Lagerperimeter HAA-ZNO unter Berücksichtigung seiner Konfiguration

Räumliche Ausdehnung (Kriterium 1.1)

Im Lagerperimeter HAA-ZNO liegt der Top Opalinuston im Tiefenbereich von ca. 500 – 650 m u.T.; die für die Bewertung massgebende minimale Überdeckung beträgt ca. 500 m, sodass die gesamten oberen Rahmengesteine (rund 105 m mächtig) als Barriere wirksam sind. Damit wird der Indikator 'Mächtigkeit' im Lagerperimeter HAA-ZNO als *sehr günstig* beurteilt. Auch unter Berücksichtigung der Resultate der Dosisberechnungen zur Barrierenwirkung bleibt die Bewertung für den Indikator 'Mächtigkeit' sehr günstig.

Die laterale Ausdehnung des Lagerperimeters beträgt 7.3 km². Der Lagerperimeter liegt im Tafeljura und in der 3D-Seismik sind nur beschränkte Anzeichen einer tektonischen Beanspruchung sichtbar, sodass nur wenig Platzreserven einzuplanen sind. Der Lagerperimeter

¹⁷⁹ Die Bewertungen werden für den "massgebenden Fall" durchgeführt. Am Schluss der Bewertung für jeden Lagerperimeter folgen Betrachtungen zur Sensitivität bzgl. alternativer Lagerperimeter bzw. bzgl. alternativer Konzeptualisierungen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs.

HAA-ZNO bietet mit einer Fläche von 7.3 km² genügend grosse Platzreserven, um den Platzbedarf des umhüllenden Abfallinventars einzulagern; nur schon bei einer leichten Lockerung der Anforderungen nimmt das Platzangebot deutlich zu. Deshalb wird der Indikator 'Platzangebot untertags' für den Lagerperimeter HAA-ZNO als *günstig* eingestuft.

Fazit: Das Kriterium 'Räumliche Ausdehnung' wird im Lagerperimeter HAA-ZNO insgesamt als *günstig* beurteilt.

Hydraulische Barrierenwirkung (Kriterium 1.2)

Die Tiefenlage der Obergrenze des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs wird bezüglich des Indikators 'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteins-Dekompaktion' für den Lagerperimeter HAA-ZNO als *sehr günstig* eingestuft, denn die minimale Überdeckung der Obergrenze des Opalinustons beträgt ca. 500 m, sodass die gesamten oberen Rahmengesteine (Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger' und Effinger Schichten; rund 105 m mächtig) als Barriere wirksam sind. Weiter kommt auch die hydraulische Barrierenwirkung des Opalinustons (massgebend für Bewertung des Indikators 'Hydraulische Durchlässigkeit') voll zur Entfaltung. Zusätzlich tragen auch die unteren Rahmengesteine (Toniger Lias) zur Barrierenwirkung bei. Im Lagerperimeter HAA-ZNO wurde in der Bohrung Benken ein ausgeprägter Grundwasserstockwerkbau nachgewiesen; dies ergibt für den Indikator 'Grundwasserstockwerke' die Bewertung *sehr günstig*.

Fazit: Zusammen mit der wirtgesteinsspezifisch vorgenommenen *sehr günstigen* Beurteilung des Opalinustons bezüglich des Indikators 'Hydraulische Durchlässigkeit' (vgl. Kap. 3.3) fällt die Bewertung des Kriteriums 'Hydraulische Barrierenwirkung' für den Lagerperimeter HAA-ZNO insgesamt *sehr günstig* aus.

Geochemische Bedingungen (Kriterium 1.3)

Das Kriterium 'Geochemische Bedingungen' wird wirtgesteinsspezifisch beurteilt (vgl. Kap. 3.3); die Bewertung für den Lagerperimeter HAA-ZNO fällt insgesamt *sehr günstig* aus.

Freisetzungspfade (Kriterium 1.4)

Alle Indikatoren des Kriteriums 'Freisetzungspfade' werden wirtgesteinsspezifisch beurteilt, auch der Indikator 'Länge der massgebenden Freisetzungspfade' (vgl. Kap. 3.3). Die Bewertung des Kriteriums 'Freisetzungspfade' für den Lagerperimeter HAA-ZNO fällt insgesamt *sehr günstig* aus.

Gesamtbewertung der Kriteriengruppe 'Eigenschaften des Wirtgesteins / einschlusswirksamen Gebirgsbereichs' für den Opalinuston mit seinen Rahmengesteinen im Lagerperimeter HAA-ZNO: *sehr günstig*.

B) Langzeitstabilität im Lagerperimeter HAA-ZNO

Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften (Kriterium 2.1)

Die Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften wird im Lagerperimeter HAA-ZNO einerseits aus Sicht der geologisch-tektonischen Situation beurteilt (vgl. Kap. 4.4.2). Andererseits wird der Indikator 'Potenzial zur Bildung neuer Wasserwegsamkeiten (Verkarstung)' wirtgesteinsspezifisch beurteilt (vgl. Kap. 3.3); im Falle des Opalinustons erübrigt sich eine

diesbezügliche Beurteilung der Konfiguration, weil eine Verkarstung im Opalinuston ausgeschlossen werden kann; es ergibt sich für diesen Indikator eine *sehr günstige* Bewertung. In Ergänzung zu Kap. 4.4.2 wird beim Indikator 'Modellvorstellungen zur Langzeitentwicklung (Geodynamik und Neotektonik; weitere Prozesse)' auch die Möglichkeit der Bildung einer Durchbruchsrinne berücksichtigt. Im Lagerperimeter könnte sich innerhalb des Betrachtungszeitraums für ein HAA-Lager von 1 Million Jahren eine Durchbruchsrinne bilden, diese kann jedoch das Lager wegen der grossen Tiefenlage voraussichtlich nicht beeinträchtigen. Dieser Indikator wird deshalb insgesamt als *sehr günstig* bewertet. Die Bewertung des Kriteriums 'Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften' fällt für den Lagerperimeter HAA-ZNO insgesamt *sehr günstig* aus.

Erosion (Kriterium 2.2)

Innerhalb des für ein HAA-Lager relevanten Betrachtungszeitraums von 1 Million Jahren und für die erwarteten grossräumigen Hebungsraten (vgl. Kap. 4.4.2) wird die zukünftige Erosion in der Nordschweiz im Bereich von ca. 125 – 200 m liegen. Im Lagerperimeter HAA-ZNO liegt die Obergrenze des Opalinustons in einem Tiefenbereich von ca. 450 – 570 m unter der Erosionsbasis. Die massgebende minimale Tiefe des Opalinustons unter Erosionsbasis beträgt ca. 450 m. Selbst eine extreme Übertiefung um 200 m am Ende des Betrachtungszeitraums unter eine bereits um 200 m eingetiefte Erosionsbasis erreicht die Oberkante des Wirtgesteins knapp nicht. Aus diesen Gründen wird der Indikator 'Tiefenlage unter lokaler Erosionsbasis im Hinblick auf die Bildung neuer Rinnen' im Lagerperimeter HAA-ZNO insgesamt knapp als *sehr günstig* beurteilt.

Südlich des Lagerperimeters HAA-ZNO befindet sich das glazial übertiefte Thurtal mit einer nach Norden abzweigenden Felsrinne. Im Lagerperimeter liegt der Top Opalinuston mindestens ca. 430 m unter der Felsoberfläche. Der Indikator 'Tiefenlage unter Fels im Hinblick auf glaziale Tiefenerosion' wird für den Lagerperimeter HAA-ZNO bei einem Betrachtungszeitraum von 1 Million Jahren insgesamt als *günstig* beurteilt.

Fazit: Zusammen mit der *sehr günstigen* Beurteilung des Indikators 'Erosion im Betrachtungszeitraum' in der Nordschweiz (vgl. Kap. 4.4.2) fällt die Bewertung des Kriteriums 'Erosion' im Lagerperimeter HAA-ZNO insgesamt knapp *sehr günstig* aus.

Lagerbedingte Einflüsse (Kriterium 2.3)

Das Kriterium 'Lagerbedingte Einflüsse' wird wirtgesteinsspezifisch beurteilt (vgl. Kap. 3.3); die Bewertung für den Lagerperimeter HAA-ZNO fällt insgesamt *günstig* aus.

Nutzungskonflikte (Kriterium 2.4)

Die möglichen Nutzungskonflikte wurden in Kap. 4.4.2 behandelt. Unter Berücksichtigung der dort aufgeführten Unterlagen werden der Indikator 'Rohstoffvorkommen unterhalb des Wirtgesteins' für den Lagerperimeter HAA-ZNO insgesamt als *sehr günstig* und auch der Indikator 'Rohstoffvorkommen oberhalb des Wirtgesteins' als *sehr günstig* beurteilt.

Im Lagerperimeter HAA-ZNO sind keine bedeutenden Mineral- und Thermalwassernutzungen vorhanden. Die Thermalwasserbohrung Lottstetten-Nack liegt ca. 1 km westlich des geologischen Standortgebiets. Das Thermalwasser aus dem Malm-Aquifer fliesst artesisch in einen öffentlich zugänglichen Brunnen aus. Eine direkte qualitative Beeinflussung durch den Bau der Zugangsbauwerke ist nicht zu erwarten. In gespannten Grundwasserleitern können Druck-

spiegelabsenkungen jedoch bedeutende Reichweiten haben. Bei Bauwerken ohne Möglichkeiten für eine gravitative Wasserentsorgung ist es generell das Ziel, den Wasserzufluss durch eine optimierte Linienführung und Abdichtungsmassnahmen (Grouting) so gering wie möglich zu halten. Dadurch ist auch ein maximaler Schutz des artesisch gespannten Thermalwasservorkommens gewährleistet. Da in grösseren Tiefen keine vollständige Abdichtung der Bauwerke möglich ist, kann eine quantitative Beeinflussung des Thermalwasserbrunnens Lottstetten-Nack nicht ausgeschlossen werden. Die heute nicht mehr genutzten sogenannten Mineralquellen von Eglisau befinden sich rund 6 km vom Südwestrand des geologischen Standortgebiets. Das Mineralwasser wurde mittels Bohrungen aus durchlässigen Abschnitten der USM gefördert. Aus diversen Überlegungen ist eine qualitative Beeinflussung auszuschliessen. In Schlattingen wurden zwei Bohrungen in den Muschelkalk-Aquifer abgeteuft, um Gewächshäuser mit dem Thermalwasser zu beheizen. Eine Beeinflussung wird hier ausgeschlossen. Insgesamt wird der Indikator 'Mineral- und Thermalwassernutzungen' knapp als *günstig* beurteilt.

Die Unterlagen zur Geothermie und zu weiteren energiebezogenen Nutzungen des Untergrunds finden sich in Kap. 4.4.2; dort wurden auch die Lagerperimeter beurteilt. Basierend auf den dort aufgeführten Aussagen ergibt sich für den Indikator 'Geothermie und weitere energiebezogene Nutzungen des Untergrunds' für den Lagerperimeter HAA-ZNO die Beurteilung *günstig*.

Fazit: Zusammen mit der *sehr günstigen* Beurteilung des nicht als nutzungswürdig eingestuften Rohstoffvorkommens innerhalb des Opalinustons (vgl. Kap. 3.3) fällt die Bewertung des Kriteriums 'Nutzungskonflikte' im Lagerperimeter HAA-ZNO insgesamt knapp *sehr günstig* aus.

Gesamtbewertung der Kriteriengruppe 'Langzeitstabilität' für den Lagerperimeter HAA-ZNO: *günstig*.

C) Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen im Lagerperimeter HAA-ZNO

Charakterisierbarkeit der Gesteine (Kriterium 3.1)

Das Kriterium 'Charakterisierbarkeit der Gesteine' wird wirtgesteinsspezifisch beurteilt (vgl. Kap. 3.3); die Bewertung für den Lagerperimeter HAA-ZNO fällt insgesamt *sehr günstig* aus.

Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse (Kriterium 3.2)

Die Explorationsverhältnisse im geologischen Untergrund des Wirtgesteins Opalinuston sind generell *sehr günstig* (vgl. Kap. 3.3). Im Bereich des Lagerperimeters HAA-ZNO ist das seismische Abbild gut bis sehr gut. Der Indikator 'Explorationsverhältnisse im geologischen Untergrund' des Lagerperimeters HAA-ZNO wird deshalb als *sehr günstig* beurteilt.

Aufgrund der Erfahrungen aus der 3D-Seismik-Kampagne und der Bohrung Benken für das Projekt 'Entsorgungsnachweis' wird der Indikator 'Explorationsbedingungen an Oberfläche' im Lagerperimeter HAA-ZNO knapp als *sehr günstig* eingestuft.

Fazit: Insgesamt wird das Kriterium 'Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse' im Lagerperimeter HAA-ZNO insgesamt als *sehr günstig* beurteilt.

Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen (Kriterium 3.3)

Das Kriterium 'Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen' wird einerseits bezüglich der geologisch-tektonischen Situation (vgl. Kap. 4.4.2) und andererseits wirtgesteinspezifisch beurteilt (vgl. Kap. 3.3). In Ergänzung zu Kap. 4.4.2 wird beim Indikator 'Modellvorstellungen zur Langzeitentwicklung (Geodynamik und Neotektonik; weitere Prozesse)' auch die Möglichkeit der Bildung einer Durchbruchsrinne berücksichtigt. Im Lagerperimeter könnte sich innerhalb des Betrachtungszeitraums für ein HAA-Lager von 1 Million Jahren eine Durchbruchsrinne bilden, diese kann jedoch das Lager wegen der grossen Tiefenlage voraussichtlich nicht beeinträchtigen. Dieser Indikator wird deshalb insgesamt als *sehr günstig* bewertet. Zusammen mit der *sehr günstigen* Bewertung des Indikators 'Unabhängige Evidenzen der Langzeitisolation' (Kap. 3.3) fällt die Bewertung des Kriteriums 'Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen' für den Lagerperimeter HAA-ZNO insgesamt *sehr günstig* aus.

Gesamtbewertung der Kriteriengruppe 'Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen' für den Lagerperimeter HAA-ZNO: *sehr günstig*.

D) Bautechnische Eignung des Lagerperimeters HAA-ZNO

Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen (Kriterium 4.1)

Im Lagerperimeter HAA-ZNO liegt die Lagerebene (Annahme: Lagerebene in der Mitte des Opalinuston) in einer günstigen Tiefenlage von ca. 550 – 700 m u.T.; die für die Bewertung massgebende maximale Tiefe der Lagerebene beträgt ca. 700 m u.T. Dies ergibt für den Indikator 'Tiefenlage im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit (u.B. Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften)' für den Lagerperimeter HAA-ZNO die Bewertung *günstig*.

Fazit: Zusammen mit dem für den Opalinuston als *günstig* eingestuften Indikator 'Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften' wird das Kriterium 'Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen' im Lagerperimeter HAA-ZNO für die betrachteten Tiefenlagen insgesamt als *günstig* beurteilt.

Untertägige Erschliessung und Wasserhaltung (Kriterium 4.2)

Der Zugang nach Untertag vom Standortareal ZNO-6b zum untertägigen Lagerperimeter kann über eine Rampe oder über einen Schacht erfolgen. Im Fall der Verwendung einer Rampe müssen zuerst die quartären Ablagerungen durchörtert werden, die allerdings nur seicht sind; dann folgt das mächtige Schichtpaket der Unteren Süsswassermolasse (USM). Die restlichen Gesteinsformationen (Malmkalke, Effinger Schichten, Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger' und Opalinuston) werden aus bautechnischer und hydrogeologischer Sicht u.a. aufgrund der geringen Tektonisierung als mehrheitlich unproblematisch erachtet. In den Malmkalken muss zumindest lokal mit einer Verkarstung gerechnet werden; es wird allerdings durchwegs eozäner Paläokarst erwartet, dessen Hohlräume weitgehend verfüllt sein dürften. Es wird zwar keine erhöhte Wasserführung erwartet, sie kann aber auch nicht vollständig ausgeschlossen werden. Vor allem in den kalkigen bzw. spröderen Einheiten sind auch Wasserzutritte aus offenen Klüften und gegebenenfalls entlang von Störungszonen nicht vollständig auszuschliessen. Auch die erforderlichen Schachtbauwerke (Lüftungs- bzw. Betriebsschacht und der Förderschacht, falls keine Rampe verwendet wird) durchqueren die gleichen Gesteinsformationen. Der Indikator 'Geotechnische und hydrogeologische Verhältnisse in überlagernden Gesteinsformationen' wird für den Lagerperimeter HAA-ZNO unter Berücksichtigung der möglichen technischen Mass-

nahmen insgesamt als *günstig* beurteilt. Weiter ist zu beachten, dass der Lagerperimeter HAA-ZNO die Flexibilität bietet, für den Zugang nach Untertag vom Standortareal ZNO-6b aus sowohl Schacht als auch Rampe verwenden zu können.

Eine natürliche Gasführung im Opalinuston kann praktisch ausgeschlossen werden, dies führt für den Indikator 'Natürliche Gasführung (im Wirtgestein)' für den Lagerperimeter HAA-ZNO zur Beurteilung *sehr günstig*.

Fazit: Das Kriterium 'Untertägige Erschliessung und Wasserhaltung' im Lagerperimeter HAA-ZNO wird insgesamt knapp als *sehr günstig* beurteilt.

Gesamtbewertung der Kriteriengruppe 'Bautechnische Eignung' für den Lagerperimeter HAA-ZNO: *günstig*.

Prüfung der Sensitivität der Bewertungen für den Lagerperimeter HAA-ZNO

Zur Prüfung der Sensitivität der oben für den "massgebenden Fall" durchgeführten Bewertungen werden diese mit den Bewertungen der alternativen Lagerperimeter verglichen, vgl. die Darstellungen der abgegrenzten Lagerperimeter in Anhang B (inkl. tabellarische Kurzcharakterisierung) sowie die Bewertung der "bewertbaren" Lagerperimeter¹⁸⁰ in Anhang C.3.1.2. Der Vergleich der Bewertungen ergibt folgendes Bild:

Die bei der alternativen Abgrenzung der Lagerperimeter vorgenommenen Änderungen an den Optimierungsanforderungen (Fall *HAA-ZNO-aL1-r*) führen zu einer kleinen Verbesserung beim Platzangebot, die weiteren Bewertungen und die Gesamtbewertung ändern ebenfalls nur wenig bzw. nicht merkbar. Dabei zeigt sich, dass der für die Bewertung oben angenommene "massgebende Fall" eine ausgewogene Variante darstellt. Auch die alternativen Lagerperimeter mit anderer Tiefenlage des Wirtgesteins (Berücksichtigung der Ungewissheiten in der Tiefenlage, Fälle *HAA-ZNO-mLE-t* und *HAA-ZNO-aL2-u*) ergeben kein grundsätzlich anderes Bild. Die detaillierten Bewertungen sind in Anhang C.3.1.2 zu finden. Insgesamt bietet das Standortgebiet Zürich Nordost eine grosse Flexibilität zur untertägigen Anordnung des Lagers.

Fazit: Die Bewertungen der alternativen Lagerperimeter für das Standortgebiet Zürich Nordost führen nicht zu einer signifikant anderen Gesamtbewertung. Die Flexibilität bei der untertägigen Anordnung des Lagers ist insgesamt gross.

4.4.4.3 HAA-Lagerperimeter Nördlich Lägern (HAA-NL)

Hauptmerkmale

Im Lagerperimeter HAA-NL weist der Opalinuston eine Mächtigkeit von ca. 110 m auf und liefert den Hauptbeitrag zur Barrierenwirkung des Gesamtsystems. Die Rahmengesteine unterhalb und oberhalb des Opalinustons (Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger' und Effinger Schichten bzw. Toniger Lias) steuern zusätzliche signifikante Beiträge zur Barrierenwirkung bei. Es kann jedoch nicht ausgeschlossen werden, dass die oberen Rahmengesteine zumindest in einem Teil des Lagerperimeters von schlechterer Qualität sind und deshalb deutlich weniger zur Barrierenwirkung des Gesamtsystems beisteuern.

¹⁸⁰ In Tab. 4.2-3 bzw. Tab. B-1 ist aufgeführt, welche von den abgegrenzten und in Anhang B dargestellten Lagerperimetern bewertet werden.

Der Lagerperimeter HAA-NL liegt in der Vorfaltenzone und wird geographisch durch die 'zu meidende tektonische Zone' (im Norden) und durch die Tiefenlage des Wirtgesteins (im Westen, Süden und Osten) begrenzt. Der Lagerperimeter ist weniger ruhig gelagert als der Lagerperimeter HAA-ZNO. Er ist durch die für Etappe 2 durchgeführte 2D-Seismik, einige ältere Seismiklinien und durch die Bohrung Weiach gut dokumentiert.

A) **Eigenschaften des Opalinustons mit seinen Rahmengesteinen im Lagerperimeter HAA-NL unter Berücksichtigung seiner Konfiguration**

Räumliche Ausdehnung (Kriterium 1.1)

Im Lagerperimeter HAA-NL liegt der Top Opalinuston im Tiefenbereich von ca. 590 – 750 m u.T.; die für die Bewertung minimale massgebende Überdeckung beträgt ca. 590 m, sodass die gesamten oberen Rahmengesteine (rund 160 m mächtig) als Barriere wirksam sind. Damit wird der Indikator 'Mächtigkeit' im Lagerperimeter HAA-NL als *sehr günstig* beurteilt. Auch unter Berücksichtigung der Resultate der Dosisberechnungen zur Barrierenwirkung bleibt die Bewertung für den Indikator 'Mächtigkeit' sehr günstig.

Es gibt jedoch Hinweise, dass die oberen Rahmengesteine von schlechterer Qualität sein könnten (mächtigeres wasserführendes Sissach-Member im westlichen Teil des Standortgebiets (vgl. Nagra 2014b, Dossier II, Anhang 2), ungünstige Eigenschaften der anhand der Seismik vermuteten "Schwellenzone" im östlichen Teil des Standortgebiets (vgl. Nagra 2014b, Dossier II))¹⁸¹.

Die laterale Ausdehnung des Lagerperimeters beträgt 4.2 km². Der Lagerperimeter liegt in der Vorfaltenzone und es sind Anzeichen für eine erhöhte Anzahl von Strukturen vorhanden, sodass erhebliche Platzreserven einzuplanen sind. Das Platzangebot ist in einem Tiefenbereich bis zu 800 m u.T. mit einer Fläche von 4.2 km² sehr beschränkt und die Teilfläche im bevorzugten Tiefenbereich von weniger als 700 m u.T. sehr klein, sodass die Bewertung des Indikators 'Platzangebot untertags' für den Lagerperimeter HAA-NL *ungünstig* ausfällt.

Fazit: Das Kriterium 'Räumliche Ausdehnung' wird im Lagerperimeter HAA-NL insgesamt als *bedingt günstig* beurteilt, auch wenn das Platzangebot ungünstig bewertet wird und durch die tektonische Überprägung erhebliche Reserven beim Platzangebot vorzusehen sind.

Hydraulische Barrierenwirkung (Kriterium 1.2)

Die Tiefenlage der Obergrenze des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs wird bezüglich des Indikators 'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteins-Dekompaktion' für den Lagerperimeter HAA-NL als *sehr günstig* eingestuft, denn die minimale Überdeckung der Obergrenze des Opalinustons beträgt ca. 590 m, sodass die gesamten oberen Rahmengesteine (Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger' und Effinger Schichten, rund 160 m mächtig) als Barriere wirksam sind, auch wenn diese in ihrer Qualität in einem Teil des Lagerperimeters beschränkt sein können. Zusätzlich kommt auch die hydraulische Barrierenwirkung des Opalinustons

¹⁸¹ Die Konzeptualisierung mit einer ungünstigeren Barrierenwirkung der oberen Rahmengesteine wird in einem alternativen Fall (*HAA-NL-mLE-r-ORG*) bewertet. Wegen des in der alternativen Konzeptualisierung angenommenen vernachlässigbaren Beitrags der oberen Rahmengesteine (Wirkung des mächtigeren kalkigen Sissach-Members bzw. der "Schwellenzone" direkt im Hangenden des Opalinustons) führt dies für den alternativen Fall auch unter Berücksichtigung der Resultate der Dosisberechnungen nur noch zu einer *günstigen* Bewertung für den Indikator 'Mächtigkeit'.

(massgebend für Bewertung des Indikators 'Hydraulische Durchlässigkeit') voll zur Entfaltung. Weiter tragen auch die unteren Rahmengesteine (Toniger Lias) zur Barrierenwirkung bei. Im Lagerperimeter HAA-NL wurde in der Bohrung Weiach ein ausgeprägter Grundwasserstockwerkbau nachgewiesen; dies ergibt für den Indikator 'Grundwasserstockwerke' die Bewertung *sehr günstig*.

Fazit: Zusammen mit der wirtgesteinsspezifisch vorgenommenen *sehr günstigen* Beurteilung des Opalinustons bezüglich des Indikators 'Hydraulische Durchlässigkeit' (vgl. Kap. 3.3) fällt die Bewertung des Kriteriums 'Hydraulische Barrierenwirkung' für den Lagerperimeter HAA-NL insgesamt *sehr günstig* aus.

Geochemische Bedingungen (Kriterium 1.3)

Das Kriterium 'Geochemische Bedingungen' wird wirtgesteinsspezifisch beurteilt (vgl. Kap. 3.3); die Bewertung für den Lagerperimeter HAA-NL fällt insgesamt *sehr günstig* aus.

Freisetzungspfade (Kriterium 1.4)

Alle Indikatoren des Kriteriums 'Freisetzungspfade' werden wirtgesteinsspezifisch beurteilt, auch der Indikator 'Länge der massgebenden Freisetzungspfade' (vgl. Kap. 3.3). Die Bewertung des Kriteriums 'Freisetzungspfade' für den Lagerperimeter HAA-NL fällt insgesamt *sehr günstig* aus.

Gesamtbewertung der Kriteriengruppe 'Eigenschaften des Wirtgesteins / einschlusswirksamen Gebirgsbereichs' für den Opalinuston mit seinen Rahmengesteinen im Lagerperimeter HAA-NL: knapp *sehr günstig*.

B) Langzeitstabilität im Lagerperimeter HAA-NL

Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften (Kriterium 2.1)

Die Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften im Lagerperimeter HAA-NL wird einerseits aus Sicht der geologisch-tektonischen Situation beurteilt (vgl. Kap. 4.4.2). Andererseits wird der Indikator 'Potenzial zur Bildung neuer Wasserwegsamkeiten (Verkarstung)' wirtgesteinsspezifisch beurteilt (vgl. Kap. 3.3); im Falle des Opalinustons erübrigt sich eine diesbezügliche Beurteilung der Konfiguration, weil eine Verkarstung im Opalinuston ausgeschlossen werden kann; es ergibt sich für diesen Indikator eine *sehr günstige* Bewertung. In Ergänzung zu Kap. 4.4.2 wird beim Indikator 'Modellvorstellungen zur Langzeitentwicklung (Geodynamik und Neotektonik; weitere Prozesse)' auch die Möglichkeit der Bildung einer Durchbruchsrinne berücksichtigt. Im Lagerperimeter könnte sich zwar innerhalb des Betrachtungszeitraums für ein HAA-Lager von 1 Million Jahren eine Durchbruchsrinne bilden, diese kann jedoch das Lager wegen der grossen Tiefenlage voraussichtlich nicht beeinträchtigen. Dieser Indikator wird insgesamt als *günstig* bewertet. Die Bewertung des Kriteriums 'Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften' fällt für den Lagerperimeter HAA-NL insgesamt *günstig* aus.

Erosion (Kriterium 2.2)

Innerhalb des für ein HAA-Lager relevanten Betrachtungszeitraums von 1 Million Jahren und für die erwarteten grossräumigen Hebungsraten (vgl. Kap. 4.4.2) wird die zukünftige Erosion in der Nordschweiz im Bereich von ca. 125 – 200 m liegen. Im Lagerperimeter HAA-NL liegt die Obergrenze des Opalinustons in einem Tiefenbereich von ca. 530 – 700 m unter der Erosionsbasis. Die massgebende minimale Tiefe des Opalinustons unter Erosionsbasis beträgt ca. 530 m. Selbst eine glaziale Übertiefung um 200 m am Ende des Betrachtungszeitraums unter eine bereits um 200 m eingetiefte Erosionsbasis erreicht die Oberkante des Wirtgesteins nicht. Aus diesen Gründen wird der Indikator 'Tiefenlage unter lokaler Erosionsbasis im Hinblick auf die Bildung neuer Rinnen' im Lagerperimeter HAA-NL insgesamt als *sehr günstig* beurteilt.

Der Lagerperimeter HAA-NL liegt nicht im Bereich von übertiefen Felsrinnen und der Top Opalinuston mindestens ca. 570 m unter der Felsoberfläche. Der Indikator 'Tiefenlage unter Fels im Hinblick auf glaziale Tiefenerosion' wird für den Lagerperimeter HAA-NL bei einem Betrachtungszeitraum von 1 Million Jahren insgesamt als *sehr günstig* beurteilt.

Fazit: Zusammen mit der *sehr günstigen* Beurteilung des Indikators 'Erosion im Betrachtungszeitraum' in der Nordschweiz (vgl. Kap. 4.4.2) fällt die Bewertung des Kriteriums 'Erosion' im Lagerperimeter HAA-NL insgesamt *sehr günstig* aus.

Lagerbedingte Einflüsse (Kriterium 2.3)

Das Kriterium 'Lagerbedingte Einflüsse' wird wirtgesteinspezifisch beurteilt (vgl. Kap. 3.3); die Bewertung für den Lagerperimeter HAA-NL fällt insgesamt *günstig* aus.

Nutzungskonflikte (Kriterium 2.4)

Die möglichen Nutzungskonflikte wurden in Kap. 4.4.2 behandelt. Unter Berücksichtigung der dort aufgeführten Unterlagen werden der Indikator 'Rohstoffvorkommen unterhalb des Wirtgesteins' für den Lagerperimeter HAA-NL insgesamt als *bedingt günstig* und der Indikator 'Rohstoffvorkommen oberhalb des Wirtgesteins' als *sehr günstig* beurteilt.

Im Lagerperimeter HAA-NL sind keine bedeutenden Mineral- und Thermalwassernutzungen vorhanden. Die heute nicht mehr genutzten sogenannten Mineralquellen von Eglisau befinden sich am Nordrand des geologischen Standortgebiets. Das Mineralwasser wurde mittels Bohrungen aus durchlässigen Abschnitten der USM gefördert. Die Hydrogeologie der USM ist wegen des heterogenen internen Aufbaus komplex. Die generelle Vorflutsituation und die hydrochemische Charakteristik (Na-Cl-Typ) deuten auf einen Zufluss aus dem südlichen bis südöstlichen Sektor hin. Demnach würde die USM mit den Zugangsbauwerken stromabwärts von der früher genutzten Mineralwasserfassung Eglisau durchfahren. Eine Beeinflussung dieser nicht mehr genutzten Fassung kann aktuell nicht ausgeschlossen werden. Bereits einige Kilometer südwestlich resp. westlich des geologischen Standortgebiets finden sich die Thermalquellen von Baden/Ennetbaden und die Thermalbäder von Zurzach. Die relevanten Aquifere werden mit den Zugangsbauwerken nicht durchfahren, und zwischen diesen und dem Opalinuston finden sich mächtige Aquitarde. Auch die für das Thermalwasser Baden/Ennetbaden potenziell relevante Jura-Hauptüberschiebung wird nicht durchfahren. Eine Beeinträchtigung dieser überregional bedeutenden Thermalwasservorkommen kann deshalb ausgeschlossen werden. Dies ergibt für den Indikator 'Mineral- und Thermalwassernutzungen' für den Lagerperimeter HAA-NL die Beurteilung *knapp günstig*.

Die Unterlagen zur Geothermie und zu weiteren energiebezogenen Nutzungen des Untergrunds finden sich in Kap. 4.4.2; dort wurden auch die Lagerperimeter beurteilt. Basierend auf den dort aufgeführten Aussagen ergibt sich für den Indikator 'Geothermie und weitere energiebezogene Nutzungen des Untergrunds' für den Lagerperimeter HAA-NL die Beurteilung *bedingt günstig*.

Fazit: Zusammen mit der *sehr günstigen* Beurteilung des nicht als nutzungswürdig eingestuften Rohstoffvorkommens innerhalb des Opalinustons (vgl. Kap. 3.3) fällt die Bewertung des Kriteriums 'Nutzungskonflikte' im Lagerperimeter HAA-NL insgesamt *günstig* aus.

Gesamtbewertung der Kriteriengruppe 'Langzeitstabilität' für den Lagerperimeter HAA-NL: *günstig*.

C) Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen im Lagerperimeter HAA-NL

Charakterisierbarkeit der Gesteine (Kriterium 3.1)

Das Kriterium 'Charakterisierbarkeit der Gesteine' wird wirtgesteinsspezifisch beurteilt (vgl. Kap. 3.3); die Bewertung für den Lagerperimeter HAA-NL fällt insgesamt *sehr günstig* aus.

Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse (Kriterium 3.2)

Die Explorationsverhältnisse im geologischen Untergrund des Wirtgesteins Opalinuston sind generell *sehr günstig* (vgl. Kap. 3.3). Im Bereich des Lagerperimeters HAA-NL ist das seismische Abbild gut bis sehr gut. Der Indikator 'Explorationsverhältnisse im geologischen Untergrund' des Lagerperimeters HAA-NL wird als *sehr günstig* beurteilt.

Der Lagerperimeter HAA-NL kann mit einer geeigneten 3D-seismischen Messung erkundet werden. Die teilweise dichte Bebauung (Glattfelden) und Kiesgruben im Bereich des Lagerperimeters HAA-NL führen zu Einschränkungen in der Durchführung der Messungen. Beeinträchtigungen der Datenqualität durch den Fluglärm des Flughafens Zürich sind möglich. Daher wird der Indikator 'Explorationsbedingungen an Oberfläche' für den Lagerperimeter HAA-NL nur als *günstig* bewertet.

Fazit: Insgesamt wird das Kriterium 'Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse' im Lagerperimeter HAA-NL knapp als *sehr günstig* beurteilt.

Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen (Kriterium 3.3)

Das Kriterium 'Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen' wird einerseits bezüglich der geologisch-tektonischen Situation (vgl. Kap. 4.4.2) und andererseits wirtgesteinsspezifisch beurteilt (vgl. Kap. 3.3). In Ergänzung zu Kap. 4.4.2 wird beim Indikator 'Modellvorstellungen zur Langzeitentwicklung (Geodynamik und Neotektonik; weitere Prozesse)' auch die Möglichkeit der Bildung einer Durchbruchsrinne berücksichtigt. Im Lagerperimeter könnte sich zwar innerhalb des Betrachtungszeitraums für ein HAA-Lager von 1 Million Jahren eine Durchbruchsrinne bilden, diese kann jedoch das Lager wegen der grossen Tiefenlage voraussichtlich nicht beeinträchtigen. Dieser Indikator wird insgesamt als *günstig* bewertet. Zusammen mit der *sehr günstigen* Bewertung des Indikators 'Unabhängige Evidenzen der Langzeitisolation' (Kap. 3.3) fällt die Bewertung des Kriteriums 'Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen' für den Lagerperimeter HAA-NL insgesamt knapp *sehr günstig* aus.

Gesamtbewertung der Kriteriengruppe 'Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen' für den Lagerperimeter HAA-NL: *sehr günstig*.

D) Bautechnische Eignung des Lagerperimeters HAA-NL

Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen (Kriterium 4.1)

Im Lagerperimeter HAA-NL liegt die Lagerebene (Annahme: Lagerebene in der Mitte des Opalinustons) in einer geotechnisch anspruchsvollen Tiefe von ca. 640 – 800 m u.T., die für die Bewertung massgebende maximale Tiefe der Lagerebene beträgt 800 m u.T. Dies ergibt für den Indikator 'Tiefenlage im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit (u.B. Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften)' für den Lagerperimeter HAA-NL die Bewertung knapp *bedingt günstig*.

Fazit: Zusammen mit dem für den Opalinuston als *günstig* eingestuften Indikator 'Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften'¹⁸² im Opalinuston, wird das Kriterium 'Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen' im Lagerperimeter HAA-NL für die betrachteten Tiefenlagen insgesamt als *bedingt günstig* beurteilt.

Untertägige Erschliessung und Wasserhaltung (Kriterium 4.2)

Der Zugang nach Untertag vom Standortareal NL-2 und vom Standortareal NL-6 zum untertägigen Lagerperimeter kann über eine Rampe oder über einen Schacht erfolgen. Im Fall der Verwendung einer Rampe müssen anfänglich Lockergesteine (Niederterrassenschotter, Moräne und Gehängeablagerungen bei NL-2 und evtl. Gehänge- bzw. Bachschutt bei NL-6) durchörtert werden; dann folgt das mächtige Schichtpaket der Unteren Süsswassermolasse (USM). Die restlichen Gesteinsformationen (Malmkalke, Effinger Schichten, Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger' und Opalinuston) werden aus bautechnischer und hydrogeologischer Sicht als mehrheitlich wenig problematisch erachtet, auch wenn die Tektonisierung im Standortgebiet Nördlich Lägern etwas stärker ausgeprägt sein dürfte als im Standortgebiet Zürich Nordost. In den Malmkalken muss zumindest lokal mit einer Verkarstung gerechnet werden; es wird allerdings durchwegs eozäner Paläokarst erwartet, dessen Hohlräume weitgehend verfüllt sein dürften. Es wird zwar keine erhöhte Wasserführung erwartet, sie kann aber auch nicht vollständig ausgeschlossen werden. Weiter sind in den kalkigen bzw. spröderen Einheiten auch Wasserzutritte aus offenen Klüften und gegebenenfalls entlang von Störungszonen nicht vollständig auszuschliessen. Auch die erforderlichen Schachtbauwerke (Lüftungs- bzw. Betriebsschacht und der Förderschacht, falls keine Rampe verwendet wird) durchqueren die gleichen Gesteinsformationen. Der Indikator 'Geotechnische und hydrogeologische Verhältnisse in überlagernden Gesteinsformationen' wird für den Lagerperimeter HAA-NL unter Berücksichtigung der möglichen technischen Massnahmen insgesamt als *günstig* beurteilt. Weiter ist zu beachten, dass der Lagerperimeter HAA-NL die Flexibilität bietet, für den Zugang nach Untertag von den Standortarealen NL-2 und NL-6 aus sowohl Schacht als auch Rampe verwenden zu können.

¹⁸² Zur Berücksichtigung der im Standortgebiet Nördlich Lägern erwarteten tektonischen Überprägung des Wirtgesteins (Lage in der Vorfaltenzone) wird der Indikator für den Lagerperimeter HAA-NL im Vergleich zur Bewertung in Kap. 3.3 etwas schlechter, aber immer noch als *günstig* bewertet.

Eine natürliche Gasführung im Opalinuston kann praktisch ausgeschlossen werden und ergibt für den Indikator 'Natürliche Gasführung (im Wirtgestein)' für den Lagerperimeter HAA-NL die Bewertung *sehr günstig*.

Fazit: Das Kriterium 'Untertägige Erschliessung und Wasserhaltung' im Lagerperimeter HAA-NL wird insgesamt knapp als *sehr günstig* beurteilt.

Gesamtbewertung der Kriteriengruppe 'Bautechnische Eignung' für den Lagerperimeter HAA-NL: *günstig*.

Prüfung der Sensitivität der Bewertungen für den Lagerperimeter HAA-NL

Zur Prüfung der Sensitivität der oben für den "massgebenden Fall" durchgeführten Bewertungen werden diese mit den Bewertungen der alternativen Lagerperimeter verglichen, vgl. die Darstellungen der abgegrenzten Lagerperimeter in Anhang B (inkl. tabellarische Kurzcharakterisierung) sowie die Bewertung der "bewertbaren" Lagerperimeter¹⁸³ in Anhang C.3.1.2. In Anhang C.3.1.2 findet sich auch eine Bewertung für eine Variante mit einer alternativen Interpretation der Qualität der oberen Rahmengesteine. Der Vergleich der Bewertungen ergibt folgendes Bild:

Auch bei Verwendung von alternativen Optimierungsanforderungen kann die angestrebte maximale Tiefe der Lagerebene von ca. 700 m u.T. nicht erreicht werden; das Platzangebot ist dann ungenügend. Auch bei Lockerung der Anforderung bezüglich Tiefenlage (maximale Lagertiefe ca. 850 m u.T. im Fall *HAA-NL-aL1-r* bzw. ca. 900 m u.T. im Fall *HAA-NL-aL2-r* gegenüber ca. 800 m u.T. im "massgebenden Fall") ergibt sich nur ein *ungünstiges* bzw. *bedingt günstiges* Platzangebot. Selbst bei einem weniger tief liegenden Wirtgestein (Berücksichtigung der Ungewissheiten in der Tiefenlage im Fall *HAA-NL-mLE-u*) kann die angestrebte maximale Tiefe nicht erreicht werden. Die detaillierten Bewertungen sind in Anhang C.3.1.2 zu finden. Insgesamt bietet das Standortgebiet Nördlich Lägern keine Möglichkeiten zur untertägigen Anordnung des Lagers in einer Tiefe, die den angestrebten Wert von 700 m u.T. nicht deutlich übersteigt.

Die alternative Konzeptualisierung zur Barrierenwirkung der oberen Rahmengesteine des Opalinustons (Fall *HAA-NL-mLE-r-oRG*) führt zu einer etwas niedrigeren Bewertung für den Indikator 'Mächtigkeit' und damit auch zu einer etwas niedrigeren Bewertung der Kriterien-Gruppe 'Eigenschaften des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs', aber nicht zu einer merklichen Änderung der Gesamtbewertung.

Fazit: Die Bewertungen der alternativen Lagerperimeter sowie die alternative Konzeptualisierung der oberen Rahmengesteine führen für das Standortgebiet Nördlich Lägern nicht zu einer signifikant anderen Gesamtbewertung. Bei der untertägigen Anordnung des Lagers gibt es praktisch keine Möglichkeiten, die Lagerkammern in einer Tiefe anzuordnen, die den angestrebten Wert von 700 m u.T. nicht deutlich übersteigt.

¹⁸³ In Tab. 4.2-3 bzw. Tab. B-1 ist aufgeführt, welche von den abgegrenzten und in Anhang B dargestellten Lagerperimetern bewertet werden.

4.4.4.4 HAA-Lagerperimeter Jura Ost (HAA-JO)

Hauptmerkmale

Im Lagerperimeter HAA-JO weist der Opalinuston eine Mächtigkeit von ca. 110 m auf und liefert den Hauptbeitrag zur Barrierenwirkung des Gesamtsystems. Die oberen Rahmengesteine (im Standortgebiet Jura Ost bestehend aus Passwang-Formation und Unteren Acuminata-Schichten) sind bedeutend weniger mächtig als im Faziesraum Ost, steuern aber ebenfalls zur Barrierenwirkung bei. Weiter wird erwartet, dass die oberen Rahmengesteine im Vergleich zum Faziesraum Ost eher von schlechterer Qualität sind (mögliche erhöhte Durchlässigkeit innerhalb der Passwang-Formation und der Unteren Acuminata-Schichten). Die unteren Rahmengesteine (Toniger Lias) hingegen sind in ihrer Barrierenwirkung vergleichbar mit denjenigen im Faziesraum Ost.

Der Lagerperimeter HAA-JO liegt in der Vorfaltenzone und wird geologisch durch die Jura-Hauptüberschiebung bzw. durch eine 'zu meidende tektonische Zone' (im Süden) und durch die minimale Tiefenlage (im Osten, Norden und Westen) begrenzt. Der Lagerperimeter wurde durch Fernschub von seiner Unterlage leicht abgeschert. Eine interne Deformation der abgescherten Schichttafel durch kompressive Lokalstrukturen oder relevante Verwerfungen kann aber nicht nachgewiesen werden. Die ruhig gelagerte, leicht nach Südosten einfallende Schichttafel erinnert von der Ausbildung her stark an den wenig gestörten Tafeljura s.str. Der Lagerperimeter ist durch die für Etappe 2 durchgeführte 2D-Seismik, einige ältere Seismiklinien und die nahegelegene Bohrung Riniken gut dokumentiert.

A) **Eigenschaften des Opalinustons mit seinen Rahmengesteinen im Lagerperimeter HAA-JO unter Berücksichtigung seiner Konfiguration**

Räumliche Ausdehnung (Kriterium 1.1)

Im Lagerperimeter HAA-JO liegt der Top Opalinuston im Tiefenbereich von ca. 400 – 550 m u.T.; die für die Bewertung massgebende minimale Überdeckung beträgt 400 m, sodass die gesamten oberen Rahmengesteine (rund 50 m mächtig) grundsätzlich als Barriere wirksam sind. Wegen der angenommenen beschränkten Barrierenqualität wird der Indikator 'Mächtigkeit' im Lagerperimeter HAA-JO jedoch nur als *günstig* beurteilt. Auch unter Berücksichtigung der Resultate der Dosisberechnungen zur Barrierenwirkung bleibt die Bewertung für den Indikator 'Mächtigkeit' *günstig*.

Es besteht jedoch die Möglichkeit, dass die Barrierenqualität der oberen Rahmengesteine auch besser sein könnte (keine erhöhte Wasserführung innerhalb der Passwang-Formation und der Unteren Acuminata-Schichten, vgl. Nagra 2014b, Dossier II). Deshalb wird zusätzlich eine Variante mit einer günstigeren Barrierenwirkung der oberen Rahmengesteine betrachtet¹⁸⁴.

¹⁸⁴ Die Konzeptualisierung mit einer günstigen Barrierenwirkung der oberen Rahmengesteine wird in einem alternativen Fall (*HAA-JO-mLE-r-ORG*) bewertet. Wegen der in der alternativen Konzeptualisierung angenommenen guten Barrierenwirkung der oberen Rahmengesteine (keine Wirkung der Sandkalkabfolgen innerhalb der Passwang-Formation und der Unteren Acuminata-Schichten im Hangenden des Opalinustons) führt dies für den alternativen Fall auch unter Berücksichtigung der Resultate der Dosisberechnungen zu einer *sehr günstigen* Bewertung für den Indikator 'Mächtigkeit'.

Die laterale Ausdehnung des Lagerperimeters beträgt 15.0 km². Der Lagerperimeter HAA-JO mit seiner Lage in der Vorfaltenzone hat eine gewisse tektonische Überprägung erfahren, auf der Seismik sind jedoch keine Anzeichen einer erhöhten Zergliederung zu erkennen, sodass nur mässige Platzreserven einzuplanen sind. Der Lagerperimeter HAA-JO bietet mit einer Fläche von 15.0 km² Platzreserven, die deutlich über den Platzbedarf des umhüllenden Abfallinventars hinausgehen. Die ausgewiesenen Platzreserven sind allerdings sehr sensitiv auf die Begrenzung des Lagerperimeters bezüglich der minimalen Tiefenlage. In Bezug auf den Indikator 'Platzangebot untertags' – unter Berücksichtigung von Ungewissheiten – wird der Lagerperimeter HAA-JO insgesamt als *günstig* eingestuft.

Fazit: Das Kriterium 'Räumliche Ausdehnung' wird im Lagerperimeter HAA-JO insgesamt als *günstig* beurteilt; durch die tektonische Überprägung kann eine gewisse Einschränkung des Platzangebots nicht ausgeschlossen werden.

Hydraulische Barrierenwirkung (Kriterium 1.2)

Die Tiefenlage der Obergrenze des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs wird bezüglich des Indikators 'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteins-Dekompaktion' für den Lagerperimeter HAA-JO nur knapp als *günstig* eingestuft, denn die minimale Überdeckung der Obergrenze des Opalinustons beträgt 400 m, sodass die oberen Rahmengesteine (Passwang-Formation und Untere Acuminata-Schichten) langfristig nicht als Barriere wirksam sind; sie sind im Vergleich zum Faziesraum Ost auch etwas weniger mächtig, und es besteht die Möglichkeit der erhöhten Wasserführung innerhalb der Passwang-Formation und der Unteren Acuminata-Schichten. Die hydraulische Barrierenwirkung des Opalinustons (massgebend für Bewertung des Indikators 'Hydraulische Durchlässigkeit') hingegen kommt voll zum Tragen. Weiter tragen auch die unteren Rahmengesteine (Toniger Lias) zur Barrierenwirkung bei. Aufgrund der stratigraphischen Verhältnisse wird im Lagerperimeter HAA-JO ein ausgeprägter Grundwasserstockwerkbau erwartet; dies ergibt für den Indikator 'Grundwasserstockwerke' die Bewertung knapp *sehr günstig*.

Fazit: Zusammen mit der wirtgesteinsspezifisch vorgenommenen *sehr günstigen* Beurteilung des Opalinustons bezüglich des Indikators 'Hydraulische Durchlässigkeit' (vgl. Kap. 3.3) fällt die Bewertung des Kriteriums 'Hydraulische Barrierenwirkung' für den Lagerperimeter HAA-JO insgesamt *günstig* aus.

Geochemische Bedingungen (Kriterium 1.3)

Das Kriterium 'Geochemische Bedingungen' wird wirtgesteinsspezifisch beurteilt (vgl. Kap. 3.3); die Bewertung für den Lagerperimeter HAA-JO fällt insgesamt *sehr günstig* aus.

Freisetzungspfade (Kriterium 1.4)

Alle Indikatoren des Kriteriums 'Freisetzungspfade' werden wirtgesteinsspezifisch beurteilt, auch der Indikator 'Länge der massgebenden Freisetzungspfade' (vgl. Kap. 3.3). Die Bewertung des Kriteriums 'Freisetzungspfade' für den Lagerperimeter HAA-JO fällt insgesamt *sehr günstig* aus.

Gesamtbewertung der Kriteriengruppe 'Eigenschaften des Wirtgesteins / einschlusswirksamen Gebirgsbereichs' für den Opalinuston mit seinen Rahmengesteinen im Lagerperimeter HAA-JO: knapp *sehr günstig*.

B) Langzeitstabilität im Lagerperimeter HAA-JO

Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften (Kriterium 2.1)

Die Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften im Lagerperimeter HAA-JO wird einerseits aus Sicht der geologisch-tektonischen Situation beurteilt (Kap. 4.4.2). Andererseits wird der Indikator 'Potenzial zur Bildung neuer Wasserwegsamkeiten (Verkarstung)' wirtgesteinsspezifisch beurteilt (vgl. Kap. 3.3); im Falle des Opalinustons erübrigt sich eine diesbezügliche Beurteilung der Konfiguration, weil eine Verkarstung im Opalinuston ausgeschlossen werden kann; es ergibt sich für diesen Indikator eine *sehr günstige* Bewertung. In Ergänzung zu Kap. 4.4.2 wird beim Indikator 'Modellvorstellungen zur Langzeitentwicklung (Geodynamik und Neotektonik; weitere Prozesse)' auch die Möglichkeit der Bildung einer Durchbruchsrinne berücksichtigt. Im Lagerperimeter wird die Bildung einer Durchbruchsrinne wegen der günstigen Lage des Lagerperimeters bezüglich Vergletscherung während der nächsten hunderttausend Jahre und mehr als unwahrscheinlich eingestuft, kann aber längerfristig nicht vollständig ausgeschlossen werden. Dieser Indikator wird deshalb insgesamt knapp als *günstig* bewertet. Die Bewertung des Kriteriums 'Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften' fällt für den Lagerperimeter HAA-JO insgesamt *günstig* aus.

Erosion (Kriterium 2.2)

Innerhalb des für ein HAA-Lager relevanten Betrachtungszeitraums von 1 Million Jahren und für die erwarteten grossräumigen Hebungsraten (vgl. Kap. 4.4.2) wird die zukünftige Erosion in der Nordschweiz im Bereich von ca. 125 – 200 m liegen. Im Lagerperimeter HAA-JO liegt die Obergrenze des Opalinustons in einem Tiefenbereich von ca. 200 – 300 m unter der Erosionsbasis. Die massgebende minimale Tiefe des Opalinustons unter Erosionsbasis beträgt 200 m. Weiter wird die Bildung einer Durchbruchsrinne wegen der Topographie und der günstigen Lage des Lagerperimeters bezüglich Vergletscherung im Lagerperimeter während der nächsten hunderttausend Jahre und mehr als unwahrscheinlich eingestuft, kann aber längerfristig nicht vollständig ausgeschlossen werden. Aus diesen Gründen wird der Indikator 'Tiefenlage unter lokaler Erosionsbasis im Hinblick auf die Bildung neuer Rinnen' im Lagerperimeter HAA-JO insgesamt knapp als *günstig* beurteilt. Bezüglich der Bildung von Durchbruchsrinnen gibt es jedoch Ungewissheiten: Es besteht durchaus die Möglichkeit, dass im Lagerperimeter HAA-JO innerhalb des Betrachtungszeitraums für das HAA-Lager von 1 Million Jahren überhaupt keine solche Rinne entsteht¹⁸⁵.

Der Lagerperimeter HAA-JO liegt ausserhalb der Haupttäler; er hat deshalb wenig Potenzial für glaziale Tiefenerosion. Der Indikator 'Tiefenlage unter Fels im Hinblick auf glaziale Tiefenerosion' wird für den Lagerperimeter HAA-JO deshalb knapp als *sehr günstig* beurteilt.

Fazit: Zusammen mit der *sehr günstigen* Beurteilung des Indikators 'Erosion im Betrachtungszeitraum' in der Nordschweiz (vgl. Kap. 4.4.2) fällt die Bewertung des Kriteriums 'Erosion' im Lagerperimeter HAA-JO insgesamt *günstig* aus.

¹⁸⁵ Die Konzeptualisierung ohne Bildung einer Durchbruchsrinne wird in einem alternativen Fall (*HAA-JO-aL2-roRi*) bewertet. Für diesen alternativen Fall ergibt sich eine *sehr günstige* Bewertung für den Indikator 'Tiefenlage unter lokaler Erosionsbasis im Hinblick auf die Bildung neuer Rinnen'.

Lagerbedingte Einflüsse (Kriterium 2.3)

Das Kriterium 'Lagerbedingte Einflüsse' wird wirtgesteinsspezifisch beurteilt (vgl. Kap. 3.3); die Bewertung für den Lagerperimeter HAA-JO fällt insgesamt *günstig* aus.

Nutzungskonflikte (Kriterium 2.4)

Die möglichen Nutzungskonflikte wurden in Kap. 4.4.2 behandelt. Unter Berücksichtigung der dort aufgeführten Unterlagen werden der Indikator 'Rohstoffvorkommen unterhalb des Wirtgesteins' für den Lagerperimeter HAA-JO insgesamt als *bedingt günstig* und der Indikator 'Rohstoffvorkommen oberhalb des Wirtgesteins' als *sehr günstig* beurteilt.

Im Lagerperimeter HAA-JO sind keine bedeutenden Mineral- und Thermalwassernutzungen vorhanden. Im erweiterten Umkreis finden sich bedeutende Thermalkurorte wie Baden/Ennetbaden, Bad Schinznach und Bad Zurzach. Bereits deutlich weiter westlich liegt Bad Säkingen. Mit den Zugangsbauwerken werden die für die Mineral- und Thermalwassernutzungen relevanten Aquifere (Kristallin, Muschelkalk) nicht durchfahren. Zwischen den von den Zugangsbauwerken durchfahrenen Grundwasserleitern und den Einheiten, aus denen die Mineral- und Thermalwässer gefördert werden, liegen mächtige Aquitarde (Grundwasserstauer), welche eine hydraulische Entkoppelung der Systeme bewirken. Auch die für die Thermalwassersysteme von Baden/Ennetbaden und Bad Schinznach potenziell relevante Jura-Hauptüberschiebung wird nicht durchfahren. Eine Gefährdung der Mineral- und Thermalwassernutzungen durch die Zugangsbauwerke kann somit ausgeschlossen werden. Dies ergibt für den Indikator 'Mineral- und Thermalwassernutzungen' die Beurteilung *sehr günstig*.

Die Unterlagen zur Geothermie und zu weiteren energiebezogenen Nutzungen des Untergrunds finden sich in Kap. 4.4.2; dort wurden auch die Lagerperimeter beurteilt. Basierend auf den dort aufgeführten Aussagen ergibt sich für den Indikator 'Geothermie und weitere energiebezogene Nutzungen des Untergrunds' für den Lagerperimeter HAA-JO die Beurteilung *bedingt günstig*.

Fazit: Zusammen mit der *sehr günstigen* Beurteilung des nicht als nutzungswürdig eingestuften Rohstoffvorkommens innerhalb des Opalinustons (vgl. Kap. 3.3) fällt die Bewertung des Kriteriums 'Nutzungskonflikte' im Lagerperimeter HAA-JO insgesamt *günstig* aus.

Gesamtbewertung der Kriteriengruppe 'Langzeitstabilität' für den Lagerperimeter HAA-JO: *günstig*.

C) Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen im Lagerperimeter HAA-JO

Charakterisierbarkeit der Gesteine (Kriterium 3.1)

Das Kriterium 'Charakterisierbarkeit der Gesteine' wird wirtgesteinsspezifisch beurteilt (vgl. Kap. 3.3); die Bewertung für den Lagerperimeter HAA-JO fällt insgesamt *sehr günstig* aus.

Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse (Kriterium 3.2)

Die Explorationsverhältnisse im geologischen Untergrund des Wirtgesteins Opalinuston sind generell *sehr günstig* (vgl. Kap. 3.3). Im Bereich des Lagerperimeters HAA-JO ist das seismische Abbild gut bis sehr gut. Der Indikator 'Explorationsverhältnisse im geologischen Untergrund' des Lagerperimeters HAA-JO wird als *sehr günstig* beurteilt.

Der Lagerperimeter HAA-JO kann mit einer geeigneten 3D-seismischen Messung erkundet werden. Nur sehr wenige Objekte müssen bei der Durchführung einer seismischen Messung zur Abbildung des Lagerperimeters HAA-JO berücksichtigt werden. Daher wird der Indikator 'Explorationsbedingungen an Oberfläche' für den Lagerperimeter HAA-JO als *sehr günstig* bewertet.

Fazit: Insgesamt wird das Kriterium 'Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse' im Lagerperimeter HAA-JO als *sehr günstig* beurteilt.

Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen (Kriterium 3.3)

Das Kriterium 'Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen' wird einerseits bezüglich der geologisch-tektonischen Situation (Kap. 4.4.2) und andererseits wirtgesteinsspezifisch beurteilt (Kap. 3.3). In Ergänzung zu Kap. 4.4.2 wird beim Indikator 'Modellvorstellungen zur Langzeitentwicklung (Geodynamik und Neotektonik; weitere Prozesse)' auch die Möglichkeit der Bildung einer Durchbruchsrinne berücksichtigt. Im Lagerperimeter wird die Bildung einer Durchbruchsrinne wegen der Topographie und der günstigen Lage des Lagerperimeters bezüglich Vergletscherung während der nächsten hunderttausend Jahre und mehr als unwahrscheinlich eingestuft, kann aber längerfristig nicht vollständig ausgeschlossen werden. Dieser Indikator wird deshalb insgesamt knapp als *günstig* bewertet. Zusammen mit der *sehr günstigen* Bewertung des Indikators 'Unabhängige Evidenzen der Langzeitisolation' (Kap. 3.3) fällt die Bewertung des Kriteriums 'Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen' für den Lagerperimeter HAA-JO insgesamt *günstig* aus.

Gesamtbewertung der Kriteriengruppe 'Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen' für den Lagerperimeter HAA-JO: *sehr günstig*.

D) Bautechnische Eignung des Lagerperimeters HAA-JO

Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen (Kriterium 4.1)

Im Lagerperimeter HAA-JO liegt die Lagerebene (Annahme: Lagerebene in der Mitte des Opalinustons) in einer Tiefe von ca. 450 – 600 m u.T.; die für die Bewertung massgebende maximale Tiefe der Lagerebene beträgt ca. 600 m u.T. Dies ergibt für den Indikator 'Tiefenlage im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit (u.B. Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften)' für den Lagerperimeter HAA-JO die Bewertung knapp *sehr günstig*.

Fazit: Zusammen mit dem für den Opalinuston als *günstig* eingestuften Indikator 'Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften'¹⁸⁶ für den Opalinuston, wird das Kriterium 'Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen' im Lagerperimeter HAA-JO für die betrachteten Tiefenlagen insgesamt als *günstig* beurteilt.

¹⁸⁶ Zur Berücksichtigung der im Standortgebiet Jura Ost erwarteten tektonischen Überprägung des Wirtgesteins (Lage in der Vorfaltenzone) wird der Indikator für den Lagerperimeter HAA-JO im Vergleich zur Bewertung in Kap. 3.3 etwas schlechter, aber immer noch als *günstig* bewertet.

Untertägige Erschliessung und Wasserhaltung (Kriterium 4.2)

Der Zugang nach Untertag vom Standortareal JO-3+ zum untertägigen Lagerperimeter erfolgt über eine Rampe. Mit der Rampe wird zuerst Hangschutt durchfahren, anschliessend ist gemäss heutiger Planung mit Ausnahme des ersten, steigend aufgefahrene Rampenabschnitts eine Linienführung im Opalinuston geplant. Dort sind Verkarstungsphänomene und / oder deutliche Wasserzutritte aus Klüften oder Störungszonen bei einer genügenden Überlagerung ausgeschlossen. Aus bautechnischer und hydrogeologischer Sicht wird diese Linienführung auch aufgrund der beschränkten Tektonisierung als mehrheitlich unproblematisch beurteilt. Die erforderlichen Schachtbauwerke (Lüftungs- bzw. Betriebsschacht) hingegen durchqueren auch Kalke, wo die Bedingungen bezüglich Wasserführung ungünstiger sind und wo auch Karst nicht ausgeschlossen werden kann. Der Indikator 'Geotechnische und hydrogeologische Verhältnisse in überlagernden Gesteinsformationen' kann für den Lagerperimeter HAA-JO trotzdem insgesamt als *sehr günstig* bewertet werden.

Eine natürliche Gasführung im Opalinuston kann praktisch ausgeschlossen werden; dies ergibt für den Indikator 'Natürliche Gasführung (im Wirtgestein)' für den Lagerperimeter HAA-JO die Bewertung *sehr günstig*.

Fazit: Das Kriterium 'Untertägige Erschliessung und Wasserhaltung' wird im Lagerperimeter HAA-JO insgesamt als *sehr günstig* beurteilt.

Gesamtbewertung der Kriteriengruppe 'Bautechnische Eignung' für den Lagerperimeter HAA-JO: knapp *sehr günstig*.

Prüfung der Sensitivität der Bewertungen für den Lagerperimeter HAA-JO

Zur Prüfung der Sensitivität der oben für den "massgebenden Fall" durchgeführten Bewertungen werden diese mit den Bewertungen der alternativen Lagerperimeter verglichen, vgl. die Darstellungen der abgegrenzten Lagerperimeter in Anhang B (inkl. tabellarische Kurzcharakterisierung) sowie die Bewertung der "bewertbaren" Lagerperimeter¹⁸⁷ in Anhang C.3.1.2. In Anhang C.3.1.2 findet sich auch eine Bewertung für eine Variante mit einer alternativen Interpretation der Qualität der oberen Rahmengesteine sowie eine weitere Variante ohne Bildung einer Durchbruchsrinne. Der Vergleich der Bewertungen ergibt folgendes Bild:

Die bei der alternativen Abgrenzung der Lagerperimeter vorgenommenen Änderungen an den Optimierungsanforderungen (Fall *HAA-JO-aL2-r*) führen zu einem knapp *günstigen* Platzangebot. Dabei zeigt sich, dass der für die Bewertung oben angenommene "massgebende Fall" eine ausgewogene Variante darstellt. Wenn die Tiefenlage des Wirtgesteins geringer ist als angenommen (Fälle *HAA-JO-aL5-u* und *HAA-JO-aL6-u*), ergibt sich bei einer maximalen Tiefenlage von ca. 540 m u.T. – bei allerdings gelockerten Anforderungen an die minimale Tiefenlage – noch ein gutes bzw. brauchbares Platzangebot. Bei Annahme eines tiefer liegenden Wirtgesteins (Fall *HAA-JO-aL4-t*) resultiert ein *günstiges* Platzangebot. In allen Fällen ändern die weiteren Bewertungen und die Gesamtbewertung wenig. Die detaillierten Bewertungen sind in Anhang C.3.1.2 zu finden. Insgesamt bietet das Standortgebiet Jura Ost eine ausreichende Flexibilität zur untertägigen Anordnung des Lagers.

¹⁸⁷ In Tab. 4.2-3 bzw. Tab. B-1 ist aufgeführt, welche von den abgegrenzten und in Anhang B dargestellten Lagerperimetern bewertet werden.

Die alternative Konzeptualisierung zur Barrierenwirkung der oberen Rahmengesteine des Opalinustons (Fall *HAA-JO-mLE-r-oRG*) führt zu einer *sehr günstigen* Bewertung für den Indikator 'Mächtigkeit' und damit auch zu einer *sehr günstigen* Bewertung des Kriteriums 'Räumliche Ausdehnung', aber zu keiner wesentlichen Änderung der Kriteriengruppe 'Eigenschaften des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs'. Die alternative Konzeptualisierung ohne Bildung einer Durchbruchsrinne (Fall *HAA-JO-aL2-r-oRi*) führt zu einer *sehr günstigen* Bewertung für den Indikator 'Tiefenlage unter lokaler Erosionsbasis im Hinblick auf die Bildung neuer Rinnen'. Diese beiden alternativen Konzeptualisierungen führen aber nicht zu einer signifikanten Änderung der Gesamtbewertung.

Fazit: Die Bewertungen der alternativen Lagerperimeter sowie die alternative Konzeptualisierung der oberen Rahmengesteine sowie die alternative Annahme bezüglich Bildung von Durchbruchsrinnen führen für das Standortgebiet Jura Ost nicht zu einer signifikant anderen Gesamtbewertung. Die Flexibilität bei der untertägigen Anordnung der Lagerkammern ist insgesamt ausreichend.

4.4.4.5 Zusammenfassung der Bewertung der geologischen Standortgebiete für das HAA-Lager

Bewertung für den 'massgebenden Fall für die Einengung'

Die Lagerperimeter in den geologischen Standortgebieten für das HAA-Lager wurden in den vorhergehenden Kapiteln auf der Hierarchiestufe der Indikatoren, Kriterien und Kriteriengruppen qualitativ bewertet (massgebender Fall für die Einengung). Eine Zusammenfassung der Bewertungsergebnisse findet sich in Tab. 4.4-3; Fig. 4.4-10 zeigt die Häufigkeit der Bewertungsstufen für die Indikatoren, Kriterien und Kriteriengruppen für die Lagerperimeter in den verschiedenen Standortgebieten.

Die Lagerperimeter erreichen unter Berücksichtigung aller vier Kriteriengruppen in den Standortgebieten Zürich Nordost und Jura Ost die Bewertung *sehr geeignet* und im Standortgebiet Nördlich Lägern die Bewertung *geeignet*; damit genügen alle Standortgebiete bezüglich Bewertung der 13 Kriterien des SGT den Anforderungen für die weitere Betrachtung in SGT Etappe 3.

Die Bewertung ergibt auf den Hierarchiestufen der Kriteriengruppen bzw. der Kriterien folgendes Bild:

Für die **Kriteriengruppe 'Eigenschaften des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs'** werden die Lagerperimeter in allen Standortgebieten insgesamt mit *sehr günstig* bewertet. Diese Bewertung resultiert aus der nachfolgend kurz diskutierten Bewertung der zu dieser Kriteriengruppe gehörenden Kriterien. Die Bewertung des Kriteriums 'Räumliche Ausdehnung' fällt in den Standortgebieten Zürich Nordost und Jura Ost *günstig* und im Standortgebiet Nördlich Lägern *bedingt günstig* aus, obschon im letzteren Standortgebiet der Indikator 'Platzangebot untertags' *ungünstig* ausfällt. Wegen der geringen hydraulischen Durchlässigkeit des Wirtgesteins werden die Standortgebiete Zürich Nordost und Nördlich Lägern bezüglich des Kriteriums 'Hydraulische Barrierenwirkung' als *sehr günstig* eingestuft, das Standortgebiet Jura Ost wegen seiner geringeren Tiefenlage *günstig*. Auch die Bewertung des Kriteriums 'Geochemische Bedingungen' fällt für alle Standortgebiete *sehr günstig* aus. Ebenso wird das Kriterium 'Freisetzungspfade' in allen Standortgebieten als *sehr günstig* bewertet.

Die **Kriteriengruppe 'Langzeitstabilität'** führt in allen Standortgebieten insgesamt zur Bewertung *günstig*. Diese Bewertung resultiert aus der nachfolgend kurz diskutierten Bewertung der zu dieser Kriteriengruppe gehörenden Kriterien. Das Kriterium 'Beständigkeit der Standort- und

Gesteinseigenschaften' wird im Standortgebiet Zürich Nordost *sehr günstig* und in den Standortgebieten Nördlich Lägern und Jura Ost als *günstig* bewertet. Beim Kriterium 'Erosion' ergibt sich ein ähnliches Bild: In den Standortgebieten Zürich Nordost und Nördlich Lägern fällt die Bewertung *sehr günstig*, im Standortgebiet Jura Ost *günstig* aus. Das Kriterium 'Lagerbedingte Einflüsse' wird in allen Standortgebieten insgesamt als *günstig* beurteilt, auch wenn die Bewertungen der Indikatoren 'Verhalten des Wirtgesteins bezüglich Gas' und 'Verhalten des Wirtgesteins bezüglich Temperatur' nur *bedingt günstig* ausfallen; diese Aspekte können jedoch bei einer geeigneten Auslegung des Lagers gut beherrscht werden. Bezüglich des Kriteriums 'Nutzungskonflikte' werden die Standortgebiete Nördlich Lägern und Jura Ost als *günstig* bewertet, das Standortgebiet Zürich Nordost als *sehr günstig*.

Für die **Kriteriengruppe 'Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen'** ergibt sich in allen Standortgebieten insgesamt die Bewertung *sehr günstig*. Diese Bewertung resultiert aus der nachfolgend kurz diskutierten Bewertung der zu dieser Kriteriengruppe gehörenden Kriterien. Das Kriterium 'Charakterisierbarkeit der Gesteine' wird in allen Standortgebieten als *sehr günstig* beurteilt. Ebenso fällt die Bewertung für das Kriterium 'Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse' in allen Standortgebieten *sehr günstig* aus. Das Kriterium 'Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen' ergibt in den Standortgebieten Zürich Nordost und Nördlich Lägern die Bewertung *sehr günstig* und im Standortgebiet Jura Ost die Bewertung *günstig*. Die Differenz ist primär bedingt durch den Indikator 'Modellvorstellungen zur Langzeitentwicklung (Geodynamik und Neotektonik; weitere Prozesse)', wo bezüglich der Bildung von Durchbruchsrinnen das Standortgebiet Jura Ost nur *günstig* bewertet wird.

Für die **Kriteriengruppe 'Bautechnische Eignung'** ergibt sich im Standortgebiet Jura Ost die Bewertung *sehr günstig* und in den Standortgebieten Zürich Nordost und Nördlich Lägern die Bewertung *günstig*. Diese Bewertung resultiert aus der nachfolgend kurz diskutierten Bewertung der zu dieser Kriteriengruppe gehörenden Kriterien. Die felsmechanischen Eigenschaften erlauben bei Beschränkung der Tiefe der Lagerebene und unter Berücksichtigung der verschiedenen technischen Möglichkeiten für den Ausbruch und die Sicherung der Untertagebauten – teilweise unter Inkaufnahme eines erhöhten technischen Aufwands (Kosten, Zeitbedarf) – die zuverlässige Erstellung der untertägigen Bauten, ohne dass die Barriereigenschaften der Wirtgesteine grösserräumig beeinträchtigt würden; deshalb werden die Standortgebiete Zürich Nordost und Jura Ost bezüglich des Kriteriums 'Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen' als *günstig* beurteilt. Im Standortgebiet Nördlich Lägern hingegen führt die grosse Tiefe der Lagerebene zu einer Bewertung von *bedingt günstig*. Beim Kriterium 'Untertägige Erschliessung und Wasserhaltung' fällt die Bewertung in allen Standortgebieten *sehr günstig* aus. Die etwas vorteilhaftere Bewertung für Jura Ost ist vor allem auf den Indikator 'Geotechnische und hydrogeologische Verhältnisse in überlagernden Gesteinsformationen' zurückzuführen, die aus den günstigen geologischen Bedingungen im Korridor für die Rampe nach Untertag resultieren.

Tab. 4.4-3: Zusammenfassende Darstellung der Bewertungsergebnisse für die Lagerperimeter in den geologischen Standortgebieten für das HAA-Lager (massgebender Fall für die Einengung).

Legende: Farben (abgestuft) bzw. Zahlen: rosa: ungünstig ($1 \leq x < 2$); gelb: bedingt günstig ($2 \leq x < 3$); hellgrün: günstig ($3 \leq x < 4$); dunkelgrün: sehr günstig ($4 \leq x \leq 5$).

Die Bewertung der Kriterien und Kriteriengruppen erfolgt durch Aggregation der 5-stufigen Bewertung der zugehörigen Indikatoren und Kriterien (vgl. Erläuterungen in Anhang C.1).

Nr.	Kriteriengruppe / Kriterium / Indikator	Bewertungsobjekt	HAA-ZNO	HAA-NL	HAA-JO
KG1	Eigenschaften des WG/EG		4.3	4.1	4.1
1.1	Räumliche Ausdehnung		3.9	2.9	3.7
5	Mächtigkeit	EG/LPmin	4.5	4.5	3.5
8	Platzangebot untertags	LP	3.3	1.3	3.9
1.2	Hydraulische Barrierenwirkung		4.5	4.6	3.9
9	Hydraulische Durchlässigkeit	WG-ss/LP	4.5	4.5	4.5
2	Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteins-Dekompaktion	EG/LPmin	4.5	4.7	3.1
10	Grundwasserstockwerke	EG/LP	4.5	4.5	4.1
1.3	Geochemische Bedingungen		4.3	4.3	4.3
11	Mineralogie	WG-ss/LP	4.5	4.5	4.5
12	pH	WG-ss/LP	4.5	4.5	4.5
13	Redox-Bedingungen	WG-ss/LP	4.5	4.5	4.5
14	Salinität	WG-ss/LP	3.5	3.5	3.5
15	Mikrobielle Prozesse	WG-ss/LP	4.1	4.1	4.1
16	Kolloide	WG-ss/LP	4.5	4.5	4.5
1.4	Freisetzungspfade		4.5	4.5	4.5
17	Art der Transportpfade und Ausbildung des Porenraums	WG-ss/LP	4.5	4.5	4.5
20	Transmissivität präferenzierter Freisetzungspfade	WG-ss/LP	4.5	4.5	4.5
22	Selbstabdichtungsvermögen	WG-ss/LP	4.5	4.5	4.5
18	Homogenität des Gesteinsaufbaus	WG/LP	4.5	4.5	4.5
19	Länge der massgebenden Freisetzungspfade	WG-ss/LP	4.5	4.5	4.5

Tab. 4.4-3: (Fortsetzung)

Nr.	Kriteriengruppe / Kriterium / Indikator	Bewertungsobjekt	HAA-ZNO	HAA-NL	HAA-JO
KG2	Langzeitstabilität		3.9	3.8	3.7
2.1	Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften		4.1	3.8	3.7
23	Modellvorstellungen zur Langzeitentwicklung (Geodynamik und Neotektonik; weitere Prozesse)	EG/LP	4.3	3.5	3.1
24	Seismizität	EG/LP	3.5	3.5	3.5
27	Potenzial zur Bildung neuer Wasserwegsamkeiten (Verkarstung)	WG/LP	4.5	4.5	4.5
2.2	Erosion		4.0	4.4	3.8
28	Erosion im Betrachtungszeitraum	EG/LP	4.3	4.3	4.3
3	Tiefenlage unter lokaler Erosionsbasis im Hinblick auf die Bildung neuer Rinnen	EG/LPmin	4.1	4.7	3.1
4	Tiefenlage unter Fels im Hinblick auf glaziale Tiefenerosion	EG/LPmin	3.5	4.3	4.1
2.3	Lagerbedingte Einflüsse		3.5	3.5	3.5
29	Auflockerungszone im Nahbereich der Untertagebauten	WG-ss/LP	4.3	4.3	4.3
30	Chemische Wechselwirkungen	WG-ss/LP	4.5	4.5	4.5
31	Verhalten des Wirtgesteins bzgl. Gas	WG-ss/LP	2.5	2.5	2.5
32	Verhalten des Wirtgesteins bzgl. Temperatur	WG-ss/LP	2.7	2.7	2.7
2.4	Nutzungskonflikte		4.0	3.5	3.7
33	Rohstoffvorkommen innerhalb des Wirtgesteins	WG/LP	4.5	4.5	4.5
34	Rohstoffvorkommen unterhalb des Wirtgesteins	EG/LP	4.5	2.5	2.5
35	Rohstoffvorkommen oberhalb des Wirtgesteins	EG/LP	4.5	4.5	4.5
36	Mineral- und Thermalwassernutzungen	EG/LP	3.1	3.1	4.5
37	Geothermie und weitere energiebezogene Nutzungen des Untergrunds	EG/LP	3.3	2.7	2.7
KG3	Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen		4.4	4.2	4.2
3.1	Charakterisierbarkeit der Gesteine		4.5	4.5	4.5
39	Variabilität der Gesteinseigenschaften im Hinblick auf ihre Charakterisierbarkeit	WG-ss/LP	4.5	4.5	4.5
40	Erfahrungen	WG/LP	4.5	4.5	4.5
3.2	Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse		4.2	4.1	4.3
43	Explorationsverhältnisse im geologischen Untergrund	WG/LP	4.3	4.3	4.3
44	Explorationsbedingungen an Oberfläche	LP	4.1	3.9	4.3
3.3	Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen		4.4	4.0	3.8
23	Modellvorstellungen zur Langzeitentwicklung (Geodynamik und Neotektonik; weitere Prozesse)	EG/LP	4.3	3.5	3.1
46	Unabhängige Evidenzen der Langzeitisolation	WG/LP	4.5	4.5	4.5

Tab. 4.4-3: (Fortsetzung)

Nr.	Kriteriengruppe / Kriterium / Indikator	Bewertungsobjekt	HAA-ZNO	HAA-NL	HAA-JO
KG4	Bautechnische Eignung		3.8	3.4	4.1
4.1	Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen		3.5	2.7	3.7
47	Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften	WG-ss/LP	3.5	3.3	3.3
1	Tiefenlage im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit (u.B. Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften)	WG-ss/LPmax	3.5	2.1	4.1
4.2	Untertägige Erschliessung und Wasserhaltung		4.0	4.0	4.4
48	Geotechnische und hydrogeologische Verhältnisse in überlagernden Gesteinsformationen	EG/LP	3.5	3.5	4.3
49	Natürliche Gasführung (im Wirtgestein)	WG/LP	4.5	4.5	4.5
KG1-4	Gesamtbewertung		4.1	3.9	4.0

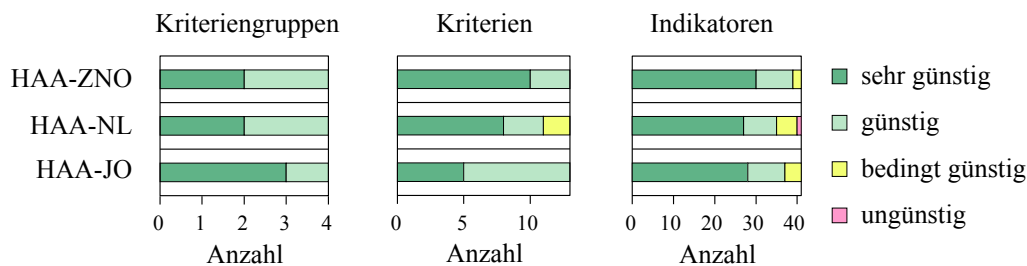


Fig. 4.4-10: Zusammenfassende Darstellung der Bewertungsergebnisse für die Lagerperimeter in den geologischen Standortgebieten für das HAA-Lager (massgebender Fall für die Einengung).

Die Histogramme zeigen die Anzahl Bewertungen für die verschiedenen Bewertungsstufen.

Sensitivität der Bewertung bezüglich der alternativen Fälle und der Ungewissheiten in der Tiefenlage

Die Bewertungen zu den alternativen Lagerperimetern bzw. den alternativen Konzeptualisierungen zur Barrierenwirkung der Rahmengesteine sowie zur Bildung von Durchbruchsrinnen sind in Anhang C.3.1.2 aufgeführt.

Die dort aufgeführten Bewertungen zeigen, dass für alle Standortgebiete die alternativen Lagerperimeter zu keiner grundsätzlich anderen Beurteilung als im "massgebenden Fall" führen. Das Standortgebiet **Zürich Nordost** weist selbst für alternative Annahmen bei der Abgrenzung der Lagerperimeter und unter Berücksichtigung der Ungewissheiten bezüglich der Tiefenlage ein günstiges Platzangebot auf und bietet eine grosse Flexibilität bei der untertägigen Anordnung der Lagerkammern. Dies gilt – mit gewissen Einschränkungen wegen der Sensitivität bezüglich der minimalen Tiefenlage – auch für das Standortgebiet **Jura Ost**, welches ein (teil-

weise knapp) günstiges Platzangebot und eine ausreichende Flexibilität aufweist. Eine Sonderstellung nimmt das Standortgebiet **Nördlich Lägern** ein: Hier kann auch bei Verwendung von alternativen Optimierungsanforderungen die angestrebte maximale Tiefe der Lagerebene von ca. 700 m u.T. nicht erreicht werden bzw. bleibt das Platzangebot in bevorzugter Tiefenlage ungenügend. Selbst unter der Annahme eines weniger tief liegenden Wirtgesteins (Berücksichtigung der Ungewissheiten in der Tiefenlage) kann die angestrebte maximale Tiefe nicht erreicht werden. Insgesamt bietet das Standortgebiet Nördlich Lägern praktisch keine Möglichkeiten, die Lagerkammern in einer Tiefe anzuordnen, die den angestrebten Wert von 700 m u.T. nicht deutlich übersteigt.

Die alternativen konzeptuellen Annahmen zur Barrierenwirkung der oberen Rahmengesteine des Opalinustons betreffen nur die Standortgebiete Nördlich Lägern und Jura Ost. Im Standortgebiet Zürich Nordost gibt es bezüglich der Barrierenwirkung der Rahmengesteine keine wesentlichen Ungewissheiten. Die alternativen konzeptuellen Annahmen führen in den oben genannten Standortgebieten zu einer etwas tieferen Bewertung (Nördlich Lägern) bzw. einer etwas höheren Bewertung (Jura Ost) für den Indikator 'Mächtigkeit', aber nicht zu einer merkbaren Änderung der Gesamtbewertung. Die alternative Konzeptualisierung ohne Bildung einer Durchbruchrinne im Standortgebiet Jura Ost führt zu einer besseren Bewertung für den Indikator 'Tiefenlage unter lokaler Erosionsbasis im Hinblick auf die Bildung neuer Rinnen', aber nicht zu einer merkbaren Änderung der Gesamtbewertung.

Fazit

Auch unter Berücksichtigung der alternativen Konzeptualisierungen erreichen alle Standortgebiete für das HAA-Lager mindestens die Bewertung *geeignet*. Es qualifizieren sich also alle HAA-Standortgebiete für den nächsten Bewertungsschritt – die Bewertung anhand der entscheidungsrelevanten Merkmale, die Identifikation von eindeutigen Nachteilen und der sicherheitstechnische Vergleich – in Kap. 5.

5 Sicherheitstechnischer Vergleich der geologischen Standortgebiete

5.1 Vorgehen und verwendete Grundlagen

Im fünften und letzten Schritt des Einengungsverfahrens erfolgt eine sicherheitsorientierte Optimierung bezüglich der geologischen Standortgebiete, d.h. Standortgebiete werden als Ganzes für die weiteren Untersuchungen für Etappe 3 ausgewählt oder zurückgestellt (vgl. Kap. 2.3.6). Dieser Schritt umfasst zwei Teile: 1) Beurteilung der entscheidungsrelevanten Merkmale und der zugehörigen Indikatoren, welche als Basis für die Identifikation von eindeutigen Nachteilen der geologischen Standortgebiete dienen (Kap. 5.2), und 2) die vergleichende Gesamtbewertung mit allen Informationen und der sicherheitstechnische Vergleich der geologischen Standortgebiete, verstanden als Synthese, in welcher die verschiedenen Teilergebnisse zusammenfliessen und zu einer Entscheidung verdichtet werden (Kap. 5.3). Diese Auswertungen erfolgen primär für den "massgebenden Fall für die Einengung". Die Sensitivität der Entscheidung bezüglich alternativer Abgrenzungen der Lagerperimeter als Folge einer alternativen Umsetzung der Optimierungsanforderungen bzw. als Folge alternativer Wirtgesteinstiefen sowie bezüglich alternativer Konzeptualisierung der Rahmengesteine wird anhand der Bewertungen der entsprechenden alternativen Situationen berücksichtigt, basierend auf den Ergebnissen aller Bewertungen aus Kap. 4.4; dies kann in begründeten Fällen dazu führen, dass auch die alternativen Bewertungen in die Entscheidungsfindung einfließen.

Ausgangspunkt sind die optimierten Lagerperimeter der geologischen Standortgebiete für das SMA- und das HAA-Lager und ihre Bewertung gemäss Kap. 4.4; als Grundlage für die hier vorgenommene Evaluation werden die Bewertungen aus Kap. 4.4 unverändert übernommen.

Die Identifikation eindeutiger Nachteile erfolgt durch den Vergleich der verschiedenen geologischen Standortgebiete bzw. der zugehörigen Lagerperimeter anhand der vom ENSI vorgegebenen entscheidungsrelevanten Merkmale und der zugehörigen Indikatoren (vgl. Tab. 2.3-8). Dazu wird für die entscheidungsrelevanten Merkmale und die zugehörigen Indikatoren eine Bewertung der geologischen Standortgebiete bzw. der zugehörigen Lagerperimeter durchgeführt, wozu die Bewertungen der Indikatoren verwendet werden, welche unverändert aus der qualitativen Bewertung (Kap. 4.4) übernommen werden. Bei der Aggregation der Bewertungen wird wie folgt vorgegangen:

- Bei den Merkmalen 'Wirksamkeit der geologischen Barriere' und 'Explorier- und Charakterisierbarkeit der geologischen Barriere im Standortgebiet' werden die Bewertungen der zugehörigen Indikatoren jeweils durch arithmetische, gleich gewichtete Mittelung aggregiert. Dies ist deshalb gerechtfertigt, weil die entsprechenden Indikatoren kompensierbare Beiträge zum übergeordneten Merkmal leisten.
- Bei den Merkmalen 'Langzeitstabilität der geologischen Barriere' und 'Bautechnische Machbarkeit eines Tiefenlagers unter Berücksichtigung der vorgeschlagenen Standortareale' wird jeweils das Minimum der Bewertungen der zugehörigen Indikatoren übernommen. Dies ist deshalb gerechtfertigt, weil die zugehörigen Indikatoren nicht-kompensierbare Beiträge zum übergeordneten Merkmal leisten (z.B. können die Auswirkungen einer möglichen Verkarstung auf die Langzeitsicherheit nicht durch günstigere Bedingungen bezüglich langfristiger Erosion kompensiert werden).

Aufgrund seiner grossen Bedeutung für die Barrierenwirkung und für die Langzeitstabilität wird der Indikator 'Selbstabdichtungsvermögen' bei den Merkmalen 'Wirksamkeit der geologischen Barriere' und 'Langzeitstabilität der geologischen Barriere' als entscheidend relevant eingestuft. Durch Mehrfachverwendung erhält dieser Indikator ein grösseres Gewicht.

Für den Vergleich der Bewertungen der entscheidend relevanten Merkmale und der zugehörigen Indikatoren der geologischen Standortgebiete werden drei alternative Verfahren verwendet, welche die eindeutigen Nachteile der geologischen Standortgebiete bzw. der zugehörigen Lagerperimeter klarer hervorheben und welche sich im Vergleich mit der qualitativen Bewertung durch einen geringeren Kompensationsgrad bei der Aggregation der Bewertungen auszeichnen (direkter Vergleich der Bewertung der entscheidend relevanten Merkmale und Indikatoren, 'Outranking-Methode', 'Malus-Bilanzierung', vgl. Anhang D)¹⁸⁸.

In der nachfolgenden Diskussion liegt der Schwerpunkt auf den Ergebnissen des direkten Vergleichs der Bewertung der entscheidend relevanten Merkmale und Indikatoren. Zunächst werden anhand des direkten Vergleichs alle Hinweise auf eindeutige Nachteile ausgewiesen, und es wird dann argumentativ dargelegt, welche dieser Hinweise tatsächlich als eindeutige Nachteile eingestuft werden. Danach wird anhand der alternativen Vergleichsmethoden ('Outranking-Methode', 'Malus-Bilanzierung') geprüft, ob sie weitere Hinweise auf eindeutige Nachteile aufzeigen und ob diese gegebenenfalls als eindeutige Nachteile einzustufen sind (Differenzanalyse). Ferner wird auch geprüft, ob alternative Annahmen bei der Abgrenzung der Lagerperimeter bzw. alternative Konzeptualisierungen der Rahmengesteine zu anderen Entscheidungen führen würden.

Neben den in Kap. 5.2 diskutierten eindeutigen Nachteilen werden bei der vergleichenden Gesamtbewertung in Kap. 5.3 für die geologischen Standortgebiete auch die Resultate der Dosisberechnungen und die Resultate der Gesamtbewertung anhand der 13 Kriterien zur Sicherheit und Machbarkeit gemäss SGT miteinbezogen. Schliesslich werden auch die von der KNS und der AG SiKA/KES aufgebrachten und in ENSI (2013b) formulierten Fragen verwendet für eine Überprüfung der Vorschläge.

Am Schluss des Kapitels wird anhand aller vorhandenen Unterlagen auch beurteilt, ob eines oder mehrere Standortgebiete für ein Kombilager vorgeschlagen werden können.

5.2 Bewertung der geologischen Standortgebiete anhand der entscheidend relevanten Merkmale und Identifikation von eindeutigen Nachteilen

5.2.1 Bewertungsergebnisse

Die Bewertungen für die entscheidend relevanten Merkmale und die zugehörigen Indikatoren für die geologischen Standortgebiete bzw. die zugehörigen Lagerperimeter sind in Tab. 5.2-1 und 5.2-2 für den "massgebenden Fall"¹⁸⁹ zusammengefasst. Aus den Bewertungen können Hinweise auf eindeutige Nachteile (von unterschiedlicher Ausprägung) durch den direkten Vergleich der Bewertungen der Standortgebiete bzw. der zugehörigen Lagerperimeter pro Lagertyp wie folgt abgeleitet werden: Liegt die Bewertung eines Lagerperimeters für ein entscheidend relevantes

¹⁸⁸ Bei der Festlegung der eindeutigen Nachteile wird dem 'direkten Vergleich der Bewertungen' die höchste Bedeutung gegeben; das 'Outranking' und die 'Malus-Bilanzierung' werden verwendet, um allenfalls vorhandene zusätzliche Hinweise auf eindeutige Nachteile zu identifizieren (Hinweise auf zu prüfende Nachteile).

¹⁸⁹ Im nachfolgenden Text wird häufig anstelle des Begriffs "massgebender Fall für die Einengung" die Kurzform "massgebender Fall" verwendet.

Merkmal oder für einen zugehörigen Indikator um mindestens zwei Bewertungsstufen tiefer als die Bewertung der besten Lagerperimeter bzw. Standortgebiete für dasselbe Merkmal oder für denselben Indikator, so wird dies als Hinweis auf einen eindeutigen Nachteil interpretiert; liegt die Bewertung nur um eine Bewertungsstufe tiefer, so besteht ein Hinweis auf einen vertieft zu prüfenden Nachteil. Diese Hinweise werden anschliessend auf Stichhaltigkeit geprüft und können dann zu eindeutigen Nachteilen führen (vgl. Tab. 5.2-3 und 5.2-4).

Als zusätzliche Information für den Vergleich können die Bewertungen zusätzlich auch als Illustration der Stärken und Schwächen der Standortgebiete bzw. der zugehörigen Lagerperimeter verwendet werden, indem aus den Bewertungen Stärken-Schwächen-Profile abgeleitet werden. Dabei wird wie folgt vorgegangen: Die beste Bewertungsstufe (*sehr günstig* / dunkelgrün) wird als Stärke interpretiert, die beiden schlechtesten Bewertungsstufen (*bedingt günstig* / gelb und *ungünstig* / rosa) als Schwächen. Die mittlere Bewertungsstufe (*günstig* / hellgrün) wird indifferent, d.h. weder als Stärke noch als Schwäche, interpretiert. Der rein visuelle Vergleich der Bewertungen der Standortgebiete mit dieser Farbgebung zeigt die Unterschiede zwischen den Standortgebieten deutlich auf.

5.2.1.1 SMA-Lager

Bewertungen für den 'massgebenden Fall für die Einengung' und Resultate des diesbezüglichen direkten Vergleichs zwischen den Standortgebieten

Die Resultate der Bewertung der entscheiderelevanten Merkmale und der zugehörigen Indikatoren sowie die resultierenden Stärken-Schwächen-Profile und die aus dem Vergleich der Standortgebiete bzw. zugehörigen Lagerperimeter abgeleiteten Hinweise auf eindeutige Nachteile sind für das SMA-Lager in der Tab. 5.2-1 zusammengefasst. Fig. 5.2-1 zeigt für die verschiedenen Standortgebiete Histogramme mit der Anzahl Merkmale bzw. Indikatoren pro Bewertungsstufe und gibt auch einen raschen Überblick über die Verteilung der Stärken und Schwächen. Für den "massgebenden Fall" ergibt sich das folgende Bild:

Das Standortgebiet **Südranden** weist bezüglich des Merkmals 'Langzeitstabilität der geologischen Barriere' eine Schwäche auf; diese ergibt sich aus den Schwächen des Standortgebiets aufgrund der vergleichsweise geringen Tiefenlage des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs und der damit verbundenen ungenügenden Überdeckung der oberen Rahmengesteine (Indikator 'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteins-Dekompaktion') und der Exponiertheit bezüglich langfristiger Erosion bei einer möglichen Bildung von Durchbruchsrinnen (Indikatoren 'Modellvorstellungen zur Langzeitentwicklung (Geodynamik und Neotektonik; weitere Prozesse)', 'Tiefenlage unter lokaler Erosionsbasis im Hinblick auf die Bildung neuer Rinnen') sowie der Möglichkeit einer zukünftigen glazialen Übertiefung neuer Durchbruchsrinnen bzw. der Neuhauserwald-Rinne (Indikator 'Tiefenlage unter Fels im Hinblick auf glaziale Tiefenerosion'). Die Befunde für dieses Merkmal und für alle diese Indikatoren werden als eindeutige Nachteile eingestuft im Vergleich mit den anderen SMA-Standortgebieten, in denen der einschlusswirksame Gebirgsbereich eine grössere Tiefenlage und damit einen besseren Schutz vor langfristiger Erosion aufweist. Ferner weist das Standortgebiet Südranden ein sehr knappes Platzangebot in bevorzugter Tiefenlage auf (Indikator 'Platzangebot untertags'). Auch diese vergleichsweise tiefere Bewertung wird als eindeutiger Nachteil eingestuft im Vergleich zu den Standortgebieten, welche für den Indikator 'Platzangebot untertags' die beste Bewertung aufweisen (Zürich Nordost und Jura Ost). Hingegen werden die vergleichsweise tieferen Bewertungen bei den Indikatoren 'Mächtigkeit' und 'Geotechnische und hydrogeologische Verhältnisse in überlagernden Gesteinsformationen' nicht als eindeutige Nachteile eingestuft,

weil die Barrierenwirkung des Opalinustons und der unteren Rahmengesteine insgesamt doch als günstig eingestuft werden können und der Zugang nach Untertag zuverlässig und sicher gewährleistet werden kann.

Das Standortgebiet **Zürich Nordost** weist bei keinem der entscheidrelevanten Merkmale und Indikatoren Schwächen auf. Die etwas tiefere Bewertung der Indikatoren 'Tiefenlage im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit (u.B. Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften)' und 'Geotechnische und hydrogeologische Verhältnisse in überlagernden Gesteinsformationen' werden wegen der mässigen Tiefe und der insgesamt gesehen günstigen Bedingungen für die Zugangsbauwerke nach Untertage als unbedeutend eingestuft. Damit ergeben sich beim Standortgebiet Zürich Nordost keine eindeutigen Nachteile gegenüber den anderen Standortgebieten.

Das Standortgebiet **Nördlich Lägern** weist bezüglich des Merkmals 'Bautechnische Machbarkeit eines Tiefenlagers unter Berücksichtigung der vorgeschlagenen Standortareale' eine klare Schwäche auf, welche auf ausgeprägte Schwächen bei den Indikatoren 'Tiefenlage im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit (u.B. Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften)' und 'Platzangebot untertags' zurückzuführen ist. Diese Schwächen werden als eindeutige Nachteile des Standortgebiets Nördlich Lägern eingestuft, da die entsprechenden Bewertungen viel schlechter ausfallen als diejenigen der insgesamt bestbewerteten Standortgebiete (Zürich Nordost und Jura Ost). Insbesondere das ungenügende Platzangebot in bevorzugter Tiefenlage wird als sehr kritisch beurteilt. Hingegen wird die vergleichsweise tiefere Bewertung beim Indikator 'Geotechnische und hydrogeologische Verhältnisse in überlagernden Gesteinsformationen' nicht als eindeutiger Nachteil eingestuft, weil der Zugang nach Untertag auch bei grosser Tiefenlage zuverlässig und sicher gewährleistet werden kann.

Das Standortgebiet **Jura Ost** weist bei keinem der entscheidrelevanten Merkmale und Indikatoren Schwächen auf. Die etwas tiefere Bewertung des Indikators 'Tiefenlage im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit (u.B. Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften)' wird wegen der mässigen Tiefe als unbedeutend eingestuft. Die vergleichsweise tiefere Bewertung beim Indikator 'Mächtigkeit' ist auf die konzeptuell begründete Annahme einer beschränkten Barrierenwirkung der oberen Rahmengesteine (Passwang-Formation und Untere Acuminata-Schichten) zurückzuführen. Dies wird ebenfalls nicht als eindeutiger Nachteil eingestuft, da die gute Barrierenwirkung des Opalinustons und der unteren Rahmengesteine (Toniger Lias) von dieser vorsichtigen konzeptuellen Annahme unbeeinflusst bleibt. Damit ergeben sich beim Standortgebiet Jura Ost keine eindeutigen Nachteile gegenüber den anderen Standortgebieten.

Das Standortgebiet **Jura-Südfuss** weist bezüglich des Indikators 'Mächtigkeit' eine klare Schwäche auf. Diese ist auf die ungünstigen Eigenschaften der unteren Rahmengesteine zurückzuführen, die aufgrund des Kalkigen Lias nicht als zuverlässig nutzbare Barriere eingestuft werden können, in Kombination mit dem wenig mächtigen Opalinuston und der konzeptuell begründeten Annahme einer beschränkten Barrierenwirkung der oberen Rahmengesteine. Die Kombination dieser ungünstigen Eigenschaften wird im Quervergleich mit den anderen Standortgebieten als eindeutiger Nachteil eingestuft. Ferner weist das Standortgebiet Jura-Südfuss bezüglich des Merkmals 'Bautechnische Machbarkeit eines Tiefenlagers unter Berücksichtigung der vorgeschlagenen Standortareale' eine Schwäche auf, welche auf untergeordnete Schwächen und auf vergleichsweise tiefere Bewertungen bei allen zugeordneten Indikatoren zurückzuführen ist. Die Schwäche beim Indikator 'Geotechnische und hydrogeologische Verhältnisse in überlagernden Gesteinsformationen' wird zwar als Hinweis auf einen eindeutigen Nachteil eingestuft, da die entsprechende Bewertung deutlich schlechter ausfällt als die beste Vergleichs-Bewertung; weil der Zugang nach Untertag jedoch trotz erschwerter geologischer Bedingungen zuverlässig und sicher gewährleistet werden kann, wird dieser Nachteil nur nachgeordnet in die Entscheidungsfindung mit einbezogen. Das Platzangebot in bevorzugter Tiefen-

lage ist als knapp zu beurteilen, da erhebliche Platzreserven einzuplanen sind wegen der höheren Dichte an anordnungsbestimmenden Störungszonen als Folge der tektonischen Überprägung (vgl. Indikator 'Modellvorstellungen zur Langzeitentwicklung (Geodynamik und Neotektonik; weitere Prozesse)'). Wegen der erwarteten erheblichen Erschwernisse bei der Anordnung der Untertagebauten im tektonisch überprägten Standortgebiet wird das Platzangebot untertags trotz der günstigen Bewertung als eindeutiger Nachteil eingestuft, da die besten Standortgebiete (Zürich Nordost und Jura Ost) diesbezüglich viel besser eingestuft werden.

Von allen Standortgebieten weist das Standortgebiet **Wellenberg** am meisten Schwächen auf. Beim Merkmal 'Wirksamkeit der geologischen Barriere' bestehen teils Schwächen, teils tiefere, aber immer noch knapp günstige Bewertungen bezüglich der Indikatoren 'Hydraulische Durchlässigkeit', 'Art der Transportpfade und Ausbildung des Porenraums', 'Transmissivität präferenzzieller Freisetzungspfade', 'Selbstabdichtungsvermögen', 'Homogenität des Gesteinsaufbaus' und 'Kolloide'. Diese werden als eindeutige Nachteile gegenüber allen anderen Standortgebieten bewertet, da der Opalinuston bei allen diesen Indikatoren deutlich besser eingestuft wird als die Mergel-Formationen des Helvetikums und diese Indikatoren für den Radionuklidrückhalt wichtig sind. Diese Einstufung wird auch durch die Dosisberechnungen bestätigt (vgl. Kap. 4.3). Ferner weist das Standortgebiet Wellenberg bezüglich des Merkmals 'Langzeitstabilität der geologischen Barriere' Schwächen auf, welche auf Schwächen bezüglich der im Standortgebiet vorherrschenden geodynamischen und neotektonischen Bedingungen (Indikatoren 'Modellvorstellungen zur Langzeitentwicklung (Geodynamik und Neotektonik; weitere Prozesse)' und 'Seismizität') und bezüglich des im Vergleich mit dem Opalinuston geringeren Selbstabdichtungsvermögens der Mergel-Formationen (Indikator 'Selbstabdichtungsvermögen') zurückzuführen sind. Die Schwächen dieses Merkmals und dieser Indikatoren werden als eindeutige Nachteile im Vergleich mit den anderen Standortgebieten und dem dort vorkommenden Opalinuston eingestuft. Hingegen wird die vergleichsweise tiefere Bewertung beim Indikator 'Erosion im Betrachtungszeitraum' nicht als eindeutiger Nachteil eingestuft, da im Standortgebiet Wellenberg grundsätzlich die Möglichkeit besteht, die Lagerkammern in grosser Tiefe anzuordnen und so vor den langfristigen Auswirkungen der Erosion zu schützen. Weiter weist das Standortgebiet Wellenberg bezüglich des Merkmals 'Explorier- und Charakterisierbarkeit der geologischen Barriere im Standortgebiet' und bei den Indikatoren 'Explorationsverhältnisse im geologischen Untergrund' und 'Variabilität der Gesteinseigenschaften im Hinblick auf ihre Charakterisierbarkeit' Schwächen auf; dies betrifft die Schwierigkeit der Lokalisierung von Störungszonen, die stärker wasserführend sind und/oder evtl. reaktiviert werden können und die Schwierigkeiten bei der Charakterisierung des Wirtgesteins bezüglich lokalisiertem Fluss in Diskontinuitäten und der Lokalisierung von Kalkbankabfolgen. Die Schwächen bei diesem Merkmal und bei beiden zugeordneten Indikatoren werden als eindeutige Nachteile eingestuft, da sich die Exploration des Wirtgesteinskörpers im Standortgebiet Wellenberg bezüglich Wirtgesteinsgrenzen, Fremdgesteinseinschlüssen und anordnungsbestimmender Störungszonen und die Charakterisierung der Mergelvorkommen des Helvetikums gegenüber dem Opalinuston in den Standortgebieten der Nordschweiz erheblich schwieriger gestaltet und weniger zuverlässige Resultate ergibt. Schliesslich weist das Merkmal 'Bautechnische Machbarkeit eines Tiefenlagers unter Berücksichtigung der vorgeschlagenen Standortareale' eine Schwäche auf, welche auf eine Schwäche beim zugeordneten Indikator 'Tiefenlage im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit (u.B. Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften)' zurückzuführen ist. Diese Schwächen werden aber nicht als eindeutige Nachteile eingestuft, da die Erstellung und der Betrieb der Lagerkammern angesichts der im Vergleich mit dem Opalinuston höheren Gesteinsfestigkeit auch in grösseren Tiefen zuverlässig und sicher gewährleistet werden können. Das Platzangebot im Standortgebiet Wellenberg fällt insgesamt knapp günstig aus, was aber ebenfalls nicht als eindeutiger Nachteil eingestuft wird, weil die Lagerkammern grundsätzlich mehrstöckig angeordnet werden können.

Tab. 5.2-1: (Fortsetzung)

Nr.	Entscheidrelevante Merkmale (EM) / Entscheidrelevante Indikatoren (EI)	SMA- SR	SMA- ZNO	SMA- NL	SMA- JO	SMA- JS	SMA- WLB
c)	Explorier- und Charakterisierbarkeit der geologischen Barriere im Standortgebiet	4.3	4.4	4.4	4.4	4.3	2.0 (×)
39	Variabilität der Gesteinseigenschaften im Hinblick auf ihre Charakterisierbarkeit	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	2.5 (×)
43	Explorationsverhältnisse im geologischen Untergrund	4.1	4.3	4.3	4.3	4.1	1.5 (×)
d)	Bautechnische Machbarkeit eines Tiefenlagers unter Berücksichtigung der vorgeschlagenen Standortareale	3.1	3.5	1.3 (×)	3.5	2.9 (*)	2.7 (*)
1	Tiefenlage im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit (u.B. Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften)	4.7	3.5 (*)	1.5 (×)	3.5 (*)	3.5 (*)	2.7 (×)
48	Geotechnische und hydrogeologische Verhältnisse in überlagernden Gesteinsformationen	3.5 (*)	3.5 (*)	3.5 (*)	4.3	2.9 (×)	4.1
8	Platzangebot untertags	3.1 (*)	4.1	1.3 (×)	4.7	3.3 (*)	3.1 (*)

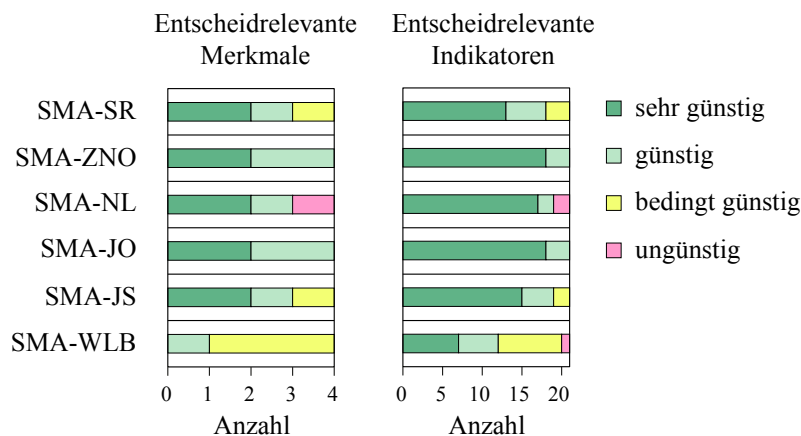


Fig. 5.2-1: Zusammenfassende Darstellung der Bewertungsergebnisse für die Standortgebiete bzw. die zugehörigen Lagerperimeter für das SMA-Lager (entscheidrelevante Merkmale und Indikatoren, massgebender Fall für die Einengung).

Die Histogramme zeigen die Anzahl Bewertungen für die verschiedenen Bewertungsstufen. Rosa und gelb können als Schwäche interpretiert werden, dunkelgrün als Stärke und hellgrün als indifferent. Damit können die Graphiken auch als Stärken-Schwächen-Profile verwendet werden.

Sensitivität der Bewertungen des 'massgebenden Falls für die Einengung' bezüglich alternativer Lagerperimeter und Konzeptualisierungen im Hinblick auf die Identifikation eindeutiger Nachteile

Die Ergebnisse der Bewertung der alternativen Lagerperimeter und der alternativen Konzeptualisierungen im Hinblick auf die Prüfung der Sensitivität sind in Anhang C (Tab. C.3-5 a-f und zugehörige Bewertungshistogramme) aufgeführt.

Insgesamt fallen die Bewertungen und die resultierenden Stärken-Schwächen-Profile für den massgebenden Lagerperimeter, für die alternativen Lagerperimeter und für die alternativen Konzeptualisierungen der Rahmengesteine in allen Standortgebieten für das SMA-Lager sehr ähnlich aus. Unterschiede ergeben sich bei den geometrischen Eigenschaften und Platzverhältnissen in den Lagerperimetern, d.h. sie beschränken sich auf die Indikatoren 'Mächtigkeit', 'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteins-Dekompaktion', 'Tiefenlage unter lokaler Erosionsbasis im Hinblick auf die Bildung neuer Rinnen', 'Tiefenlage unter Fels im Hinblick auf glaziale Tiefenerosion', 'Tiefenlage im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit (u.B. Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften)' und auf das 'Platzangebot untertags'.

In denjenigen Standortgebieten für das SMA-Lager, in denen es Ungewissheiten bezüglich der Qualität der oberen Rahmengesteine gibt (Standortgebiete Nördlich Lägern, Jura Ost und Jura-Südfuss), werden alternative Konzeptualisierungen zur Barrierenwirkung der oberen Rahmengesteine betrachtet. Dies betrifft eine geringer angenommene Wasserführung in der Passwang-Formation und in den Unteren Acuminata-Schichten in den Standortgebieten Jura Ost und Jura-Südfuss sowie die Annahme einer mächtigeren wasserführenden Sandkalkabfolge an der Basis der oberen Rahmengesteine im Standortgebiet Nördlich Lägern (vgl. grün gestrichelte Linien in Fig. 3.1-3), was vereinfacht über eine alternative Beurteilung der Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs erfasst wird. Für das Standortgebiet Nördlich Lägern ergibt sich beim Indikator 'Mächtigkeit' vergleichsweise eine etwas tiefere, aber immer noch günstige Bewertung, was aber nicht als eindeutiger Nachteil eingestuft wird. Für das Standortgebiet Jura Ost ergibt sich eine knapp sehr günstige Bewertung. Für das Standortgebiet Jura-Südfuss ergibt sich nur eine geringfügig bessere Bewertung (knapp günstig), was auf die Kombination aus ungünstigen Eigenschaften des Kalkigen Lias und der vergleichsweise geringen Mächtigkeit des Opalinustons zurückzuführen ist und als Bestätigung des bereits im "massgebenden Fall" identifizierten eindeutigen Nachteils im Vergleich mit den anderen Standortgebieten eingestuft wird. Die alternative Konzeptualisierung der oberen Rahmengesteine führt also zu keiner Änderung bezüglich eindeutiger Nachteile.

Insgesamt ergibt sich also folgendes Bild:

Im Standortgebiet **Südranden** kann das knappe Platzangebot nur verbessert werden, wenn die Anforderungen bezüglich des Schutzes vor Erosion über das zulässige Mass hinaus gelockert werden. Nur bei Annahme eines tiefer liegenden Wirtgesteins (Berücksichtigung der Ungewissheiten in der Tiefenlage) ergibt sich bezüglich Erosion eine leicht vorteilhaftere Situation. Insgesamt werden die für den "massgebenden Fall" identifizierten eindeutigen Nachteile des Standortgebiets Südranden auch für alternative Annahmen bei der Abgrenzung der Lagerperimeter und unter Berücksichtigung der Ungewissheiten bezüglich der Tiefenlage bestätigt.

Das Standortgebiet **Zürich Nordost** bietet auch für alternative Annahmen bei der Abgrenzung der Lagerperimeter und unter Berücksichtigung der Ungewissheiten bezüglich der Tiefenlage ein günstiges bis sehr günstiges Platzangebot in bevorzugter Tiefenlage. Wie im "massgebenden Fall" sind auch bei den alternativen Lagerperimetern keine eindeutigen Nachteile des Standortgebiets Zürich Nordost gegenüber den anderen Standortgebieten zu verzeichnen.

Im Standortgebiet **Nördlich Lägern** kann auch bei Verwendung von alternativen Optimierungsanforderungen die angestrebte maximale Tiefe der Lagerebene von ca. 600 m u.T. nicht erreicht werden bzw. bleibt das Platzangebot in bevorzugter Tiefenlage ungenügend. Zwar können mit alternativen Annahmen bei der Abgrenzung der Lagerperimeter die Platzverhältnisse teilweise etwas verbessert werden, allerdings auf Kosten der bevorzugten maximalen Tiefenlage, d.h. mit ungünstigeren Bewertungen für den Indikator 'Tiefenlage im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit (u.B. Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften)'. So ergibt sich erst bei einer Lagerebene in der Tiefe von 800 m u. T. ein Lagerperimeter von knapp ausreichender Grösse (vgl. Anhang B, Fig. B.3-4). Selbst unter der Annahme eines weniger tief liegenden Wirtgesteins (Berücksichtigung der Ungewissheiten in der Tiefenlage) kann die angestrebte maximale Tiefe nicht erreicht werden (vgl. Anhang B, Fig. B.3-6). Die für den "massgebenden Fall" identifizierten eindeutigen Nachteile des Standortgebiets Nördlich Lägern bleiben auch für alternative Annahmen bei der Abgrenzung der Lagerperimeter und unter Berücksichtigung der Ungewissheiten bezüglich der Tiefenlage bestehen.

Auch das Standortgebiet **Jura Ost** bietet bei alternativen Annahmen für die Abgrenzung der Lagerperimeter und unter Berücksichtigung der Ungewissheiten bezüglich der Tiefenlage ein günstiges bis sehr günstiges Platzangebot in bevorzugter Tiefenlage. Wie im "massgebenden Fall" sind auch bei den alternativen Lagerperimetern keine eindeutigen Nachteile des Standortgebiets Jura Ost gegenüber den anderen Standortgebieten zu verzeichnen.

Das Standortgebiet **Jura-Südfuss** weist bezüglich der Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (Indikator 'Mächtigkeit') einen eindeutigen Nachteil auf, welcher auf die ungünstigen Eigenschaften der unteren Rahmengesteine (Kalkiger Lias), in Kombination mit der konzeptuell begründeten Annahme einer beschränkten Barrierenwirkung der oberen Rahmengesteine und dem weniger mächtigen Opalinuston, zurückzuführen ist. Sollte die Barrierenwirkung der oberen Rahmengesteine besser ausfallen als erwartet, so ergäbe sich eine geringfügig bessere Bewertung der Mächtigkeit (vgl. Diskussion weiter unten); der eindeutige Nachteil bezüglich der Mächtigkeit bleibt jedoch bestehen. Auch für alternative Annahmen bei der Abgrenzung der Lagerperimeter und unter Berücksichtigung der Ungewissheiten bezüglich der Tiefenlage bleibt das Gesamtbild gleich; das Standortgebiet Jura-Südfuss weist grundsätzlich ein knappes Platzangebot in bevorzugter Tiefenlage auf, da wegen der höheren Dichte an anordnungsbestimmenden Störungszonen als Folge der tektonischen Überprägung erhebliche Platzreserven einzuplanen sind. Der eindeutige Nachteil bezüglich Platzangebot wird bestätigt.

Im Standortgebiet **Wellenberg** bleibt das Platzangebot selbst bei mehrstöckiger Anordnung in allen betrachteten Fällen knapp, aber ausreichend bemessen; die zahlreichen für den "massgebenden Fall" identifizierten eindeutigen Nachteile bleiben auch für alternative Annahmen bei der Abgrenzung der Lagerperimeter bestehen. Insgesamt zeigen die Bewertungen der alternativen Lagerperimeter und der alternativen Konzeptualisierungen zur Barrierenwirkung der oberen Rahmengesteine für das SMA-Lager, dass die mit dem "massgebenden Fall" identifizierten eindeutigen Nachteile belastbar sind, d.h. dass diese auch bei Verwendung von alternativen Annahmen bei der Abgrenzung der Lagerperimeter sowie von alternativen Konzeptualisierungen grundsätzlich bestehen bleiben bzw. bestätigt werden.

'Outranking-Methode' für die entscheiderelevanten Merkmale und zugehörigen Indikatoren sowie Hinweise auf eindeutige Nachteile für den 'massgebenden Fall für die Einengung'

Die Schwäche-Präferenzflüsse und die daraus abgeleiteten Hinweise auf eindeutige Nachteile der Standortgebiete bzw. der zugehörigen Lagerperimeter für das SMA-Lager sind in Tab. C.3-6 für den "massgebenden Fall" zusammengefasst. Zusätzlich werden in Fig. C.3-1 die Beiträge der entscheiderelevanten Merkmale zu den Schwäche-Präferenzflüssen denjenigen der Stärke-Präferenzflüsse für die verschiedenen Standortgebiete gegenübergestellt. Für den "massgebenden Fall" ergeben sich bei der 'Outranking-Methode' keine zusätzlichen Hinweise auf eindeutige Nachteile und die Resultate bestätigen im Wesentlichen die aus dem direkten Vergleich ermittelten eindeutigen Nachteile, vgl. dazu auch Tab. 5.2-3.

'Malus-Bilanzierung' für die entscheiderelevanten Merkmale und zugehörigen Indikatoren sowie Hinweise auf eindeutige Nachteile für den 'massgebenden Fall für die Einengung'

Die Malus-Bilanzierung und die daraus abgeleiteten Hinweise auf eindeutige Nachteile der Standortgebiete bzw. der zugehörigen Lagerperimeter für das SMA-Lager sind in Tab. C.3-7 zusammengefasst. Für den "massgebenden Fall" ergeben sich auch bei der Malus-Bilanzierung mit einer Ausnahme keine zusätzlichen Hinweise auf eindeutige Nachteile. Die Ausnahme betrifft das Merkmal 'Bautechnische Eignung eines Tiefenlagers unter Berücksichtigung der vorgeschlagenen Standortareale' für das SMA-Standortgebiet Südranden; dieser Hinweis ist auf das knappe Platzangebot untertags zurückzuführen und wird beim entsprechenden Indikator als eindeutiger Nachteil erfasst (vgl. Diskussion beim direkten Vergleich der Bewertungen). Insgesamt bestätigen die Resultate der Malus-Bilanzierung die aus dem direkten Vergleich ermittelten eindeutigen Nachteile, vgl. dazu auch Tab. 5.2-3.

5.2.1.2 HAA-Lager

Bewertungen für den 'massgebenden Fall für die Einengung' und Resultate des diesbezüglichen direkten Vergleichs zwischen den Standortgebieten

Die Resultate der Bewertung der entscheiderelevanten Merkmale und der zugehörigen Indikatoren sowie die resultierenden Stärken-Schwächen-Profile und die aus dem Vergleich der Standortgebiete bzw. zugehörigen Lagerperimeter abgeleiteten Hinweise auf eindeutige Nachteile sind für das HAA-Lager in der Tab. 5.2-2 zusammengefasst. Fig. 5.2-2 zeigt für die verschiedenen Standortgebiete Histogramme mit der Anzahl Merkmale bzw. Indikatoren pro Bewertungsstufe und gibt auch einen raschen Überblick über die Verteilung der Stärken und Schwächen. Für den "massgebenden Fall" ergibt sich das folgende Bild:

Das Standortgebiet **Zürich Nordost** hat bei keinem der entscheiderelevanten Merkmale und Indikatoren eine relevante Schwäche; die vergleichsweise etwas tieferen Bewertungen der Indikatoren 'Tiefenlage unter Fels im Hinblick auf glaziale Tiefenerosion', 'Tiefenlage im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit (u.B. Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften)' und 'Geotechnische und hydrogeologische Verhältnisse in überlagernden Gesteinsformationen' werden wegen der insgesamt günstigen Tiefenlage und der insgesamt gesehen doch günstigen Bedingungen für die Zugangsbauwerke nach Untertage als unbedeutend eingestuft. Damit ergeben sich beim Standortgebiet Zürich Nordost keine eindeutigen Nachteile gegenüber den anderen Standortgebieten.

Das Standortgebiet **Nördlich Lägern** weist bezüglich des Merkmals 'Bautechnische Machbarkeit eines Tiefenlagers unter Berücksichtigung der vorgeschlagenen Standortareale' eine klare Schwäche auf, welche auf ausgeprägte Schwächen bei den Indikatoren 'Tiefenlage im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit (u.B. Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften)' und 'Platzangebot untertags' zurückzuführen ist. Diese Schwächen werden als eindeutige Nachteile des Standortgebiets Nördlich Lägern eingestuft, da die entsprechenden Bewertungen viel schlechter sind als diejenigen für die Standortgebiete Zürich Nordost und Jura Ost. Insbesondere das ungenügende Platzangebot in bevorzugter Tiefenlage wird als sehr kritisch beurteilt. Hingegen wird die wegen der Lage des Standortgebiets in der Vorfaltenzone vergleichsweise tiefere Bewertung beim Indikator 'Modellvorstellungen zur Langzeitentwicklung (Geodynamik und Neotektonik; weitere Prozesse)' nicht als eindeutiger Nachteil eingestuft. Auch die vergleichsweise tiefere Bewertung beim Indikator 'Geotechnische und hydrogeologische Verhältnisse in überlagernden Gesteinsformationen' wird nicht als eindeutiger Nachteil eingestuft, weil der Zugang nach Untertag auch bei grosser Tiefenlage zuverlässig und sicher gewährleistet werden kann.

Das Standortgebiet **Jura Ost** weist zwar bei den Indikatoren 'Mächtigkeit', 'Modellvorstellungen zur Langzeitentwicklung (Geodynamik und Neotektonik; weitere Prozesse)', 'Tiefenlage unter lokaler Erosionsbasis im Hinblick auf die Bildung neuer Rinnen' und 'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteins-Dekompaktion' im Vergleich mit den Standortgebieten Zürich Nordost und Nördlich Lägern deutlich tiefere, aber immer noch (teils knapp) günstige Bewertungen auf. Diese werden nicht als eindeutige Nachteile eingestuft. Die vergleichsweise tiefere Bewertung beim Indikator 'Mächtigkeit' ist auf die konzeptuelle Annahme einer beschränkten Barrierenwirkung der oberen Rahmengesteine zurückzuführen. Dies wird nicht als eindeutiger Nachteil eingestuft, da die gute Barrierenwirkung des Opalinustons und der unteren Rahmengesteine (Toniger Lias) davon unbeeinflusst bleibt. Weiter ist für Zeiten von deutlich mehr als 100'000 Jahren die Bildung von Durchbruchsrinnen zu betrachten (Indikatoren 'Modellvorstellungen zur Langzeitentwicklung (Geodynamik und Neotektonik; weitere Prozesse)' und 'Tiefenlage unter lokaler Erosionsbasis im Hinblick auf die Bildung neuer Rinnen'). Die Bildung einer solchen Durchbruchsrinne wird insgesamt jedoch als unwahrscheinlich beurteilt, kann aber später im Betrachtungszeitraum nicht vollständig ausgeschlossen werden. Die Dosisberechnungen unter Annahme einer Durchbruchsrinne¹⁹⁰ zeigen, dass auch bei Bildung einer Durchbruchsrinne das Schutzziel gemäss ENSI (G03, ENSI 2009) eingehalten wird. Der beschränkte Schutz vor Erosion wird deshalb in der Gesamtbeurteilung als deutlich weniger bedeutend beurteilt als der Nachteil des Standortgebiets Nördlich Lägern bezüglich der Tiefenlage im Hinblick auf die geotechnischen Bedingungen und dem damit verbundenen ungenügenden Platzangebot in bevorzugter Tiefenlage (Merkmal 'Bautechnische Machbarkeit eines Tiefenlagers unter Berücksichtigung der vorgeschlagenen Standortareale').

¹⁹⁰ Rechenfall 'Auswirkungen einer Durchbruchsrinne', wo als Folge einer angenommenen Durchbruchsrinne die Überdeckung abnimmt und die Durchlässigkeit zunimmt.

Tab. 5.2-2: Bewertung der entscheiderelevanten Merkmale und der zugehörigen Indikatoren für die Standortgebiete bzw. die zugehörigen Lagerperimeter für das HAA-Lager und die daraus abgeleiteten Hinweise auf eindeutige Nachteile (massgebender Fall für die Einengung).

Legende: Farben (abgestuft): rosa: ungünstig ($1 \leq x < 2$); gelb: bedingt günstig ($2 \leq x < 3$); hellgrün: günstig ($3 \leq x < 4$); dunkelgrün: sehr günstig ($4 \leq x \leq 5$). (x) bzw. (*) – Hinweis auf eindeutigen bzw. vertieft zu prüfenden Nachteil eines Lagerperimeters gegenüber einem anderen Lagerperimeter (Differenz von mindestens zwei bzw. einer Bewertungsstufe).

Die Bewertungen können auch als Stärken-Schwächen-Profile interpretiert werden: Dunkelgrün – *Stärke*, gelb und rosa – *Schwäche*, hellgrüne Felder: *indifferent* (weder Stärke noch Schwäche).

Nr.	Entscheiderelevante Merkmale (EM) / Entscheiderelevante Indikatoren (EI)	HAA- ZNO	HAA- NL	HAA- JO
a)	Wirksamkeit der geologischen Barriere	4.5	4.5	4.4
9	Hydraulische Durchlässigkeit	4.5	4.5	4.5
17	Art der Transportpfade und Ausbildung des Porenraums	4.5	4.5	4.5
20	Transmissivität präferenzzieller Freisetzungspfade	4.5	4.5	4.5
22	Selbstabdichtungsvermögen	4.5	4.5	4.5
18	Homogenität des Gesteinsaufbaus	4.5	4.5	4.5
5	Mächtigkeit	4.5	4.5	3.5 (*)
19	Länge der massgebenden Freisetzungspfade	4.5	4.5	4.5
16	Kolloide	4.5	4.5	4.5
b)	Langzeitstabilität der geologischen Barriere	3.5	3.5	3.1
23	Modellvorstellungen zur Langzeitentwicklung (Geodynamik und Neotektonik; weitere Prozesse)	4.3	3.5 (*)	3.1 (*)
22	Selbstabdichtungsvermögen	4.5	4.5	4.5
27	Potenzial zur Bildung neuer Wasserwegsamkeiten (Verkarstung)	4.5	4.5	4.5
28	Erosion im Betrachtungszeitraum	4.3	4.3	4.3
3	Tiefenlage unter lokaler Erosionsbasis im Hinblick auf die Bildung neuer Rinnen	4.1	4.7	3.1 (*)
2	Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteins-Dekompaktion	4.5	4.7	3.1 (*)
4	Tiefenlage unter Fels im Hinblick auf glaziale Tiefenerosion	3.5 (*)	4.3	4.1
24	Seismizität	3.5	3.5	3.5

Tab. 5.2-2: (Fortsetzung)

Nr.	Entscheidrelevante Merkmale (EM) / Entscheidrelevante Indikatoren (EI)	HAA- ZNO	HAA- NL	HAA- JO
c)	Explorier- und Charakterisierbarkeit der geologischen Barriere im Standortgebiet	4.4	4.4	4.4
39	Variabilität der Gesteinseigenschaften im Hinblick auf ihre Charakterisierbarkeit	4.5	4.5	4.5
43	Explorationsverhältnisse im geologischen Untergrund	4.3	4.3	4.3
d)	Bautechnische Machbarkeit eines Tiefenlagers unter Berücksichtigung der vorgeschlagenen Standortareale	3.3	1.3 (×)	3.9
1	Tiefenlage im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit (u.B. Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften)	3.5 (*)	2.1 (×)	4.1
48	Geotechnische und hydrogeologische Verhältnisse in überlagernden Gesteinsformationen	3.5 (*)	3.5 (*)	4.3
8	Platzangebot untertags	3.3	1.3 (×)	3.9

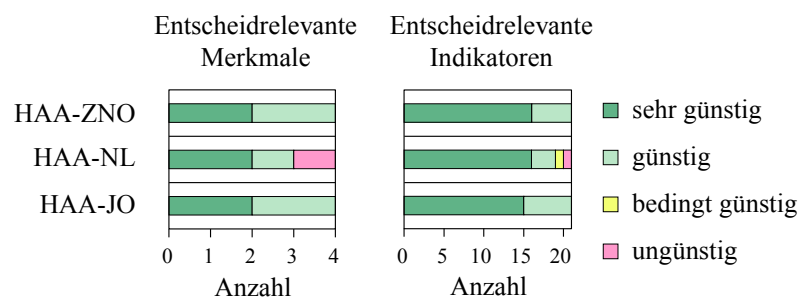


Fig. 5.2-2: Zusammenfassende Darstellung der Bewertungsergebnisse für die Standortgebiete bzw. die zugehörigen Lagerperimeter für das HAA-Lager (entscheidrelevante Merkmale und Indikatoren, massgebender Fall für die Einengung).

Die Histogramme zeigen die Anzahl Bewertungen für die verschiedenen Bewertungsstufen. Rosa und gelb können als Schwäche interpretiert werden, dunkelgrün als Stärke und hellgrün als indifferent. Damit können die Graphiken auch als Stärken-Schwächen-Profile verwendet werden.

Sensitivität der Bewertungen des 'massgebenden Falls für die Einengung' bezüglich alternativer Lagerperimeter und Konzeptualisierungen im Hinblick auf die Identifikation eindeutiger Nachteile

Die Ergebnisse der Bewertung der alternativen Lagerperimeter und der alternativen Konzeptualisierungen im Hinblick auf die Prüfung der Sensitivität sind in Anhang C (Tab. C.3-5 g – i und zugehörige Bewertungshistogramme) aufgeführt.

Insgesamt fallen die Bewertungen und die resultierenden Stärken-Schwächen-Profile für den massgebenden Lagerperimeter, für die alternativen Lagerperimeter und für die alternativen Konzeptualisierungen der Rahmengesteine in allen Standortgebieten für das HAA-Lager sehr ähnlich aus. Unterschiede ergeben sich bei den geometrischen Eigenschaften und Platzverhältnissen in den Lagerperimetern, d.h. sie beschränken sich auf die Indikatoren 'Mächtigkeit', 'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteins-Dekompaktion', 'Tiefenlage unter lokaler Erosionsbasis im Hinblick auf die Bildung neuer Rinnen', 'Tiefenlage unter Fels im Hinblick auf glaziale Tiefenerosion', 'Tiefenlage im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit (u.B. Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften)' und auf das 'Platzangebot untertags'.

In denjenigen Standortgebieten für das HAA-Lager, in denen es Ungewissheiten bezüglich der Qualität der oberen Rahmengesteine gibt (Standortgebiete Nördlich Lägern und Jura Ost), werden alternative Konzeptualisierungen zur Barrierenwirkung der oberen Rahmengesteine betrachtet. Dies betrifft eine geringer angenommene Wasserführung in der Passwang-Formation und in den Unteren Acuminata-Schichten im Standortgebiet Jura Ost sowie die Annahme einer mächtigeren wasserführenden Sandkalkabfolge an der Basis der oberen Rahmengesteine im Standortgebiet Nördlich Lägern (vgl. grün gestrichelte Linien in Fig. 3.1-3), was vereinfacht über eine alternative Beurteilung der Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs erfasst wird. Für das Standortgebiet Nördlich Lägern ergibt sich beim Indikator 'Mächtigkeit' vergleichsweise eine etwas tiefere, aber immer noch günstige Bewertung, was aber nicht als eindeutiger Nachteil eingestuft wird. Für das Standortgebiet Jura Ost ergibt sich für die alternative Konzeptualisierung eine knapp *sehr* günstige Bewertung. Die alternative Konzeptualisierung der oberen Rahmengesteine führt also zu keinen zusätzlichen eindeutigen Nachteilen.

Insgesamt ergibt sich also folgendes Bild:

Das Standortgebiet **Zürich Nordost** bietet auch für alternative Annahmen bei der Abgrenzung der Lagerperimeter und unter Berücksichtigung der Ungewissheiten bezüglich der Tiefenlage ein günstiges Platzangebot in bevorzugter Tiefenlage. Wie im "massgebenden Fall" sind auch bei den alternativen Lagerperimetern keine eindeutigen Nachteile des Standortgebiets Zürich Nordost gegenüber den anderen Standortgebieten zu verzeichnen, auch wenn die Bewertung bezüglich Bildung neuer Rinnen teilweise etwas tiefer ausfällt.

Auch für das Standortgebiet **Jura Ost**, welches mit gewissen Einschränkungen wegen der Sensitivität bezüglich der minimalen Tiefenlage ein (teilweise knapp) günstiges Platzangebot in bevorzugter Tiefenlage aufweist, ergeben sich wie im "massgebenden Fall" auch bei den alternativen Lagerperimetern keine eindeutigen Nachteile. Zwar können die Bedingungen bezüglich Erosion durch alternative Annahmen bei der Abgrenzung der Lagerperimeter punktuell etwas verbessert werden, allerdings zu Lasten des Platzangebots. Nur bei Annahme eines tiefer liegenden Wirtgesteins (Berücksichtigung der Ungewissheiten in der Tiefenlage) oder unter der Annahme, dass es innerhalb des Betrachtungszeitraums gar nicht zur Bildung einer Durchbruchrinne kommt, ergibt sich im Standortgebiet Jura Ost bezüglich Erosion eine vorteilhaftere Situation.

Beim Standortgebiet **Nördlich Lägern** kann auch bei Verwendung von alternativen Optimierungsanforderungen die angestrebte maximale Tiefe der Lagerebene von ca. 700 m u.T. nicht erreicht werden bzw. bleibt das Platzangebot in bevorzugter Tiefenlage ungenügend. Zwar können mit alternativen Annahmen bei der Abgrenzung der Lagerperimeter die Platzverhältnisse teilweise etwas verbessert werden, allerdings auf Kosten der bevorzugten maximalen Tiefenlage, d.h. mit ungünstigeren Bewertungen für den Indikator 'Tiefenlage im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit (u.B. Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften)'. So ergibt sich erst bei einer maximalen Tiefe von 900 m u. T. ein Lagerperimeter von

knapp ausreichender Grösse (vgl. Anhang B, Fig. B.8-5). Selbst unter der Annahme eines weniger tief liegenden Wirtgesteins (Berücksichtigung der Ungewissheiten in der Tiefenlage) kann die angestrebte maximale Tiefe nicht erreicht werden (vgl. Anhang B, Fig. B.8-9). Die für den "massgebenden Fall" identifizierten eindeutigen Nachteile des Standortgebiets Nördlich Lägern bleiben auch für alternative Annahmen bei der Abgrenzung der Lagerperimeter und unter Berücksichtigung der Ungewissheiten bezüglich der Tiefenlage bestehen.

Insgesamt zeigen die Bewertungen der alternativen Lagerperimeter und Konzeptualisierungen für das HAA-Lager, dass die mit dem "massgebenden Fall" identifizierten eindeutigen Nachteile belastbar sind, d.h. dass diese auch bei Verwendung von alternativen Annahmen bei der Abgrenzung der Lagerperimeter sowie von alternativen Konzeptualisierungen grundsätzlich bestehen bleiben bzw. bestätigt werden.

'Outranking-Methode' für die entscheiderelevanten Merkmale und zugehörigen Indikatoren sowie Hinweise auf eindeutige Nachteile für den 'massgebenden Fall für die Einengung'

Die Stärke- und Schwäche-Präferenzflüsse und die daraus abgeleiteten Hinweise auf eindeutige Nachteile der Standortgebiete bzw. der zugehörigen Lagerperimeter für das HAA-Lager sind in Tab. C.3-6 für den "massgebenden Fall" zusammengefasst. Zusätzlich werden in Fig. C.3-1 die Beiträge der entscheiderelevanten Merkmale zu den Schwäche-Präferenzflüssen denjenigen der Stärke-Präferenzflüsse für die verschiedenen Standortgebiete gegenübergestellt. Für den "massgebenden Fall" ergeben sich bei der 'Outranking-Methode' keine zusätzlichen Hinweise auf eindeutige Nachteile. Insgesamt bestätigen die Resultate der 'Outranking-Methode' die aus dem direkten Vergleich ermittelten eindeutigen Nachteile (vgl. Diskussion der Einstufung der tieferen, aber immer noch knapp günstigen Bewertungen für das Standortgebiet Jura Ost beim entscheiderelevanten Merkmal 'Langzeitstabilität der geologischen Barriere' beim direkten Vergleich der Bewertungen) und ergeben keine zusätzlichen eindeutigen Nachteile, vgl. dazu auch Tab. 5.2-4.

Malus-Bilanzierung für die entscheiderelevanten Merkmale und zugehörigen Indikatoren sowie Hinweise auf eindeutige Nachteile für den 'massgebenden Fall für die Einengung'

Die Malus-Bilanzierung und die daraus abgeleiteten Hinweise auf eindeutige Nachteile der Standortgebiete bzw. der zugehörigen Lagerperimeter für das HAA-Lager sind in Tab. C.3-7 zusammengefasst. Für den "massgebenden Fall" ergeben sich auch bei der Malus-Bilanzierung mit einer Ausnahme keine zusätzlichen Hinweise auf eindeutige Nachteile. Die Ausnahme betrifft das Merkmal 'Langzeitstabilität der geologischen Barriere' für das HAA-Standortgebiet Jura Ost; dies wird aber wie bei den zugeordneten Indikatoren nicht als eindeutiger Nachteil eingestuft (vgl. die beim direkten Vergleich der Bewertungen geführte Diskussion). Insgesamt bestätigen die Resultate der Malus-Bilanzierung die aus dem direkten Vergleich ermittelten eindeutigen Nachteile; es ergeben sich keine zusätzlichen eindeutigen Nachteile, vgl. dazu auch Tab. 5.2-4.

5.2.2 Zusammenfassung der eindeutigen Nachteile der Standortgebiete

Die Hinweise auf eindeutige Nachteile von Standortgebieten bzw. zugehörigen Lagerperimetern für die drei Vergleichs-Methoden sind in der Tab. 5.2-3 für das SMA-Lager und in der Tab. 5.2-4 für das HAA-Lager für den "massgebenden Fall" zusammengefasst. In Kap. 5.2.1 wurde zunächst anhand des direkten Vergleichs der Bewertungen für die entscheiderelevanten

Merkmale und zugehörigen Indikatoren argumentativ dargelegt, welche dieser Hinweise tatsächlich als eindeutige Nachteile eingestuft werden. Anschliessend wurde geprüft, ob die beiden alternativen Vergleichs-Methoden ('Outranking-Methode', 'Malus-Bilanzierung') weitere Hinweise auf eindeutige Nachteile aufzeigen und ob diese gegebenenfalls als eindeutige Nachteile einzustufen sind. Weiter wurde auch geprüft, ob alternative Annahmen bei der Abgrenzung der Lagerperimeter bzw. alternative Konzeptualisierungen der Rahmengesteine zu anderen Entscheidungen führen würden. Die Befunde dieser Beurteilungen und Prüfungen werden im Folgenden zusammengefasst.

5.2.2.1 SMA-Lager

Bei den Standortgebieten für das SMA-Lager ergibt sich hinsichtlich eindeutiger Nachteile das folgende Bild:

Für das Standortgebiet **Südranden** ergeben sich mehrere eindeutige Nachteile beim Vergleich mit den bestbewerteten Standortgebieten. Ein eindeutiger Nachteil ist beim Merkmal 'Langzeitstabilität der geologischen Barriere' festzustellen; dieser ergibt sich aus den Schwächen des Standortgebiets aufgrund der vergleichsweise geringen Tiefenlage des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs und der damit verbundenen ungenügenden Überdeckung der oberen Rahmengesteine ('Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteins-Dekompaktion') und der Exponiertheit bezüglich langfristiger Erosion infolge einer möglichen Bildung von Durchbruchsrinnen, inkl. deren möglichen späteren glazialen Übertiefung (Indikatoren 'Modellvorstellungen zur Langzeitentwicklung (Geodynamik und Neotektonik; weitere Prozesse)', 'Tiefenlage unter lokaler Erosionsbasis im Hinblick auf die Bildung neuer Rinnen' und 'Tiefenlage unter Fels im Hinblick auf glaziale Tiefenerosion'). Bei allen diesen Indikatoren ergeben sich eindeutige Nachteile im Vergleich mit Standortgebieten, in denen der einschlusswirksame Gebirgsbereich eine grössere Tiefenlage und damit einen besseren Schutz vor langfristiger Erosion gewährleistet. Ein weiterer eindeutiger Nachteil wird beim Merkmal 'Bautechnische Machbarkeit eines Tiefenlagers unter Berücksichtigung der vorgeschlagenen Standortareale' aufgrund des sehr knappen Platzangebots in bevorzugter Tiefenlage (Indikator 'Platzangebot untertags') verzeichnet.

Das Standortgebiet **Zürich Nordost** weist keine eindeutigen Nachteile gegenüber den anderen Standortgebieten auf. Die etwas tieferen Bewertungen der Indikatoren 'Tiefenlage im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit (u.B. Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften)' und 'Geotechnische und hydrogeologische Verhältnisse in überlagernden Gesteinsformationen' werden wegen der mässigen Tiefe und der insgesamt gesehen günstigen Bedingungen für die Zugangsbauwerke nach Untertage als unbedeutend eingestuft.

Das Standortgebiet **Nördlich Lägern** weist beim Vergleich mit den bestbewerteten Standortgebieten einen stark ausgeprägten eindeutigen Nachteil beim Merkmal 'Bautechnische Machbarkeit eines Tiefenlagers unter Berücksichtigung der vorgeschlagenen Standortareale' auf; dieser ist auf das ungenügende Platzangebot in bevorzugter Tiefenlage zurückzuführen (eindeutige Nachteile bei den Indikatoren 'Tiefenlage im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit (u.B. Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften)' und 'Platzangebot untertags').

Das Standortgebiet **Jura Ost** weist keine eindeutigen Nachteile gegenüber den anderen Standortgebieten auf. Die etwas tieferen Bewertungen der Indikatoren 'Tiefenlage im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit (u.B. Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften)' und 'Mächtigkeit' werden wegen der mässigen Tiefe und der insgesamt günstigen Barrierenwirkung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs als unbedeutend eingestuft.

Im Standortgebiet **Jura-Südfuss** ergeben sich beim Vergleich mit den bestbewerteten Standortgebieten die folgenden eindeutigen Nachteile. Ein erster eindeutiger Nachteil betrifft die klar geringere Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (Indikator 'Mächtigkeit'); dies ist auf die ungünstigen Eigenschaften der unteren Rahmengesteine zurückzuführen, die aufgrund des Kalkigen Lias nicht als zuverlässig nutzbare Barriere eingestuft werden können, in Kombination mit der konzeptuell begründeten Annahme einer beschränkten Barrierenwirkung der oberen Rahmengesteine und dem weniger mächtigen Opalinuston¹⁹¹. Der zweite eindeutige Nachteil betrifft das im Vergleich zu den bestbewerteten Standortgebieten knappe Platzangebot in bevorzugter Tiefenlage (Indikator 'Platzangebot untertags'), da als Folge der erwarteten tektonischen Überprägung (vgl. Indikator 'Modellvorstellungen zur Langzeitentwicklung (Geodynamik und Neotektonik; weitere Prozesse)') erhebliche Platzreserven einzuplanen sind. Die anspruchsvollere Erschliessung der Untertageanlagen (Durchörterung Malmkalke und Haupttrogenstein-Formation; Indikator 'Geotechnische und hydrogeologische Verhältnisse in überlagernden Gesteinsformationen') führt zwar zu einer bedingt günstigen Bewertung; stellt aber den zuverlässigen und sicheren Zugang nach Untertag nicht in Frage und wird deshalb nicht als eindeutiger Nachteil eingestuft.

Das Standortgebiet **Wellenberg** weist bei drei von vier entscheiderelevanten Merkmalen und bei zahlreichen der zugeordneten Indikatoren eindeutige Nachteile auf. Dies betrifft einerseits das Merkmal 'Wirksamkeit der geologischen Barriere' und fast alle zugeordneten Indikatoren, mit Ausnahme der Indikatoren 'Mächtigkeit' und 'Länge der massgebenden Freisetzungspfade'. Weiter weist das Standortgebiet Wellenberg bezüglich des Merkmals 'Langzeitstabilität der geologischen Barriere' einen eindeutigen Nachteil auf, welcher auf ein vergleichsweise geringeres Selbstabdichtungsvermögen (Indikator 'Selbstabdichtungsvermögen'), aber auch auf die geodynamischen und neotektonischen Verhältnisse (Indikatoren 'Modellvorstellungen zur Langzeitentwicklung (Geodynamik und Neotektonik; weitere Prozesse)' und 'Seismizität') zurückzuführen ist. Hingegen werden die erhöhten langfristigen Hebungs-/Erosionsraten im Alpenraum (Indikator 'Erosion im Betrachtungszeitraum') nicht als eindeutiger Nachteil eingestuft, da im Standortgebiet Wellenberg grundsätzlich die Möglichkeit besteht, die Lagerkammern in grosser Tiefe anzuordnen und so vor den langfristigen Auswirkungen der Erosion zu schützen. Ferner weist das Standortgebiet einen eindeutigen Nachteil beim Merkmal 'Explorier- und Charakterisierbarkeit der geologischen Barriere im Standortgebiet' auf, da sich die Exploration des Wirtgesteinskörpers im Standortgebiet Wellenberg (Abstand zum Nebengestein, Lokalisierung von anordnungsbestimmenden Störungszonen und Fremdgesteinseinschlüssen) und die Charakterisierung der Mergelvorkommen im Vergleich mit den anderen Standortgebieten erheblich schwieriger gestaltet und deutlich weniger zuverlässige Resultate zu erwarten sind (Indikatoren 'Explorationsverhältnisse im geologischen Untergrund' und 'Variabilität der Gesteinseigenschaften im Hinblick auf ihre Charakterisierbarkeit'). Die Tiefenlage im Hinblick auf die bautechnische Machbarkeit wird zwar als bedingt günstig, aber nicht als eindeutiger Nachteil eingestuft, da die Erstellung und der Betrieb der Lagerkammern angesichts der im Vergleich mit dem Opalinuston höheren Gesteinsfestigkeiten auch in grösseren Tiefen zuverlässig und sicher gewährleistet werden können. Schliesslich fällt das Platzangebot im Standortgebiet Wellenberg insgesamt knapp aus, was aber ebenfalls nicht als eindeutiger Nachteil eingestuft wird, weil die Lagerkammern grundsätzlich mehrstöckig angeordnet werden können.

¹⁹¹ Im Standortgebiet Jura Ost ist zwar auch von einer erhöhten Durchlässigkeit der oberen Rahmengesteine auszugehen; hingegen weisen dort die unteren Rahmengesteine eine bessere Qualität auf und der Opalinuston liegt in grösserer Mächtigkeit vor.

5.2.2.2 HAA-Lager

Bei den Standortgebieten für das HAA-Lager ergibt sich hinsichtlich eindeutiger Nachteile das folgende Bild:

Das Standortgebiet **Zürich Nordost** weist keine eindeutigen Nachteile gegenüber den anderen Standortgebieten auf. Die im Vergleich mit dem Standortgebiet Jura Ost etwas tieferen Bewertungen der Indikatoren 'Tiefenlage unter Fels im Hinblick auf glaziale Tiefenerosion', 'Tiefenlage im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit (u.B. Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften)' und 'Geotechnische und hydrogeologische Verhältnisse in überlagernden Gesteinsformationen' werden wegen der insgesamt günstigen Tiefenlage und der insgesamt gesehen doch günstigen Bedingungen für die Zugangsbauwerke nach Untertage als unbedeutend eingestuft.

Das Standortgebiet **Nördlich Lägern** weist beim Vergleich mit den Standortgebieten Zürich Nordost und Jura Ost einen ausgeprägten eindeutigen Nachteil beim Merkmal 'Bautechnische Machbarkeit eines Tiefenlagers unter Berücksichtigung der vorgeschlagenen Standortareale' auf; dieser ist auf das ungenügende Platzangebot in bevorzugter Tiefenlage zurückzuführen (eindeutige Nachteile bei den Indikatoren 'Tiefenlage im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit (u.B. Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften)' und 'Platzangebot untertags'). In grösseren Tiefen wäre das Platzangebot zwar etwas grösser, aber die geotechnischen Bedingungen wären noch ungünstiger und liessen eine erhebliche Beeinträchtigung des Barrierensystems erwarten, welche klar ausserhalb des bevorzugten Bereichs liegt.

Das Standortgebiet **Jura Ost** weist zwar beim Merkmal 'Langzeitstabilität der geologischen Barriere' und bei den drei zugeordneten Indikatoren 'Modellvorstellungen zur Langzeitentwicklung (Geodynamik und Neotektonik; weitere Prozesse)', 'Tiefenlage unter lokaler Erosionsbasis im Hinblick auf die Bildung neuer Rinnen' und 'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteins-Dekompaktion' im Vergleich mit den Standortgebieten Zürich Nordost und Nördlich Lägern deutlich tiefere, aber immer noch knapp günstige Bewertungen auf. Diese tieferen Bewertungen werden nicht als eindeutige Nachteile eingestuft. Zwar kann langfristig die Bildung einer Durchbruchrinne nicht vollständig ausgeschlossen werden (Indikatoren 'Modellvorstellungen zur Langzeitentwicklung (Geodynamik und Neotektonik; weitere Prozesse)', 'Tiefenlage unter lokaler Erosionsbasis im Hinblick auf die Bildung neuer Rinnen'), eine solche wird jedoch voraussichtlich erst in einigen 100'000 Jahren an Relevanz gewinnen bzw. innerhalb des Betrachtungszeitraums eventuell gar nie gebildet. Die Dosisberechnungen unter Annahme einer Durchbruchrinne¹⁹² zeigen, dass auch bei der Bildung einer Durchbruchrinne das Schutzziel gemäss ENSI (G03, ENSI 2009) eingehalten wird. Der beschränkte Schutz vor Erosion wird deshalb in der Gesamtbeurteilung als deutlich weniger bedeutend beurteilt als der Nachteil des Standortgebiets Nördlich Lägern bezüglich der Tiefenlage im Hinblick auf die geotechnischen Bedingungen und das damit verbundene ungenügende Platzangebot in bevorzugter Tiefenlage (Merkmal 'Bautechnische Machbarkeit eines Tiefenlagers unter Berücksichtigung der vorgeschlagenen Standortareale').

¹⁹² Rechenfall 'Auswirkungen einer Durchbruchrinne', wo als Folge einer angenommenen Durchbruchrinne die Überdeckung abnimmt und die Durchlässigkeit zunimmt.

Tab. 5.2-3: Zusammenfassung der Hinweise auf eindeutige Nachteile und daraus abgeleitete eindeutige Nachteile der Standortgebiete und zugehörigen Lagerperimeter auf Stufe der entscheiderelevanten Merkmale und der zugehörigen Indikatoren für das SMA-Lager (massgebender Fall für die Einengung).

Legende:

× – Hinweis auf einen eindeutigen Nachteil eines Lagerperimeters gegenüber den anderen Lagerperimetern aus dem direkten Vergleich der Bewertungen.

(*) – zusätzlicher Hinweis auf eindeutigen Nachteil eines Lagerperimeters gegenüber den anderen Lagerperimetern aus dem direkten Vergleich der Bewertungen.

– Hinweis auf zu prüfenden Nachteil eines Lagerperimeters gegenüber den anderen Lagerperimetern aus der Outranking-Methode.

° – Hinweis auf zu prüfenden Nachteil eines Lagerperimeters gegenüber den anderen Lagerperimetern aus der Malus-Bilanzierung.

Rosa markierte Felder: als eindeutige Nachteile eingestuft.

Entscheidungsrelevante Merkmale und zugehörige Indikatoren	Hinweise auf eindeutige Nachteile des Standortgebiets Südranden (SMA-Lager)			Hinweise auf eindeutige Nachteile des Standortgebiets Zürich Nordost (SMA-Lager)			Hinweise auf eindeutige Nachteile des Standortgebiets Nördlich Lägern (SMA-Lager)		
	Direkter Vergleich	'Outranking- Methode'	Malus- Bilanzierung	Direkter Vergleich	'Outranking- Methode'	Malus- Bilanzierung	Direkter Vergleich	'Outranking- Methode'	Malus- Bilanzierung
Explorier- und Charakterisierbarkeit der geologischen Barriere im Standortgebiet									
Variabilität der Gesteinseigenschaften im Hinblick auf ihre Charakterisierbarkeit									
Explorationsverhältnisse im geologischen Untergrund									
Bautechnische Machbarkeit eines Tiefenlagers unter Berücksichtigung der vorgeschlagenen Standortareale			◦				×	#	◦
Tiefenlage im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit (u.B. Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften)				(*)			×	#	◦
Geotechnische und hydrogeologische Verhältnisse in überlagernden Gesteinsformationen	(*)			(*)			(*)		
Platzangebot untertags	(*)		◦				×	#	◦

Tab. 5.2-3: Fortsetzung

Tab. 5.2-3: Fortsetzung

Entscheidungsrelevante Merkmale und zugehörige Indikatoren	Hinweise auf eindeutige Nachteile des Standortgebiets Jura Ost (SMA-Lager)			Hinweise auf eindeutige Nachteile des Standortgebiets Jura-Südfuss (SMA-Lager)			Hinweise auf eindeutige Nachteile des Standortgebiets Wellenberg (SMA-Lager)		
	Direkter Vergleich	'Outranking- Methode'	Malus- Bilanzierung	Direkter Vergleich	'Outranking- Methode'	Malus- Bilanzierung	Direkter Vergleich	'Outranking- Methode'	Malus- Bilanzierung
Wirksamkeit der geologischen Barriere							(*)	#	
Hydraulische Durchlässigkeit							(*)		
Art der Transportpfade und Ausbildung des Porenraums							(*)	#	o
Transmissivität präferenzierter Freisetzungspfade							(*)	#	o
Selbstabdichtungsvermögen							x	#	o
Homogenität des Gesteinsaufbaus							x	#	o
Mächtigkeit	(*)			x	#	o			
Länge der massgebenden Freisetzungspfade									
Kolloide							x	#	o
Langzeitstabilität der geologischen Barriere							(*)		o
Modellvorstellungen zur Langzeitent- wicklung (Geodynamik und Neotektonik; weitere Prozesse)				(*)			x	#	o
Selbstabdichtungsvermögen							x	#	o
Potenzial zur Bildung neuer Wasser- wegsamkeiten (Verkarstung)									
Erosion im Betrachtungszeitraum							(*)	#	
Tiefenlage unter lokaler Erosionsbasis im Hinblick auf die Bildung neuer Rinnen									
Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteins-Dekompaktion									
Tiefenlage unter Fels im Hinblick auf glaziale Tiefenerosion									
Seismizität							(*)	#	o

Entscheidungsrelevante Merkmale und zugehörige Indikatoren	Hinweise auf eindeutige Nachteile des Standortgebiets Jura Ost (SMA-Lager)			Hinweise auf eindeutige Nachteile des Standortgebiets Jura-Südfuss (SMA-Lager)			Hinweise auf eindeutige Nachteile des Standortgebiets Wellenberg (SMA-Lager)		
	Direkter Vergleich	'Outranking-Methode'	Malus-Bilanzierung	Direkter Vergleich	'Outranking-Methode'	Malus-Bilanzierung	Direkter Vergleich	'Outranking-Methode'	Malus-Bilanzierung
Explorier- und Charakterisierbarkeit der geologischen Barriere im Standortgebiet							×	#	°
Variabilität der Gesteinseigenschaften im Hinblick auf ihre Charakterisierbarkeit							×	#	°
Explorationsverhältnisse im geologischen Untergrund							×	#	°
Bautechnische Machbarkeit eines Tiefenlagers unter Berücksichtigung der vorgeschlagenen Standortareale				(*)		°	(*)		°
Tiefenlage im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit (u.B. Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften)	(*)			(*)			×		
Geotechnische und hydrogeologische Verhältnisse in überlagernden Gesteinsformationen				×		°			
Platzangebot untertags				(*)			(*)		°

Tab. 5.2-3: Fortsetzung

Tab. 5.2-4: Zusammenfassung der Hinweise auf eindeutige Nachteile und daraus abgeleitete eindeutige Nachteile der Standortgebiete und zugehörigen Lagerperimeter auf Stufe der entscheidrelevanten Merkmale und der zugehörigen Indikatoren für das HAA-Lager (massgebender Fall für die Einengung).

Legende:

× – Hinweis auf einen eindeutigen Nachteil eines Lagerperimeters gegenüber den anderen Lagerperimetern aus dem direkten Vergleich der Bewertungen.

(*) – zusätzlicher Hinweis auf eindeutigen Nachteil eines Lagerperimeters gegenüber den anderen Lagerperimetern aus dem direkten Vergleich der Bewertungen.

– Hinweis auf zu prüfenden Nachteil eines Lagerperimeters gegenüber den anderen Lagerperimetern aus der Outranking-Methode.

° – Hinweis auf zu prüfenden Nachteil eines Lagerperimeters gegenüber den anderen Lagerperimetern aus der Malus-Bilanzierung.

Rosa markierte Felder: als eindeutige Nachteile eingestuft.

Entscheidungsrelevante Merkmale und zugehörige Indikatoren	Hinweise auf eindeutige Nachteile des Standortgebiets Zürich Nordost (HAA-Lager)			Hinweise auf eindeutige Nachteile des Standortgebiets Nördlich Lägern (HAA-Lager)			Hinweise auf eindeutige Nachteile des Standortgebiets Jura Ost (HAA-Lager)		
	Direkter Vergleich	'Outranking- Methode'	Malus- Bilanzierung	Direkter Vergleich	'Outranking- Methode'	Malus- Bilanzierung	Direkter Vergleich	'Outranking- Methode'	Malus- Bilanzierung
Wirksamkeit der geologischen Barriere									
Hydraulische Durchlässigkeit									
Art der Transportpfade und Ausbildung des Porenraums									
Transmissivität präferenzierter Freisetzungspfade									
Selbstabdichtungsvermögen									
Homogenität des Gesteinsaufbaus									
Mächtigkeit							(*)	#	
Länge der massgebenden Freisetzungspfade									
Kolloide									
Langzeitstabilität der geologischen Barriere									°
Modellvorstellungen zur Langzeitent- wicklung (Geodynamik und Neotektonik; weitere Prozesse)				(*)			(*)		°
Selbstabdichtungsvermögen									
Potenzial zur Bildung neuer Wasser- wegsamkeiten (Verkarstung)									
Erosion im Betrachtungszeitraum									
Tiefenlage unter lokaler Erosions- basis im Hinblick auf die Bildung neuer Rinnen							(*)	#	°
Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteins-Dekompaktion							(*)	#	°
Tiefenlage unter Fels im Hinblick auf glaziale Tiefenerosion	(*)								
Seismizität									

Tab. 5.2-4: Fortsetzung

Tab. 5.2-4: Fortsetzung

Entscheidungsrelevante Merkmale und zugehörige Indikatoren	Hinweise auf eindeutige Nachteile des Standortgebiets Zürich Nordost (HAA-Lager)			Hinweise auf eindeutige Nachteile des Standortgebiets Nördlich Lägern (HAA-Lager)			Hinweise auf eindeutige Nachteile des Standortgebiets Jura Ost (HAA-Lager)		
	Direkter Vergleich	'Outranking- Methode'	Malus- Bilanzierung	Direkter Vergleich	'Outranking- Methode'	Malus- Bilanzierung	Direkter Vergleich	'Outranking- Methode'	Malus- Bilanzierung
Explorier- und Charakterisierbarkeit der geologischen Barriere im Standortgebiet									
Variabilität der Gesteinseigenschaften im Hinblick auf ihre Charakterisierbarkeit									
Explorationsverhältnisse im geologischen Untergrund									
Bautechnische Machbarkeit eines Tiefenlagers unter Berücksichtigung der vorgeschlagenen Standortareale				×	#	◦			
Tiefenlage im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit (u.B. Gesteins- festigkeiten und Verformungseigen- schaften)	(*)			×	#	◦			
Geotechnische und hydrogeologische Verhältnisse in überlagernden Gesteinsformationen	(*)			(*)					
Platzangebot untertags				×	#	◦			

5.3 Vergleichende Gesamtbewertung der geologischen Standortgebiete unter Berücksichtigung aller Informationen

Im vorliegenden Kapitel werden die vergleichende Gesamtbewertung und der sicherheitstechnische Vergleich der geologischen Standortgebiete durchgeführt. Dabei handelt es sich um eine Zusammenstellung und zusammenfassende Auswertung aller Ergebnisse, mit dem Ziel, diejenigen geologischen Standortgebiete zu identifizieren, welche für die weiteren Untersuchungen für Etappe 3 vorzusehen sind. Dazu werden die Ergebnisse aller Bewertungsschritte hinsichtlich der Frage ausgewertet, welche geologischen Standortgebiete in der Gesamtschau am ungünstigsten abschneiden und deshalb zurückzustellen sind. Zu diesem Zweck werden die vier in ENSI (2013a) aufgeführten Fragen verwendet. Diese Fragen lauten wie folgt (vgl. Fig. 2.1-1):

1. Erfüllen Standortgebiete das Dosis-Schutzkriterium nicht?
2. Sind Standortgebiete aufgrund der Ergebnisse der Dosis-Berechnungen eindeutig weniger geeignet?
3. Sind die Gesamtbewertungen der Standortgebiete schlechter als "geeignet"?
4. Können bei Standortgebieten anhand der Kriterien zur Sicherheit und technischen Machbarkeit belastbare eindeutige Nachteile gegenüber anderen Standortgebieten festgestellt werden?

Werden für ein geologisches Standortgebiet eine oder mehrere dieser vier Fragen mit "ja" beantwortet, dann wird das Standortgebiet zurückgestellt. Andernfalls wird es für die weiteren Untersuchungen für Etappe 3 vorgeschlagen.

In Übereinstimmung mit ENSI (2013c) wird zusätzlich geprüft, ob die bautechnischen Risikoanalysen bzw. die ergänzenden Sicherheitsbetrachtungen für die einzelnen Standortgebiete konkrete Hinweise liefern, welche die Machbarkeit der Zugangsbauwerke und der Untertagebauten sowie den sicheren Betrieb der Zugangsbauwerke in Frage stellen und so die Überprüfung der Wahl der Standortareale nach sich ziehen würden. Wie in den vorangegangenen Kapiteln ausgeführt wurde, ist dies jedoch nicht der Fall: Die technische Machbarkeit der Zugangsbauwerke und Untertageanlagen kann trotz Unterschiede im Ausmass der erwarteten geologischen Erschwernisse für alle Standortgebiete und für die zugehörigen Standortareale als gegeben betrachtet werden und der sichere Betrieb der Zugangsbauwerke ist gewährleistet (vgl. Nagra 2014 c, d).

In ENSI (2013b) wird ferner darauf hingewiesen, dass in Zusammenhang mit den Vorschlägen für die für Etappe 3 weiter zu untersuchenden Standortgebiete auch die aus Sicht der KNS und der AG SiKa/KES gestellten Fragen und gemachten Hinweise anzusprechen sind; diese im ENSI-Dokument formulierten Fragen sind zusammen mit den diesbezüglichen Erläuterungen der Nagra am Ende dieses Kapitels aufgeführt.

Zur Erfüllung des Dosis-Schutzkriteriums durch die Standortgebiete (Frage 1): Die Resultate in Fig. 5.3-1 und Fig. 5.3-2 zeigen, dass alle geologischen Standortgebiete für das SMA- und HAA-Lager sicherheitstechnisch geeignet sind, weil für alle Standortgebiete der obere Rand des charakteristischen Dosisintervalls unterhalb des Schutzkriteriums 1 der Richtlinie G03 (ENSI 2009) von 0.1 mSv/a liegt.

Zur Gleichwertigkeit der Standortgebiete bezüglich der Dosis-Berechnungen (Frage 2): Die Standortgebiete sind gemäss ENSI (2010a) als sicherheitstechnisch gleichwertig zu betrachten, weil der obere Rand der Dosisintervalle für alle Standortgebiete unterhalb von 0.01 mSv/a liegt. Bei den Dosisintervallen sind jedoch insbesondere beim SMA-Lager deutliche Unterschiede auszumachen: So liegt der obere Rand des Dosisintervalls für das Standortgebiet Wellenberg

knapp unterhalb von 0.01 mSv/a, während er bei den Standortgebieten Südranden, Jura Ost und Jura-Südfuss um mehr als eine Grössenordnung und bei den Standortgebieten Zürich Nordost und Nördlich Lägern um etwa 3 Grössenordnungen unterhalb von 0.01 mSv/a liegt. Beim HAA-Lager sind die Unterschiede zwischen den verschiedenen Standortgebieten weniger ausgeprägt.

Damit werden die Fragen 1 und 2 für alle Standortgebiete für das SMA- und HAA-Lager (inkl. Kombilager) mit "nein" beantwortet, d.h. alle Standortgebiete qualifizieren sich für die weitere Bewertung (qualitative Bewertung).

Zu den Gesamtbewertungen der Standortgebiete (Frage 3): Die qualitative Bewertung ergibt für alle Standortgebiete für das SMA- und HAA-Lager mindestens die Gesamtbewertung "geeignet", im Falle der Standortgebiete Zürich Nordost und Jura Ost für beide Lagertypen sogar die Gesamtbewertung "sehr geeignet" (vgl. Tab. 4.4-1 und 4.4-2). Damit wird Frage 3 ebenfalls für alle Standortgebiete für das SMA- und HAA-Lager mit "nein" beantwortet, sodass sich alle Standortgebiete für die weitere Bewertung qualifizieren (Identifikation eindeutiger Nachteile durch den sicherheitstechnischen Vergleich).

Die Resultate der Dosisberechnungen und der qualitativen Bewertung zeigen, dass alle in Etappe 1 vorgeschlagenen Standortgebiete von guter Qualität sind und dass dort grundsätzlich sichere geologische Tiefenlager erstellt werden könnten.

Zu eindeutigen Nachteilen von Standortgebieten (Frage 4): Basierend auf den in Kap. 4 abgegrenzten optimierten Lagerperimetern und ihrer Bewertung wurde in Kap. 5.2 detailliert aufgezeigt, dass die Standortgebiete Südranden, Nördlich Lägern, Jura-Südfuss und Wellenberg für das SMA-Lager und das Standortgebiet Nördlich Lägern für das HAA-Lager gegenüber den anderen Standortgebieten des gleichen Lagertyps eindeutige Nachteile aufweisen. Die Frage, welche sich auf das Vorhandensein von eindeutigen Nachteilen bezieht, kann deshalb für diese Standortgebiete mit "ja" beantwortet werden. Dies führt dazu, dass die geologischen Standortgebiete Südranden, Nördlich Lägern, Jura-Südfuss und Wellenberg für das SMA-Lager und das Standortgebiet Nördlich Lägern für das HAA-Lager zurückgestellt werden.

Nach der Einengung verbleiben somit zwei geologische Standortgebiete je für das SMA-Lager und das HAA-Lager, welche für die weiteren Untersuchungen für Etappe 3 vorgeschlagen werden.

Es sind dies für das SMA-Lager die geologischen Standortgebiete

- Zürich Nordost (ZH, TG) mit dem Standortareal ZNO-6b und
- Jura Ost (AG) mit dem Standortareal JO-3+

und für das HAA-Lager die Standortgebiete

- Zürich Nordost (ZH, TG) mit dem Standortareal ZNO-6b und
- Jura Ost (AG) mit dem Standortareal JO-3+.

Eine Analyse der vorhandenen Informationen (Dosisberechnungen und charakteristische Dosisintervalle für das Kombilager sowie die Platzverhältnisse in den Standortgebieten) zeigen, dass in diesen beiden Standortgebieten zudem auch die Möglichkeit für ein Kombilager besteht. Die charakteristischen Dosisintervalle für das Kombilager in den Standortgebieten Zürich Nordost und Jura Ost fallen ähnlich aus wie für das HAA-Lager in den entsprechenden Standortgebieten (Fig. 5.3-2). Die charakteristischen Dosisintervalle zeigen, dass die Standortgebiete Zürich Nordost und Jura Ost auch für das Kombilager sicherheitstechnisch geeignet und darüber hinaus

sicherheitstechnisch gleichwertig sind. Die in Kap. 4.2 abgegrenzten Lagerperimeter (modellhaft modifizierte massgebende Lagerperimeter für das Standortgebiet Zürich Nordost (Fig. 4.2-13 und Fig. 4.2-20) und für das Standortgebiet Jura Ost (Fig. 4.2-16 und Fig. 4.2-23) zeigen, dass in den Standortgebieten Zürich Nordost und Jura Ost grundsätzlich auch für ein Kombilager ein ausreichendes Platzangebot in bevorzugter Tiefenlage besteht; die Lagerkammern für das SMA- und HAA-Teillager können räumlich getrennt angeordnet werden (vgl. Fig. 5.3-3 und Fig. 5.3-4).

Neben den für die Ableitung der Vorschläge verwendeten Fragen gemäss ENSI (2013a) werden die abgeleiteten Vorschläge nachfolgend auch anhand der Fragen der KNS und der Hinweise der AG SiKa/KES beurteilt, die in ENSI (2014b) wie folgt formuliert wurden:

- Sind geringdurchlässige homogene Wirtgesteinskörper von ausreichender Mächtigkeit und lateraler Ausdehnung vorhanden? Liegen diese Wirtgesteinskörper in geeigneter Tiefe?
- Gibt es unmittelbar angrenzend an diese Wirtgesteinskörper Aquifere?
- Besteht eine Gefährdung der Langzeitsicherheit durch Neotektonik oder Erosion?
- Was sind die Schlussfolgerungen der Nagra aus der Analyse der neugewonnenen Seismikmessungen?
- Sind die Mindestanforderungen und die verschärften Anforderungen aus Etappe 1 SGT in den Standortgebieten immer noch erfüllt?
- Was ist der Einfluss von sicherheitsrelevanten Ungewissheiten auf das Systemverhalten eines Tiefenlagers?
- Sind die den sicherheitstechnischen Analysen zugrunde gelegten geologischen Modelle gesichert?

Die durchgeführte Bewertung der Unterlagen führt bezüglich dieser Fragen zu folgenden Schlussfolgerungen:

In den für das SMA-Lager und das HAA-Lager vorgeschlagenen Standortgebieten liegt mit dem Wirtgestein Opalinuston ein homogener Wirtgesteinskörper vor, der in den abgegrenzten optimierten Lagerperimetern in geeigneter Tiefe liegt und eine ausreichende Mächtigkeit und eine geeignete Grösse hat. In den vorgeschlagenen Standortgebieten gibt es angrenzend an den Opalinuston zusätzlich wenig durchlässige Rahmengesteine, unmittelbar angrenzend an das Wirtgestein gibt es in den vorgeschlagenen Standortgebieten keine stärker wasserführenden Schichten. Mit den in den vorgeschlagenen Standortgebieten abgegrenzten Lagerperimetern werden die Mindestanforderungen und die verschärften Anforderungen aus SGT Etappe 1 in den Standortgebieten erfüllt, und es besteht für die abgegrenzten Lagerperimeter keine Gefährdung der Langzeitsicherheit durch Neotektonik oder Erosion.

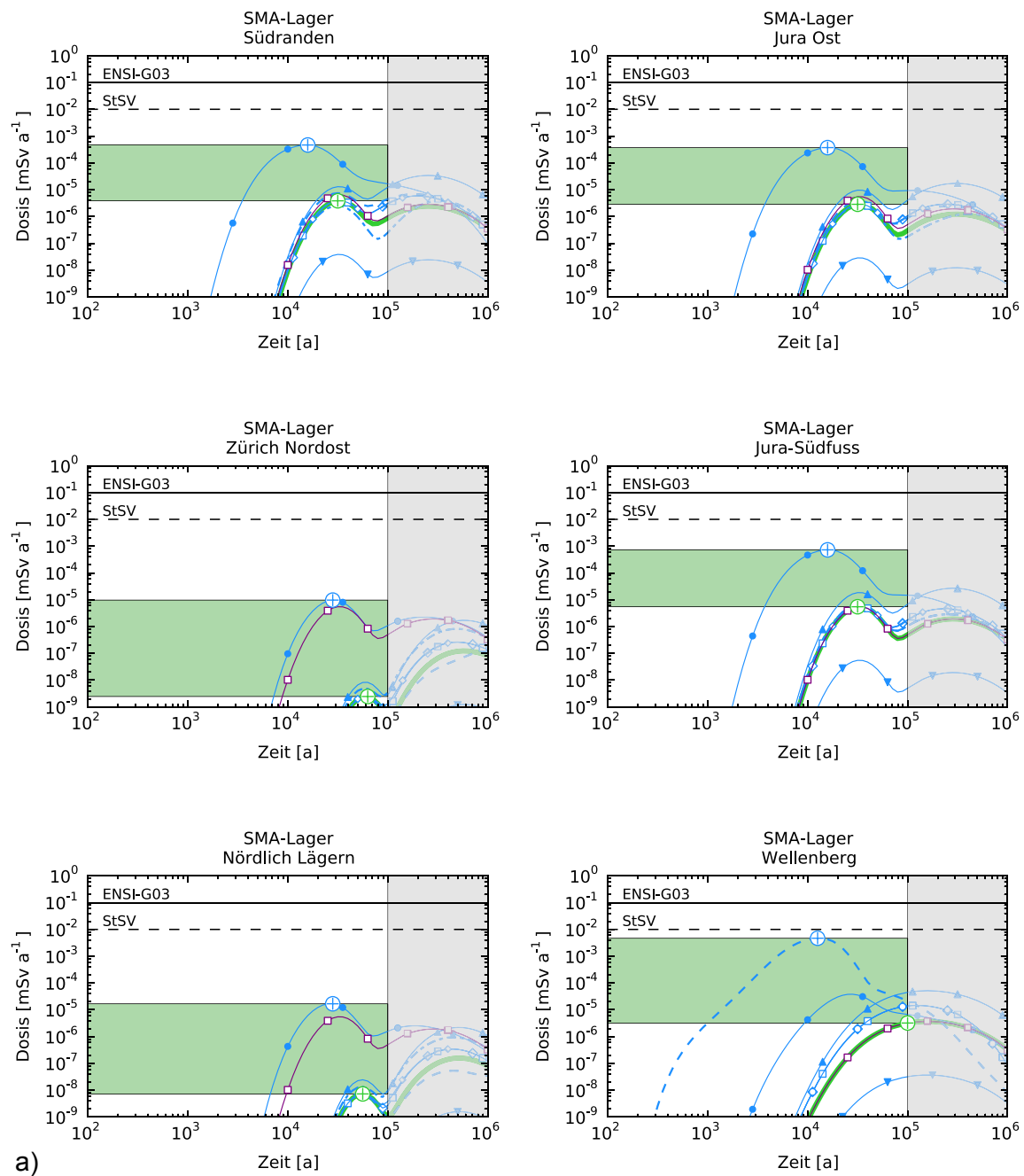


Fig. 5.3-1: Übersicht der Dosiskurven gemäss Vorgaben des ENSI für die geologischen Standortgebiete sowie resultierende charakteristische Dosisintervalle, vgl. Nagra (2014a).

a) SMA-Lager, b) HAA-Lager und Kombilager. Darstellung der Dosiskurven für die Referenzfälle (grün) und die ENSI-Fälle (blau) gemäss den Vorgaben des ENSI (2010a) sowie die "massgebenden Fälle für die Einengung" (violett) pro Standortgebiet. Als "ENSI-Fälle" werden die in ENSI (2010a) für das standardisierte Parametervariationsverfahren definierten Rechenfälle bezeichnet. Der für die Dosisberechnungen verwendete "massgebende Fall für die Einengung" wurde in Kap. 3.1 und 4.2 definiert. Die resultierenden charakteristischen Dosisintervalle sind als horizontale grüne Balken dargestellt. Der grau markierte Bereich kennzeichnet den Zeitraum nach Ablauf des Betrachtungszeitraums.

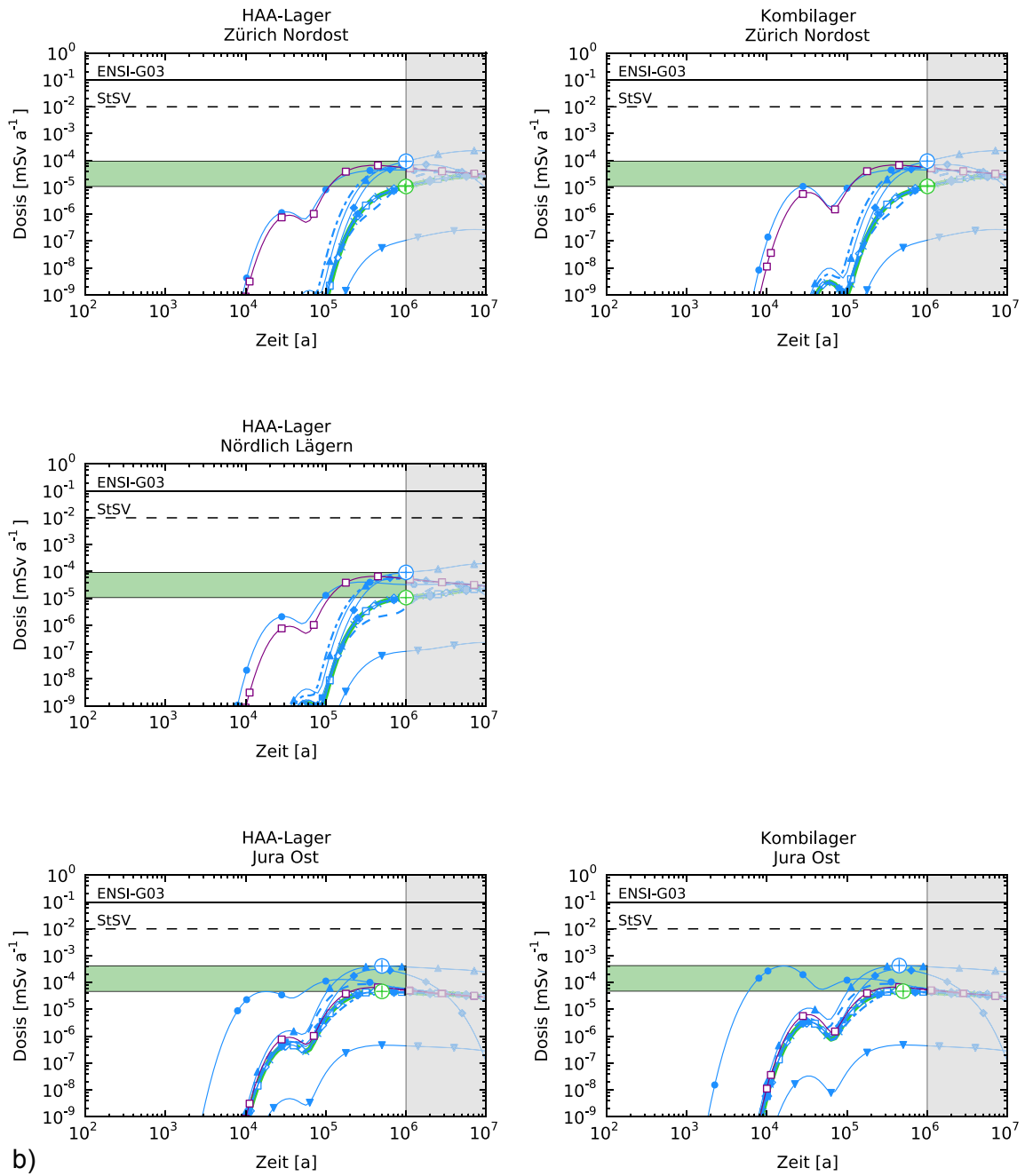


Fig. 5.3-1: (Fortsetzung)

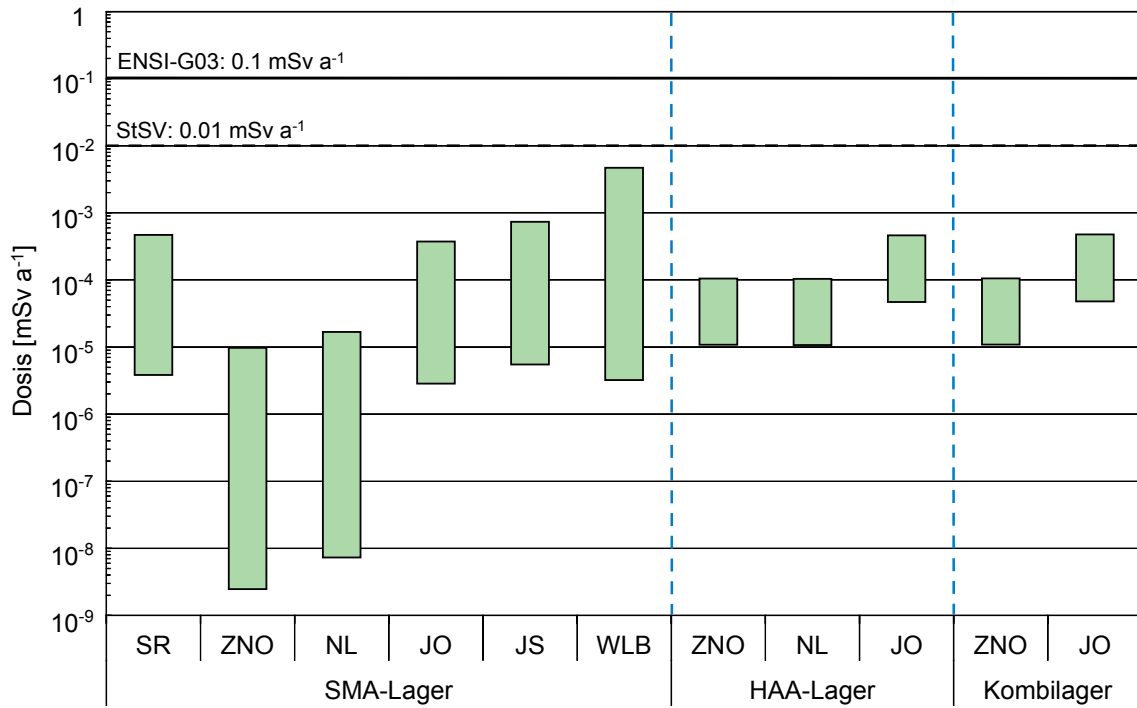


Fig. 5.3-2: Zusammenfassende Darstellung der charakteristischen Dosisintervalle gemäss Vorgaben des ENSI für das SMA-, das HAA- und das Kombilager in den verschiedenen geologischen Standortgebieten, vgl. Nagra (2014a).

Die charakteristischen Dosisintervalle ergeben sich aus den Dosismaxima für den Referenzfall (unterer Rand) und für den Rechenfall mit den höchsten Dosen (oberer Rand) innerhalb des Betrachtungszeitraums, wobei nur die ENSI-Fälle und der "massgebende Fall für die Einengung" verwendet werden (vgl. auch Fig. 5.3-1).

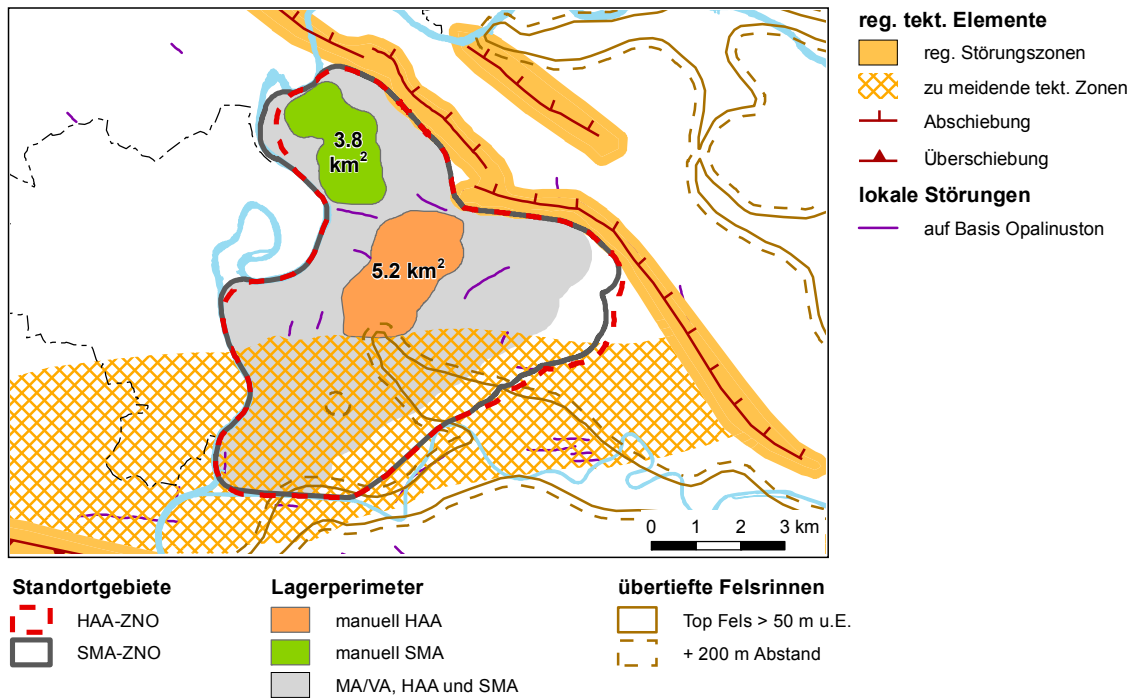


Fig. 5.3-3: Lagerperimeter für das Kombilager im Standortgebiet Zürich Nordost.

Basierend auf den modellhaft "manuell" modifizierten massgebenden Lagerperimetern für das SMA- und HAA-Lager im Standortgebiet Zürich Nordost (vgl. Fig. 4.2-13 und 4.2-20).

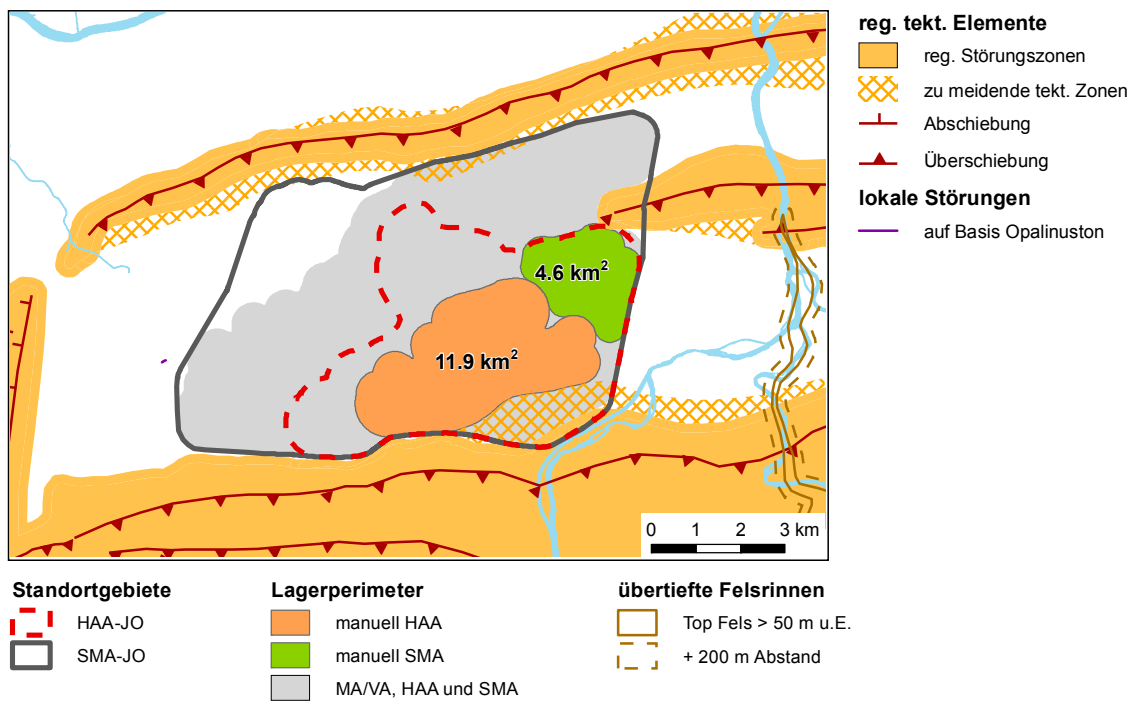


Fig. 5.3-4: Lagerperimeter für das Kombilager im Standortgebiet Jura Ost.

Basierend auf den modellhaft "manuell" modifizierten massgebenden Lagerperimetern für das SMA- und HAA-Lager im Standortgebiet Jura Ost (vgl. Fig. 4.2-16 und 4.2-23).

Die aus Sicht der Nagra zurückgestellten Standortgebiete haben bezüglich einzelner von der KNS und der AG SiKa/KES aufgebrauchten Aspekte klare Nachteile:

Für das **SMA-Lager** ergibt sich folgendes Bild: Im Standortgebiet Südranden ist der einschlusswirksame Gebirgsbereich wegen ungenügender Überdeckung der oberen Rahmengesteine deutlich weniger mächtig als in den vorgeschlagenen Standortgebieten. Weiter ist die laterale Ausdehnung bzw. das Platzangebot sehr knapp und die Lage des Wirtgesteins wenig tief, was dazu führt, dass die Situation bezüglich Erosion deutlich weniger günstig ist als in den vorgeschlagenen Standortgebieten. Zusätzlich bestehen Ungewissheiten bezüglich der Bildung von (übertiefen) Durchbruchsrinnen. Im Standortgebiet Nördlich Lägern liegt der Opalinuston bezüglich der erwarteten geotechnischen Bedingungen und damit bezüglich der damit verbundenen möglichen Beeinträchtigung der Barrieren in zu grosser Tiefe; es gibt kein Platzangebot in bevorzugter Tiefenlage. Im Standortgebiet Jura-Südfuss haben die unteren Rahmengesteine eine deutlich schlechtere Qualität als in den vorgeschlagenen Standortgebieten; im unmittelbar an den Opalinuston angrenzenden Kalkigen Lias im Liegenden ist von einer erhöhten Durchlässigkeit auszugehen. In Kombination mit der beschränkten Mächtigkeit des Opalinustons und der möglichen beschränkten Qualität der oberen Rahmengesteine führt dies dazu, dass die Mächtigkeit des nutzbaren einschlusswirksamen Gebirgsbereichs deutlich kleiner ist als in den vorgeschlagenen Standortgebieten. Weiter ist das Platzangebot bei Berücksichtigung der notwendigen Reserven wegen kleinräumiger Strukturen im Vergleich mit den vorgeschlagenen Standortgebieten klein. Die Mergel-Formationen des Helvetikums im Standortgebiet Wellenberg sind bezüglich ihrer Homogenität deutlich schlechter einzustufen als der Opalinuston. Das Standortgebiet Wellenberg hat auch bezüglich Neotektonik im Vergleich zu den anderen Standortgebieten Nachteile und die Ungewissheiten sind wegen der schwierigen Explorierbarkeit grösser als in den vorgeschlagenen Standortgebieten.

Für das **HAA-Lager** ergibt sich für das Standortgebiet Nördlich Lägern das folgende Bild: In diesem Standortgebiet liegt der Opalinuston bezüglich der erwarteten geotechnischen Bedingungen und bezüglich der damit verbundenen Beeinträchtigung der Barrieren in zu grosser Tiefe; das nutzbare Platzangebot in bevorzugter Tiefenlage ist ungenügend.

Die für die Analysen und die Beurteilung der Sicherheit und technischen Machbarkeit verwendeten geologischen Modelle sind aus Sicht der Nagra genügend gut gesichert; die vorhandenen Ungewissheiten wurden bei den Analysen und der Entscheidungsfindung berücksichtigt.

Die für Etappe 2 durchgeführte Seismik und die reprozessierte Seismik liefern einen wichtigen Beitrag zum Kenntnisstand. Im Vergleich zu Etappe 1 konnte die räumliche Lage der regionalen Störungszonen bestätigt bzw. präzisiert werden, die in Etappe 1 verwendeten 'diffus gestörten Zonen' konnten entweder eliminiert oder durch diskrete geologische Elemente ersetzt werden (entweder regionale Störungszonen oder aber zu meidende tektonische Zonen) und neu konnten zu meidende tektonische Zonen ausgeschieden werden. Weiter wurde die Tiefenlage der Wirtgesteine präzisiert, und schliesslich hat die Seismik Hinweise gegeben für die Faziesverteilung im 'Braunen Dogger' und in den Effinger Schichten.

Die Beurteilung der Vorschläge der für Etappe 3 weiter zu untersuchenden Standortgebiete anhand der Fragen der KNS und der Hinweise der AG SiKa/KES führt nicht dazu, die Vorschläge anpassen zu müssen; diese bleiben bestehen.

6 Hinweise für die Standortuntersuchungen für Etappe 3

Wie in Kap. 5 dargelegt, werden für die Untersuchungen für Etappe 3 für das SMA-Lager und das HAA-Lager je zwei Standortgebiete vorgeschlagen.

Es sind dies für das SMA-Lager die geologischen Standortgebiete

- Zürich Nordost (ZH, TG) mit dem Standortareal ZNO-6b und
- Jura Ost (AG) mit dem Standortareal JO-3+

und für das HAA-Lager die Standortgebiete

- Zürich Nordost (ZH, TG) mit dem Standortareal ZNO-6b und
- Jura Ost (AG) mit dem Standortareal JO-3+.

In beiden Gebieten besteht das Potenzial, das SMA- und das HAA-Lager gleichzeitig im selben Standortgebiet anzuordnen und dort ein sogenanntes Kombilager zu erstellen.

Für Etappe 3 sind diese Gebiete mit Hilfe von erdwissenschaftlichen Methoden vertieft zu untersuchen. Gemäss SGT (BFE 2008) sind die Erkenntnisse aus den provisorischen Sicherheitsanalysen der Etappe 2 durch die Nagra zu nutzen, um Hinweise für die Standortuntersuchungen für Etappe 3 abzuleiten. Diese Standortuntersuchungen haben das Ziel, die Standortwahl für die Rahmenbewilligung transparent dazulegen (Berichterstattung zum "Vergleich der zur Auswahl stehenden Optionen hinsichtlich Sicherheit" und "Bewertung der für die Auswahl des Standorts ausschlaggebenden Eigenschaften" als Teil der Unterlagen zum Rahmenbewilligungsgesuch¹⁹³) sowie die Sicherheit und technische Machbarkeit der geologischen Tiefenlager für die gewählten Standorte in den Rahmenbewilligungsgesuchen belastbar und überzeugend zu beurteilen.

Die in diesem Bericht dokumentierten Überlegungen zeigen auf, dass Informationen bezüglich folgender Aspekte wichtig sind und wo sinnvoll durch weitere erdwissenschaftliche Arbeiten für Etappe 3 ergänzt bzw. vertieft werden sollen:

- **Geometrie der für die Anordnung der Untertagebauten geeigneten Lagerbereiche und der Strukturen innerhalb und in direkter Umgebung der Lagerbereiche:** Dazu sind die erforderlichen Informationen zur Abgrenzung der Lagerbereiche und zu ihrer geometrischen Beschreibung bereit zu stellen. Dazu gehören die Tiefenlage und Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs, die Lage der die Lagerbereiche umgebenden geologischen Elemente (regionale Störungszonen, zu meidende tektonische Zonen) sowie die Verteilung und Geometrie von anordnungsbestimmenden Störungszonen innerhalb der Lagerbereiche¹⁹⁴.
- **Eigenschaften des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs:** Dies umfasst die Bestätigung bzw. Verfeinerung von Unterlagen zum Aufbau und zu den Eigenschaften (inkl. Homogenität) des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs.

¹⁹³ Gemäss Kernenergiegesetzgebung (Art. 62 KEV) ist ein Bericht mit folgenden Angaben einzureichen: a. einen Vergleich der zur Auswahl stehenden Optionen hinsichtlich der Sicherheit des geplanten Tiefenlagers; b. eine Bewertung der für die Auswahl des Standorts ausschlaggebenden Eigenschaften.

¹⁹⁴ Einlagerungsbestimmende Störungszonen werden durch Platzreserven berücksichtigt.

- **Zustandsparameter des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs für die Analyse der Barrierenwirkung und für die Anlagenplanung:** Dies umfasst die Bestätigung bzw. Verfeinerung von Unterlagen zu den Zustandsparametern im Hinblick auf die Quantifizierung der Barrierenwirkung, die Beurteilung der Bedeutung der lagerbedingten Einflüsse und die Anlagenauslegung.
- Sicherheitsrelevante Informationen zur **Langzeitentwicklung:** Dazu gehören Unterlagen zur Verfeinerung der Erosionsszenarien und zur Verfeinerung der Beurteilung einer möglichen Reaktivierung von tektonischen Elementen.
- Abhängig von der Beurteilung der Bedeutung **möglicher Nutzungskonflikte** in Zusammenhang mit den Permokarbontrögen und ihrer Ränder (Kohlenwasserstoffe, Geothermie) sind ergänzende Abklärungen zu den Rohstoffvorkommen durchzuführen¹⁹⁵.
- **Unterlagen für die Anlagenplanung:** Dazu gehören Unterlagen zu den geomechanischen Bedingungen für die Untertagebauten, geotechnische Informationen für den Bau der Zugänge nach Untertag sowie Untersuchungen für die Oberflächeninfrastruktur. Dazu gehören insbesondere Baugrunduntersuchungen. Weiter sind bei Bedarf auch spezifische Untersuchungen zur Umweltverträglichkeit durchzuführen.

Diese Daten lassen sich mit 3D-Seismik, Tiefbohrungen, untiefen Bohrungen sowie durch begleitende Untersuchungen an der Oberfläche erheben.

Die Verteilung und Geometrie anordnungsbestimmender Störungszonen innerhalb des die Lagerbereiche umfassenden Untersuchungsperimeters werden mit Hilfe der 3D-Seismik ermittelt; bedeutende regionale Störungszonen in der näheren Umgebung der Lagerperimeter sind mit den vorhandenen Daten mehrheitlich gut erfasst, werden aber wo sinnvoll auch mit der geplanten Seismik randlich erfasst. Unterschiede im seismischen Abbild (seismische Fazies) können auch genutzt werden, um laterale Variationen im Gesteinsaufbau zu untersuchen, insbesondere im Bereich der Rahmengesteine. Die Untersuchungen mit 3D-Seismik sind nicht-destruktiv und beeinträchtigen die Eigenschaften der geologischen Barriere nicht.

Tiefbohrungen dienen der Erkundung von Gesteinseigenschaften, der Erhebung von geometrischen Informationen und von Zustandsbedingungen entlang des Bohrpfads. Die Lage von Schichtgrenzen kann genau ermittelt und mit Hilfe von 3D-Seismik flächenhaft extrapoliert werden. Der geologische Aufbau des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs kann anhand von Kernmaterial und mit Hilfe von Bohrlochmessungen bestimmt werden. Wichtige Eigenschaften der Wirt- und Rahmengesteine lassen sich durch Testverfahren im Bohrloch (insbesondere hydraulische Packertests) und an Kernmaterial bestimmen. Weiter werden die Tiefbohrungen auch benutzt zur Erhebung von Zustandsparametern. Um repräsentative Aussagen treffen zu können, werden die Bohrungen am Rand des Lagerperimeters niedergebracht; je nach Situation können auch einzelne Bohrungen innerhalb des Lagerperimeters abgeteuft werden. Da sie destruktiv sind und die Eigenschaften der geologischen Barriere beeinflussen, müssen die Bohrpfade sorgfältig mit der voraussichtlichen Lage und Ausdehnung des Lagerbereichs abgestimmt werden.

¹⁹⁵ Es wird davon ausgegangen, dass im Rahmen der behördlichen Stellungnahmen zu Etappe 2 die Bedeutung der potenziellen Nutzungskonflikte angesprochen wird.

Für die Erkundung der oberflächennahen Geologie – insbesondere in Bezug auf die Eigenschaften der Lockergesteine sowie Informationen zur Verfeinerung des Verständnisses von Erosionsszenarien (z.B. Information zu übertieften glazialen Rinnen mit Fokus auf die Haupt-rinnen) – werden neben anderen Verfahren auch Bohrungen eingesetzt. Diejenigen Bohrungen, die dazu innerhalb des Lagerperimeters abgeteuft werden, erreichen in keinem Fall den ein-schlusswirksamen Gebirgsbereich.

Die Untersuchungen in den Standortgebieten werden für Fragen der Langzeitentwicklung ergänzt durch regionale Untersuchungen. Dazu gehören der Betrieb des Schwachbebennetzes und des Netzwerks der permanenten GNSS-Stationen sowie periodische geodätische Messkam-pagnen (Präzisions-Nivellements und Verwendung der permanenten und temporären GNSS-Stationen) sowie ergänzende Oberflächenkartierungen, die Analyse hochauflösender digitaler Geländemodelle, geophysikalische Messungen und Aufschlussaufnahmen. Schliesslich gehören hierzu auch vertiefte Analysen zur regionalen Tektonik, der Neotektonik und zum Aufbau des Grundgebirges.

Für die vorgeschlagenen Standortgebiete Zürich Nordost und Jura Ost mit den jeweiligen Lagerperimetern für das HAA- und das SMA-Lager ergeben sich verschiedene Schwerpunkte für die Ergänzung der Datenbasis im Hinblick auf Standortwahl und Rahmenbewilligungs-suche. In Ergänzung zu den obigen eher generellen Angaben werden nachfolgend weitere Informationen zu spezifischen Aspekten der Standortgebiete gegeben. Eine vertiefte Diskussion des Explorationskonzepts für die Felduntersuchungen für Etappe 3 findet sich in Nagra (2014h).

Zürich Nordost – Lagerperimeter für das HAA-Lager

Der Lagerperimeter für das HAA-Lager im Standortgebiet Zürich Nordost liegt im Tafeljura nördlich der seismisch kartierten Fernschubfront. Aus der vorhandenen 3D-Seismik gibt es keine Hinweise für anordnungsbestimmende Störungszonen im Lagerbereich. Die Berandungen der umgebenden regionalen tektonischen Elemente werden bei der Anordnung der untertägigen Anlagenteile berücksichtigt. Es ist mit Hilfe von Bohrungen exemplarisch zu prüfen, wie häufig und mit welcher Orientierung innerhalb des Opalinustons seismisch nicht aufgelöste Störungen vorkommen. Die Selbstabdichtungseigenschaften solcher Scherzonen im Wirt- und Rahmen-gestein sind hier bei Bedarf zu bestätigen.

Der Lagerperimeter für das HAA-Lager liegt am Rand des direkten Bereichs grösserer über-tiefter Felsrinnen; deshalb wird die Bedeutung der Felsrinnen im Hinblick auf zukünftige Ver-gletscherungen untersucht. Hierfür sind weitere Studien an der Oberfläche und Bohrungen zur Erkundung der Quartärvorkommen und ihrer Ablagerungsgeschichte vorgesehen.

Der Lagerperimeter für das HAA-Lager liegt ausserhalb des Nordschweizer Permokarbons und diesbezüglich sind deshalb keine weiteren Untersuchungen notwendig.

Die Bestätigung der Eigenschaften des Wirtgesteins und der Qualität der Rahmengesteine (ins-besondere der untere Teil des 'Braunen Doggers') erfolgt durch Tiefbohrungen; für die Inter-polation der Information wird die Seismik verwendet. Weiter sind ergänzende Feldaufnahmen von Aufschlüssen im Randen und in Süddeutschland geplant.

Zürich Nordost – Lagerperimeter für das SMA-Lager

Der Lagerperimeter für das SMA-Lager im Standortgebiet Zürich Nordost liegt im Tafeljura nördlich der seismisch kartierten Fernschubfront. Aus der vorhandenen 3D-Seismik gibt es keine Hinweise für anordnungsbestimmende Störungszonen im Lagerbereich. Da die vorhandene 3D-Seismik auf das HAA-Lager ausgerichtet war, ist geplant, die 3D-Seismik für den SMA-Lagerbereich zu ergänzen. Um die Berandungen der umgebenden tektonisch beanspruchten Zonen bei der Anordnung der untertägigen Anlagenteile zu berücksichtigen, wird die ergänzende Seismik wo sinnvoll entsprechend ausgedehnt. Es ist mit Hilfe von Bohrungen exemplarisch zu prüfen, wie häufig und mit welcher Orientierung innerhalb des Opalinustons seismisch nicht aufgelöste Störungen vorkommen. Die Selbstabdichtungseigenschaften solcher Scherzonen im Wirt- und Rahmengestein sind hier gegebenenfalls zu prüfen bzw. zu bestätigen.

Der Lagerperimeter SMA liegt ausserhalb des direkten Bereichs grösserer übertiefer Felsrinnen und ihre Bedeutung ist gegenüber dem HAA-Lager aufgrund des viel kürzeren Betrachtungszeitraums weniger wichtig, sodass diesbezüglich keine Untersuchungen vorgesehen sind. Je nach Beurteilung der Bedeutung der Nutzungskonflikte bezüglich Permokarbondrog und seiner Ränder ist zu erwägen, ob diesbezüglich weitere Abklärungen notwendig sind.

Die Bestätigung der Eigenschaften des Wirtgesteins und der Qualität der Rahmengesteine erfolgt wie für das HAA-Lager durch Tiefbohrungen. Der Charakterisierung der oberen Rahmengesteine (Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger') kommt dabei eine erweiterte Bedeutung zu, da die Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger' evtl. auch als Wirtgestein für schwachaktive Abfälle mit reduzierten Anforderungen an die Barrierenwirkung z.B. in Zusammenhang mit einem Kombilager in Frage kommen könnte.

Die Felduntersuchungen für das HAA- und das SMA-Lager werden koordiniert durchgeführt unter Nutzung der vorhandenen Synergien.

Jura Ost – Lagerperimeter für das HAA-Lager

Auf Grund der tektonischen Situation des HAA-Lagerperimeters Jura Ost in der Vorfaltenzone ist eine erhöhte Störungsdichte möglich. Die Verteilung der Störungen kann mit einer 3D-Seismik ermittelt werden. Zusätzlich ist mit Hilfe von Bohrungen exemplarisch zu prüfen, wie häufig und mit welcher Orientierung innerhalb des Opalinustons seismisch nicht aufgelöste Störungen vorkommen (z.B. flache Scherzonen im untersten Bereich des Opalinustons). Die Selbstabdichtungseigenschaften solcher Scherzonen im Wirt- und Rahmengestein sind hier bei Bedarf zu bestätigen.

Die Bestätigung der Eigenschaften des Wirtgesteins und der Rahmengesteine erfolgt primär durch Tiefbohrungen; für die Interpolation der Information wird die Seismik verwendet. Im Standortgebiet ist insbesondere der Aufbau bzw. die Qualität der Passwang-Formation und der Unteren Acuminata-Schichten (Verbreitung und Mächtigkeit der lithofaziellen Einheiten, d.h. v.a. der tonmineralarmen Sandkalkabfolgen und ihre Wasserführung), aber auch die Mächtigkeit und Qualität der unteren Rahmengesteine, insbesondere des Tonigen Lias, zu betrachten. Hierfür sind auch zusätzliche lithofazielle Studien (Kartierung) an der Oberfläche geplant.

Wegen der vergleichsweise un tiefen Lage des Wirtgesteins im Lagerperimeter für das HAA-Lager sind die verbleibenden Ungewissheiten bei der Tiefenlage im Hinblick auf die Erosionsszenarien weiter zu untersuchen. Für die präzisere Abschätzung der Tiefenlage des Wirtgesteins ist die Kalibrierung der 3D-Seismik durch Bohrungsdaten erforderlich. Bezüglich Erosionsszenarien ist zudem vorgesehen, die vergangene Entwicklung der lokalen Erosionsbasis sowie die übertiefte Felsrinne im Bereich des unteren Aaretals vertieft zu untersuchen, u.a. mit Hilfe von Bohrungen und Datierungen.

Je nach Beurteilung der Bedeutung der Nutzungskonflikte bezüglich Permokarbondrog und seiner Ränder ist zu erwägen, ob diesbezüglich weitere Abklärungen notwendig sind. Weiter ist auch zu prüfen, ob zur Beurteilung des Permokarbondrogs in Bezug auf eine mögliche tektonische Reaktivierung seiner Randstörungen weitere Untersuchungen erforderlich sind.

Jura Ost – Lagerperimeter für das SMA-Lager

Für den Lagerperimeter für das SMA-Lager gilt grundsätzlich das gleiche wie für den Lagerperimeter für das HAA-Lager. Auch hier ist die auf Grund der tektonischen Situation des SMA-Lagerperimeters Jura Ost in der Vorfaltenzone mögliche erhöhte Störungsdichte sowie die an der Basis bzw. innerhalb des Opalinustons möglichen Abschiebungen mit einer 3D-Seismik und mit Bohrungen zu untersuchen.

Auch für das SMA-Lager ist die Bestätigung der Eigenschaften des Wirtgesteins und der Rahmengesteine ein wichtiges Ziel der Untersuchungen mit einem speziellen Fokus auf der Qualität und Mächtigkeit der oberen Rahmengesteine (v.a. Sandkalkabfolgen in der Passwang-Formation und den Unteren Acuminata-Schichten). Die Untersuchungen betreffend Erosionsszenarien haben im Vergleich zum HAA-Lager aufgrund des kürzeren Betrachtungszeitraums eine kleinere Bedeutung.

Auch für das SMA-Lager ist je nach Beurteilung der Bedeutung der Nutzungskonflikte bezüglich des Permokarbondrogs und seiner Ränder zu erwägen, ob ergänzende Untersuchungen durchzuführen sind.

7 Schlussfolgerungen

7.1 Ausgangslage und Bezeichnung der für die weiteren Untersuchungen in Etappe 3 vorgeschlagenen geologischen Standortgebiete

Für Etappe 1 des SGT hat die Nagra gemäss den im Sachplan vorgegebenen Kriterien zur Sicherheit und technischen Machbarkeit geologische Standortgebiete für das SMA- und das HAA-Lager vorgeschlagen. Basierend auf einer detaillierten Begutachtung durch die zuständigen Behörden und ihre Experten und unter Berücksichtigung der Resultate einer breiten Anhörung wurden die Vorschläge zu den Standortgebieten am 30. November 2011 vom Bundesrat in den Sachplan geologische Tiefenlager aufgenommen und die dazu gehörenden Planungsperimeter festgelegt.

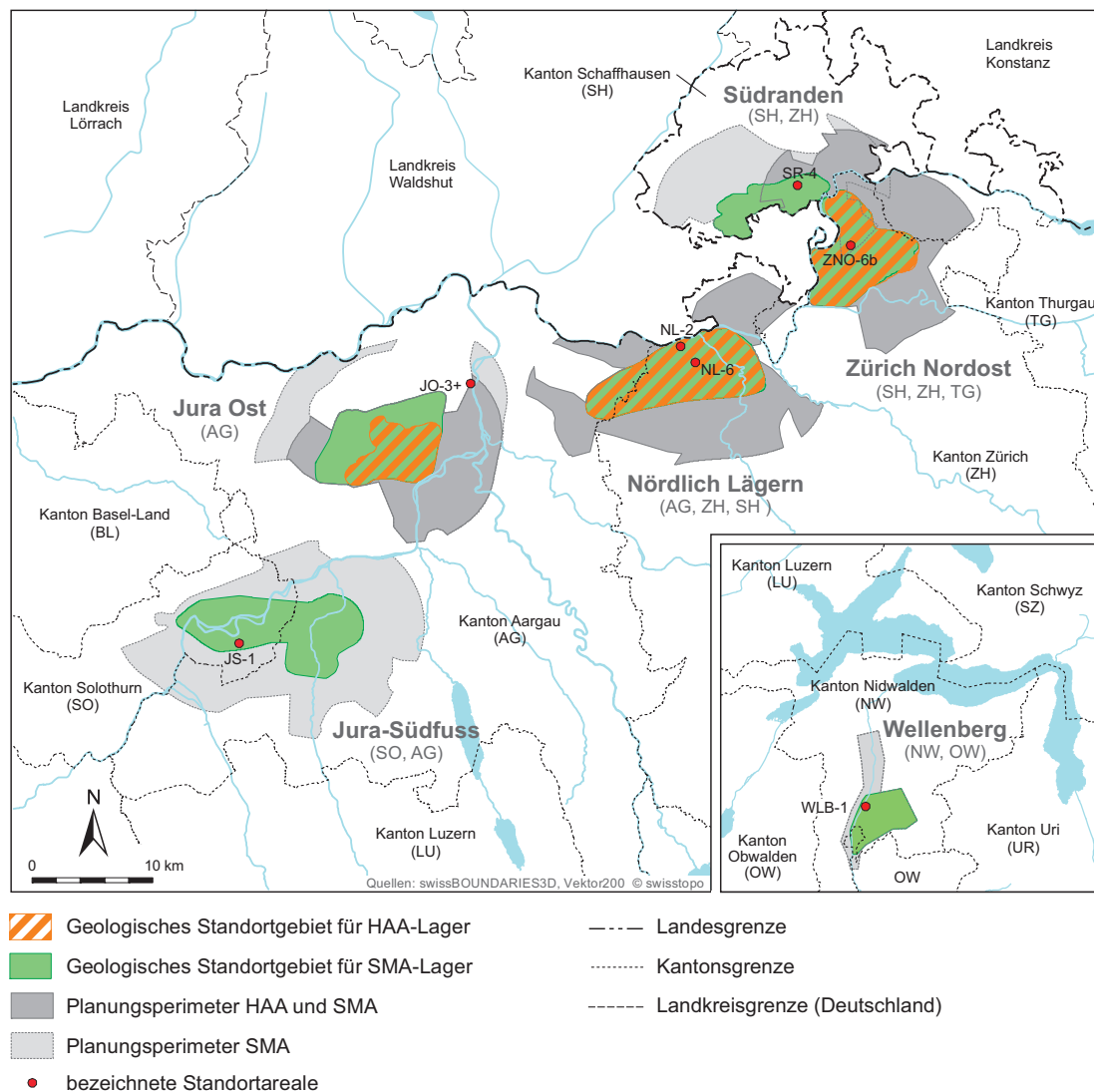


Fig. 7.1-1: Die in Etappe 1 festgelegten geologischen Standortgebiete mit den zugehörigen von der Nagra in Etappe 2 bezeichneten Standortarealen für das SMA- und das HAA-Lager.

Die geologischen Standortgebiete zusammen mit den Standortarealen bilden die Ausgangslage für die Einengung der geologischen Standortgebiete in Etappe 2.

Im Rahmen von Etappe 2 hat die Nagra in allen Standortgebieten – gestützt auf die Resultate der Zusammenarbeit mit den betroffenen Standortregionen und Standortkantonen – Standortareale für die Oberflächenanlage bezeichnet (vgl. Fig. 7.1-1). Bei der Bezeichnung der Standortareale hat die Nagra die übergeordnet wichtigen Aspekte zur Sicherheit und Machbarkeit geprüft (vgl. Planungsstudien der Nagra; Nagra 2013/2014).

Parallel zur Bearbeitung der Standortareale hat die Nagra ihre Unterlagen zu der in Etappe 2 vorgesehenen Einengung der geologischen Standortgebiete auf je mindestens zwei pro Lagertyp vorbereitet. In vorliegendem Bericht werden die entsprechenden Vorschläge präsentiert und die zugehörige Begründung zusammenfassend dargestellt. Die vorgenommene Einengung setzt die gemäss Konzept SGT (BFE 2008) und gemäss den Vorgaben des ENSI (insbesondere ENSI 2010a und ENSI 2013a) erforderlichen Prüfungen und Bewertungen für die Einengung auf die vorgeschlagenen geologischen Standortgebiete um. Dies hat für das SMA-Lager und das HAA-Lager zu einer Einengung auf je zwei geologische Standortgebiete geführt, welche die Nagra im Auftrag der Entsorgungspflichtigen für die weiteren Untersuchungen in der dritten Etappe des Sachplanverfahrens vorschlägt.

Es sind dies für das SMA-Lager die geologischen Standortgebiete

- Zürich Nordost (ZH, TG) mit dem Standortareal ZNO-6b und
- Jura Ost (AG) mit dem Standortareal JO-3+

und für das HAA-Lager die Standortgebiete

- Zürich Nordost (ZH, TG) mit dem Standortareal ZNO-6b und
- Jura Ost (AG) mit dem Standortareal JO-3+.

In beiden Gebieten besteht das Potenzial, das SMA- und das HAA-Lager am selben Standort anzuordnen und dort ein sogenanntes Kombilager zu erstellen.

Für das SMA-Lager werden aufgrund eindeutiger Nachteile beim Vergleich mit den vorgeschlagenen Standortgebieten die folgenden geologischen Standortgebiete zurückgestellt:

- Südranden (SH) mit dem Standortareal SR-4
- Nördlich Lägern (AG, ZH) mit den Standortarealen NL-2 und NL-6
- Jura-Südfuss (AG, SO) mit dem Standortareal JS-1
- Wellenberg (NW, OW) mit dem Standortareal WLB-1

Für das HAA-Lager wird aufgrund eindeutiger Nachteile beim Vergleich mit den vorgeschlagenen Standortgebieten das folgende Standortgebiet zurückgestellt:

- Nördlich Lägern (AG, ZH) mit den Standortarealen NL-2 und NL-6

Fig. 7.1-2 zeigt die für die vertieften Untersuchungen in Etappe 3 vorgeschlagenen geologischen Standortgebiete für das SMA- und für das HAA-Lager. In diesen geologischen Standortgebieten ist für das HAA-Lager gemäss Etappe 1 der Opalinuston das Wirtgestein, und neu wird der Opalinuston auch für das SMA-Lager als prioritäres Wirtgestein vorgeschlagen.

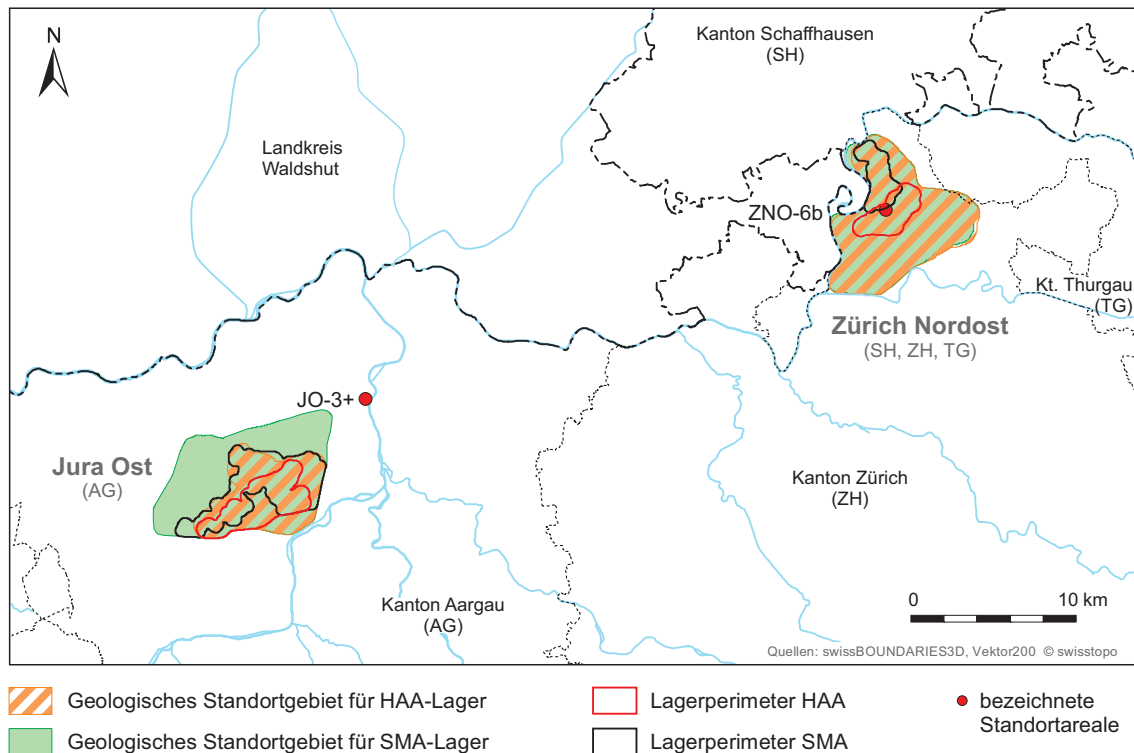


Fig. 7.1-2: Die für die vertieften Untersuchungen für Etappe 3 vorgeschlagenen geologischen Standortgebiete mit den zugehörigen Standortarealen für das SMA- und das HAA-Lager.

Die in der Figur auch dargestellten Lagerperimeter sind das Resultat einer systematischen Abgrenzung und wurden für die Bewertung verwendet im Hinblick auf die Einengung der Standortgebiete in Etappe 2. Bei Abschluss der Etappe 2 werden die Standortgebiete und nicht die Lagerperimeter in die Objektblätter des Sachplans aufgenommen (BFE 2013).

In Kap. 7.2 werden die Vorgaben, das Vorgehen und die verwendeten Grundlagen dargestellt. Die Begründung der für das SMA-Lager für die Einengung gewählten prioritären Wirtgesteine und der vorgeschlagenen geologischen Standortgebiete anhand der Resultate des sicherheitstechnischen Vergleichs folgt in Kap. 7.3 und in Kap. 7.4 wird die Plausibilität der Vorschläge diskutiert. Kap. 7.5 gibt einen kurzen Ausblick auf das weitere Vorgehen bei der Entsorgung der radioaktiven Abfälle in der Schweiz.

7.2 Vorgaben und Vorgehen sowie verwendete Grundlagen für die Erarbeitung der Vorschläge

7.2.1 Vorgaben und Vorgehen

Der SGT (BFE 2008) und die Dokumente des ENSI (2010a, 2013a, 2013c) enthalten detaillierte Vorgaben zum Vorgehen in Etappe 2. Das grundsätzliche Vorgehen in Etappe 2 ist gleich wie in Etappe 1 und der Fokus liegt wieder auf Sicherheit und technischer Machbarkeit. Gemäss SGT kommen bei der Einengung jedoch zusätzliche Elemente zur Anwendung. Die Vorgaben für Etappe 2 umfassen die nachfolgend diskutierten Themenbereiche:

- **Dosisberechnungen für die Standortgebiete:** Als zusätzlicher Prüfpunkt gegenüber Etappe 1 sind in Etappe 2 neu Dosisberechnungen durchzuführen und in die Entscheidungsfindung einzubeziehen. Dies umfasst Dosisberechnungen zur Überprüfung der Einhaltung des behördlichen Schutzziels (ENSI-G03, ENSI 2009) und zur Ableitung des charakteristischen Dosisintervalls zur Prüfung der sicherheitstechnischen Gleichwertigkeit der Standortgebiete. Die behördlichen Vorgaben schreiben im Detail vor, welche Berechnungen durchzuführen sind. Sie enthalten auch klare Regeln für die Interpretation der Resultate und Vorgaben, wie diese Resultate im Einengungsentscheid zu berücksichtigen sind.
- **Qualitative Bewertung der Standortgebiete** anhand der 13 Kriterien gemäss SGT: Die Kriteriengruppen und Kriterien sind verbindlich im Sachplan vorgegeben und gelten sowohl für Etappe 1 als auch für Etappe 2. Die Indikatoren waren in Etappe 1 basierend auf Hinweisen im Sachplan durch die Nagra auszuarbeiten. Für Etappe 2 hat die Nagra die Indikatoren aus Etappe 1 grösstenteils übernommen; teilweise waren Anpassungen notwendig auch zur Berücksichtigung von Behördenhinweisen in den Gutachten bzw. Stellungnahmen zu Etappe 1 bzw. wegen des in Etappe 2 detaillierteren Fokus. Bei der Anwendung der Indikatoren wird in Etappe 2 für ausgewählte Indikatoren eine weitergehende sicherheitsbezogene Optimierung vorgenommen als dies in Etappe 1 der Fall war; neben den Mindestanforderungen und den verschärften Anforderungen werden für diese Indikatoren zusätzlich weitergehende Optimierungsanforderungen verwendet.
- **Evaluation möglicher eindeutiger Nachteile der Standortgebiete** anhand der entscheidungsrelevanten Merkmale und Indikatoren: Als zusätzlicher Prüfpunkt gegenüber Etappe 1 sind in Etappe 2 die Standortgebiete bezüglich eindeutiger Nachteile vergleichend zu beurteilen. Die Verwendung von eindeutigen Nachteilen für die Einengung in Etappe 2 ist im Sachplan (BFE 2008) vorgegeben. Das ENSI (2013a) hat detaillierte Vorgaben zu den entscheidungsrelevanten Merkmalen gemacht und auch auf die Fragen der KNS und der AG SiKa/KES hingewiesen (ENSI 2013b). Gemäss ENSI (2013a) ist es die Aufgabe der Nagra, für die entscheidungsrelevanten Merkmale die zugehörigen entscheidungsrelevanten Indikatoren zu bezeichnen.
- **Sicherheitstechnischer Vergleich und Einengung:** Im Unterschied zu Etappe 1 ist gemäss Sachplan (BFE 2008) in Etappe 2 ein sicherheitstechnischer Vergleich der Standortgebiete vorzunehmen. Beim sicherheitstechnischen Vergleich sind gemäss Vorgaben des ENSI (2010a) alle Informationen aus den Bewertungen zu integrieren, um dann basierend auf einem Vergleich eindeutige Nachteile identifizieren zu können, die auch unter Berücksichtigung vorhandener Ungewissheiten belastbar sind. Die eindeutigen Nachteile für ein Standortgebiet können gemäss Vorgaben im Sachplan (BFE 2008) aus den Dosisberechnungen, aus der gesamten qualitativen Bewertung oder aus den eindeutigen Nachteilen bei den entscheidungsrelevanten Merkmalen herrühren. Dieser Vergleich führt dann zu einer Einengung auf je mindestens zwei Standortgebiete pro Lagertyp.

Diese Vorgaben wurden bei der Ausarbeitung der Vorschläge für die für Etappe 3 weiter zu untersuchenden geologischen Standortgebiete durch die Nagra im Detail umgesetzt.

Weitere wichtige Randbedingungen für das Vorgehen in Etappe 2 ergeben sich aus den Unterlagen zu Etappe 1, welche durch die Behörden beurteilt wurden und durch den Bundesratsentscheid für die weiteren Schritte im Sachplan festgehalten sind. Dies betrifft insbesondere das Entsorgungskonzept mit einem SMA- und einem HAA-Lager mit der Möglichkeit der Erstellung eines Kombilagers, die Barrieren- und Sicherheitskonzepte, die Betrachtungszeiträume für das SMA- und das HAA-Lager sowie das für die Beurteilung des Platzangebots untertags zu verwendende Volumen des umhüllenden Abfallinventars.

Weiter hat die Nagra in ihrem Vorgehen berücksichtigt, dass die in Etappe 1 festgelegten Standortgebiete grosszügig abgegrenzt wurden und für das SMA-Lager teilweise auch mehr als ein Wirtgestein enthalten. Dies bedeutet, dass es Flexibilität bei der Nutzung des Standortgebiets gibt, welche die Nagra im Sinne des Optimierungsgedankens (vgl. ENSI G03; ENSI 2009) nutzt, indem einerseits für das SMA-Lager prioritäre Wirtgesteine bezeichnet und andererseits innerhalb der Standortgebiete für das SMA- und HAA-Lager optimierte Lagerperimeter abgegrenzt werden. So werden die in Etappe 1 festgelegten Standortgebiete optimal genutzt und bilden damit eine geeignete Basis für den nachfolgenden sicherheitstechnischen Vergleich und die Einengung. Dieses Vorgehen wurde den Behörden in Etappe 2 frühzeitig vorgestellt und von diesen als zielführend zur Kenntnis genommen.

7.2.2 Geologische Unterlagen und Beurteilung des Kenntnisstands für die Einengung

In Etappe 2 werden geologische Informationen für die Festlegung der prioritären Wirtgesteine für das SMA-Lager sowie für die Abgrenzung und Bewertung der optimierten Lagerperimeter benötigt im Hinblick auf den sicherheitstechnischen Vergleich und die Einengung. Nachfolgend wird die erforderliche bzw. vorhandene Information aufgezeigt und der vorhandene Kenntnisstand im Hinblick auf die Durchführung dieser Schritte beurteilt.

Festlegung der prioritären Wirtgesteine für das SMA-Lager und Bewertung der Wirtgesteine

Die in Etappe 1 gewählten tonreichen sedimentären Wirtgesteine weisen alle eine gute Barrierenwirkung auf, auch wenn es bei detaillierterer Betrachtung deutliche Unterschiede zwischen den verschiedenen Wirtgesteinen gibt.

Für die Festlegung der prioritären Wirtgesteine ist die Barrierenwirkung der Wirtgesteine unter Berücksichtigung der Rahmengesteine massgebend. Dabei sind die Existenz, die Lage und die hydraulische Wirkung von "harten Bänken"¹⁹⁶ wichtig, denn diese können dazu führen, dass die Barrierenwirkung eines Teils des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nicht zuverlässig gewährleistet ist; d.h. es besteht die Möglichkeit, dass die "harten Bänke" einen "Kurzschluss" für einen Teil der Barriere bewirken und damit zu einer erheblichen Reduktion der Barrierenwirkung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs führen. Für die Barrierenwirkung ist die

¹⁹⁶ "Harte Bänke": sedimentäre Schichten mit einem Tonmineralgehalt < ca. 20 Gew.-%, was zu einer schlechten Selbstabdichtung und somit schon bei kleinen Versätzen zu einer stark erhöhten hydraulischen Durchlässigkeit führt.

unter Berücksichtigung der Wirkung der 'harten Bänke' verbleibende Mächtigkeit der tonreichen Abfolgen (in welchen die Lagerkammern angeordnet werden) und die Barrierenwirkung dieser Abfolgen wichtig.

Basierend auf den für Etappe 1 erarbeiteten geologischen Unterlagen hat die Nagra für Etappe 2 gezielt die Informationsbasis zu den Wirtgesteinen ergänzt. Dazu gehören zusätzliche Informationen aus Aufschlüssen und Bohrungen Dritter (v.a. Erdwärmesonden, Bohrungen Schlattingen-1 und -2, Tiefbohrung Gösigen SB4), aus vertieften Analysen (inkl. Versuche an Bohrkernen) sowie aus der Seismik (u.a. Faziesanalyse). Diese Informationen erlauben es, für die Wirtgesteine konzeptuelle Modelle und zugehörige Datensätze abzuleiten und die Unterschiede zwischen den Standortgebieten aufzuzeigen, die Ungewissheiten in den konzeptuellen Modellen und Parameterwerten anzugeben sowie die Möglichkeit der Reduktion der Ungewissheiten zu beurteilen.

In allen Standortgebieten sind die Informationen vorhanden, um die Barrierenwirkung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs zu beurteilen und in den relevanten Gesteinsabfolgen die Existenz von "harten Bänken" zu belegen. Weiter ist es auch möglich, ihre ungefähre räumliche Verteilung in der Gesteinsabfolge zu bestimmen sowie die Mächtigkeit der verbleibenden tonreichen Abfolgen abzuleiten. Bezüglich der Existenz, Mächtigkeit und Kontinuität der "harten Bänke" und deren Eigenschaften gibt es zwar Ungewissheiten. Diese stellen aber die zuverlässige Entscheidungsfindung nicht in Frage; d.h. die vorhandenen Unterschiede zwischen Opalinuston, 'Brauner Dogger' und Effinger Schichten sind auch unter Berücksichtigung der vorhandenen Ungewissheiten eindeutig und erlauben es, auch für das SMA-Lager den Opalinuston als prioritäres Wirtgestein in den Standortgebieten mit mehr als einem Wirtgestein festzulegen. Für das HAA-Lager wurde der Opalinuston schon in Etappe 1 als einziges Wirtgestein festgelegt.

Aus Sicht der Nagra ist deshalb der Kenntnisstand ausreichend, um eine zuverlässige Bewertung der Wirtgesteine durchzuführen und eine Priorisierung vorzunehmen.

Abgrenzung der optimierten Lagerperimeter und ihre Bewertung

Für die Abgrenzung massgebend sind die regionalen tektonischen Elemente (regionale Störungszonen, zu meidende tektonische Zonen), die minimale Tiefenlage des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs zur Berücksichtigung der Gesteinsdekompaktion und der verschiedenen Erosionsformen (flächenhafte Erosion, Bildung neuer Rinnen, glaziale Tiefenerosion) sowie die maximale Tiefenlage zur Berücksichtigung der geotechnischen Bedingungen bzw. der Begrenzung der Schädigung des Barrierensystems.

Die Abgrenzung der Lagerperimeter hat so zu erfolgen, dass möglichst innerhalb des bevorzugten Tiefenbereichs ein genügendes Platzangebot untertags zur Verfügung steht. Das Platzangebot muss auch Reserven enthalten zur Berücksichtigung der anordnungsbestimmenden Strukturen und der einlagerungsbestimmenden Elemente (für BE/HAA). Für Lagerperimeter mit eher ungünstigen geotechnischen Bedingungen werden weitere Reserven vorgesehen, um dem Umstand Rechnung zu tragen, dass evtl. einzelne Lagerkammern infolge grosser Ausbrüche zumindest teilweise nicht genutzt werden können.

Für die vergleichende Bewertung der Standortgebiete anhand der optimierten Lagerperimeter sind neben den Angaben zu den Wirtgesteinen (vgl. Ausführungen zu den Wirtgesteinen) und zu den zur Abgrenzung der Lagerperimeter verwendeten Aspekte auch die Modellvorstellungen zur Langzeitentwicklung und die Seismizität, die Explorationsverhältnisse an der Oberfläche und im geologischen Untergrund sowie die geotechnischen und hydrogeologischen Verhältnisse

in den überlagernden Gesteinsformationen für den Zugang nach Untertag zu berücksichtigen. Zusätzlich sind bei der Bewertung noch weitere Aspekte zu berücksichtigen, wobei hier die Unterschiede aber eher gering ausfallen.

Seit Einreichung der Unterlagen für Etappe 1 hat die Nagra die Informationsbasis zur Abgrenzung und Bewertung der optimierten Lagerperimeter gezielt verbessert. Dazu gehören insbesondere die zusätzlichen Informationen aus den neu aufgenommenen 2D-Seismiklinien, aus der reprozessierten schon vorhandenen Seismik, aus der Gravimetrie (ergänzende Messungen und eine neue Auswertung), aus Bohrungen Dritter (Erdwärmesonden, Bohrungen Schlattingen-1 und -2, Tiefbohrung Gösgen SB4), aus geologischen Geländeaufnahmen (z.B. zur Strukturgeologie und Sedimentologie) sowie aus weiteren darauf basierenden vertieften Auswertungen und Analysen (z.B. bilanzierte geologische Profilschnitte).

In den geologischen Standortgebieten sind alle erforderlichen geologischen Informationen vorhanden, um optimierte Lagerperimeter abzugrenzen und dabei auch den Einfluss vorhandener Ungewissheiten zu berücksichtigen. Dazu gehören z.B. die Ungewissheiten in der Tiefenlage der verschiedenen geologischen Horizonte. Im Rahmen der Einengung wird auch der Einfluss alternativer Annahmen zur Optimierung (z.B. erforderliche Überdeckung in Zusammenhang mit den verschiedenen Erosionsprozessen sowie der Einfluss alternativer Annahmen zur maximalen Tiefenlage) geprüft und berücksichtigt. Dies erlaubt es, eindeutige Unterschiede zwischen den Standortgebieten bezüglich des Platzangebots untertags, Schutz vor Erosion und maximaler Tiefenlage (relevant für Schädigung des Barrierensystems) aufzuzeigen, die auch unter Berücksichtigung der vorhandenen Ungewissheiten belastbar sind.

Bezüglich der Modellvorstellungen zur Langzeitentwicklung (Modellvorstellungen zur Geodynamik und Neotektonik unter Berücksichtigung der Informationen zur Seismizität) können die Unterschiede zwischen Alpenraum und der Nordschweiz klar aufgezeigt und als Unterlage für die Einengung verwendet werden.

Sicherheitstechnischer Vergleich und Einengung

Für den sicherheitstechnischen Vergleich sind neben den oben erwähnten Unterlagen für Festlegungen und Bewertungen auch Dosisberechnungen durchzuführen. Dazu sind die entsprechenden konzeptuellen Modelle zur Geologie abzuleiten und zu parametrisieren, wozu die oben erwähnten Unterlagen verwendet werden. Weiter sind Datenbanken zu geochemischen Rückhalteprozessen und die notwendigen Rechenmodelle bereitzustellen. Für die Datenbanken zur Geochemie wurden zur Vorbereitung von Etappe 2 für die Sorption umfangreiche Messprogramme und Validierungen durchgeführt, die auch im internationalen Vergleich einen sehr hohen Standard aufweisen. Auch für die Ableitung der Löslichkeitslimiten wurden die neusten Daten evaluiert und die aktuellsten Modellkonzepte verwendet. Für die Dosisberechnungen kann auf die über viele Jahre laufend weiterentwickelten Computerprogramme zurückgegriffen werden, die auch im internationalen Vergleich einen hohen Standard aufweisen. Für die Durchführung der Bewertung, den sicherheitstechnischen Vergleich und die Einengung werden die zuvor erwähnten Vorgaben detailliert umgesetzt. Beim sicherheitstechnischen Vergleich werden auch die Fragen und Hinweise von KNS und AG SiKa/KES (ENSI 2013b) berücksichtigt.

7.3 **Begründung der vorgeschlagenen geologischen Standortgebiete: Resultate des sicherheitstechnischen Vergleichs**

Das systematisch nach den Vorgaben des Konzepts SGT (BFE 2008) und des ENSI (ENSI 2010a, 2013a, 2013c) durchgeführte Verfahren zur Einengung der in Etappe 1 vorgeschlagenen geologischen Standortgebiete umfasst Dosisberechnungen, mit welchen die Einhaltung des behördlichen Schutzkriteriums und die sicherheitstechnische Gleichwertigkeit geprüft wird. Weiter ist eine qualitative Bewertung der 13 Kriterien gemäss SGT durchzuführen, die bei einer positiven Beurteilung für die Gesamtbewertung zumindest die Stufe "geeignet" erreichen muss. Schliesslich hat die Einengung die für die Sicherheit und technische Machbarkeit der geologischen Tiefenlager übergeordnet wichtigen geologisch-sicherheitstechnischen Aspekte zu berücksichtigen; diese werden vom ENSI als entscheidrelevante Merkmale vorgegeben und umfassen:

- die Wirksamkeit der geologischen Barriere
- die Langzeitstabilität der geologischen Barriere
- die Charakterisier- und Explorierbarkeit der geologischen Barriere im Standortgebiet, und
- die bautechnische Machbarkeit eines Tiefenlagers unter Berücksichtigung der vorgeschlagenen Standortareale (inklusive Platzangebot untertags).

Beim sicherheitstechnischen Vergleich werden schliesslich auch die von der KNS und AG SiKa/KES als übergeordnet wichtig eingestuften Aspekte berücksichtigt (vgl. ENSI 2013b). Wie in Kap. 5 dargelegt, ergeben die Dosisberechnungen und die qualitative Bewertung der 13 Kriterien gemäss SGT keine eindeutigen Nachteile, die zum Zurückstellen eines Standortgebiets führen. Dies zeigt, dass alle in Etappe 1 vorgeschlagenen Standortgebiete von guter Qualität sind und dass dort grundsätzlich sichere geologische Tiefenlager erstellt werden könnten. Der Vorschlag für die für Etappe 3 weiter zu untersuchenden Standortgebiete basiert deshalb auf dem Vergleich der Standortgebiete anhand der entscheidrelevanten Merkmale und Indikatoren.

Der auf die entscheidrelevanten Merkmale bezogene sicherheitstechnische Vergleich sowie die vergleichende Gesamtbewertung der in Etappe 1 vorgeschlagenen geologischen Standortgebiete führen zu den nachfolgend für das SMA-Lager (Kap. 7.3.1) und das HAA-Lager (Kap. 7.3.2) diskutierten Resultaten.

7.3.1 **Begründungen für das SMA-Lager**

Nachfolgend werden zuerst die entscheidrelevanten Merkmale diskutiert. Basierend auf dieser Diskussion wird dann zusammenfassend dargelegt, weshalb der Opalinuston in den Standortgebieten mit mehr als einem Wirtgestein als prioritäres Wirtgestein festgelegt wird. Anschliessend wird der sicherheitstechnische Vergleich der Standortgebiete erläutert.

Diskussion der entscheidrelevanten Merkmale und Indikatoren für das SMA-Lager

- **Wirksamkeit der geologischen Barriere:** Die Barrierenwirkung bestimmt, wie gut die im geologischen Tiefenlager eingelagerten radioaktiven Stoffe zurückgehalten werden und dort zerfallen. Bei den in Etappe 1 gewählten Wirtgesteinen handelt es sich um tonreiche Sedimentgesteine, die alle über gute bis sehr gute Barriereigenschaften verfügen. Diese Wirtgesteine haben eine geringe hydraulische Durchlässigkeit und weisen ein gutes bis sehr gutes Selbstabdichtungsvermögen auf. Sie sind allerdings unterschiedlich in der Homogenität des (vertikalen) Gesteinsaufbaus und zeigen Unterschiede im Tonmineralgehalt und damit im Selbstabdichtungsvermögen der barrierenwirksamen Gesteine.

Für das SMA-Lager wurde in den Standortgebieten mit mehr als einem Wirtgestein als Erstes geprüft, ob die dort vorhandenen Wirtgesteine bezüglich Barrierenwirkung gleichwertig sind oder ob eines weniger geeignet ist und eindeutige Nachteile aufweist. Die Prüfung hat ergeben, dass in den Standortgebieten Zürich Nordost bzw. Nördlich Lägern die Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger' mit ihren Rahmengesteinen im Vergleich zum Opalinuston mit seinen Rahmengesteinen mehrere eindeutige Nachteile aufweist und dass im Standortgebiet Jura-Südfuss die Effinger Schichten gegenüber dem Opalinuston mit seinen Rahmengesteinen mehrere eindeutige Nachteile aufweisen.

Die eindeutigen Nachteile bezüglich Barrierenwirkung des 'Braunen Doggers' und der Effinger Schichten gegenüber dem Opalinuston resultieren aus ihrem Gesteinsprofil, wo in vertikal relativ kleinen Abständen sogenannte "harte Bänke" auftreten. Bei den "harten Bänken" handelt es sich um sedimentäre Ablagerungen (Sandkalkabfolgen bzw. Kalkbankabfolgen), deren Tonmineralgehalt klein und deren Selbstabdichtungsvermögen stark vermindert oder fehlend ist, sodass schon kleine Störungen zu einer erhöhten Wasserdurchlässigkeit innerhalb dieser Schichten führen und damit die Barrierenwirkung der gesamten Gesteinsabfolge erheblich reduzieren können. Die Charakterisierbarkeit und Explorierbarkeit dieser "harten Bänke" für den Nachweis, dass diese "harten Bänke" keine erhöhte Wasserführung aufweisen, ist schwierig und nicht zuverlässig möglich. Die verbleibenden tonreichen barrierenwirksamen Abfolgen des 'Braunen Doggers' und der Effinger Schichten sind deshalb nur von beschränkter Mächtigkeit, sodass die massgebende Länge der Freisetzungspfade klein und die Barrierenwirkung gegenüber dem homogenen, erheblich mächtigeren Opalinuston deutlich eingeschränkt ist. Bei den Effinger Schichten kommt ausserdem hinzu, dass die tonreicheren Kalkmergelabfolgen einen geringeren Tonmineralgehalt und ein geringeres Selbstabdichtungsvermögen als der Opalinuston aufweisen, sodass dort auch mit wasserführenden Störungen zu rechnen ist, was zu vergleichsweise ungünstigen Radionuklid-Rückhalteeigenschaften führt und damit die Barrierenwirkung zusätzlich limitiert. Das Selbstabdichtungsvermögen in den Kalkmergelabfolgen der Effinger Schichten ist auch in der Auflockerungszone um die Untertagebauten geringer als im Opalinuston.

Auch die Mergel-Formationen des Helvetikums zeigen gegenüber dem Opalinuston mehrere eindeutige Nachteile. Die Mergel des Helvetikums haben einen deutlich geringeren Tonmineralgehalt als der Opalinuston und damit gegenüber diesem ein eingeschränktes Selbstabdichtungsvermögen. Sie bilden wegen der starken tektonischen Überprägung und Verfaltungen ein System mit potenziell wasserführenden Verschiebungsflächen und Störungen. Weiter ist auch mit zerscherten Kalkbänken ("boudinierte Kalkbankabfolgen") zu rechnen, die zu einer reduzierten Länge der Freisetzungspfade mit günstigen Eigenschaften führen. In grösseren Störungszonen, welche während der Bildung des helvetischen Deckenstapels als Überschiebungsbahnen gewirkt haben, können auch Fremdgesteins-einschlüsse aus Kalk vorhanden sein. Wegen des geringeren Selbstabdichtungsvermögens kann nicht ausgeschlossen werden, dass im Wirtgestein auch bisher noch nicht erbohrte anordnungsbestimmende höherdurchlässige Störungszonen vorkommen. Dies führt dazu, dass die Barrierenwirkung im Vergleich zum Opalinuston deutlich reduziert ist. Das Standortgebiet Wellenberg hat deshalb bezüglich der Barrierenwirkung seines Wirtgesteins im Vergleich zu den Standortgebieten mit Opalinuston eindeutige Nachteile. Das geringere Selbstabdichtungsvermögen hat auch eine geringere Selbstabdichtung der Auflockerungszone der Untertagebauten zur Folge.

Auch bei den Standortgebieten der Nordschweiz – alle mit Opalinuston als Wirtgestein – gibt es kleinere Unterschiede in der Barrierenwirkung, welche v.a. die Mächtigkeit und die Barrierenwirkung der Rahmengesteine betreffen. Im Standortgebiet Südranden kann die Barrierenwirkung der oberen Rahmengesteine wegen ihrer geringmächtigen Überdeckung nicht berücksichtigt werden; die Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs ist

deshalb erheblich vermindert. Im Standortgebiet Jura-Südfuss sind die unteren Rahmengesteine (Kalkiger Lias) so ausgebildet, dass sie nicht als zuverlässig nutzbare Barriere eingestuft werden können; in Kombination mit dem weniger mächtigen Opalinuston und der erwarteten schlechteren Barriereneigenschaften der oberen Rahmengesteine führt dies zu einer reduzierten Barrierenwirkung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs. In den Standortgebieten Südranden und Jura-Südfuss gibt es bezüglich Barrierenwirkung also Schwächen bzw. eindeutige Nachteile. Zwischen den anderen Standortgebieten der Nordschweiz gibt es diesbezüglich ebenfalls Unterschiede; diese betreffen die Qualität der oberen Rahmengesteine zumindest in Teilen der Standortgebiete Nördlich Lägern und Jura Ost. Diese Unterschiede sind jedoch nicht entscheidend für die Einengung.

- **Langzeitstabilität der geologischen Barriere:** Eine geeignete Langzeitstabilität sorgt dafür, dass die notwendige Barrierenwirkung über den gesamten Betrachtungszeitraum erhalten bleibt. Die Abnahme der Radiotoxizität der eingelagerten Abfälle als Folge des radioaktiven Zerfalls ist ausschlaggebend für die Länge des Betrachtungszeitraums, welcher für das SMA-Lager 100'000 Jahre beträgt. Die Langzeitstabilität wird insbesondere durch die Erosion sowie mögliche differenzielle Bewegungen im Untergrund beeinflusst. Der Langzeitentwicklung wird bei der Abgrenzung der Lagerperimeter Rechnung getragen; es ergeben sich dabei deutliche Unterschiede zwischen den einzelnen Standortgebieten. Dabei sind auch die Ungewissheiten in den Prognosen zur Langzeitentwicklung zu beachten. Schliesslich sind bei der Bewertung auch die Langzeitstabilität der Wirtgesteine und das Selbstabdichtungsvermögen der Wirtgesteine für den Fall einer zukünftigen tektonischen Beanspruchung zu berücksichtigen.

Für das SMA-Lager gibt es deutliche Unterschiede bei der bezüglich Erosion massgebenden minimalen Tiefenlage des Wirtgesteins. Unterschiede gibt es auch bei dem für die Erosion wichtigen anzunehmenden Ausmass zukünftiger Vergletscherungen innerhalb des Betrachtungszeitraums. Im Falle der Standortgebiete Südranden, Zürich Nordost, Nördlich Lägern und Wellenberg muss in den nächsten 100'000 Jahren die Möglichkeit einer zumindest partiellen Vergletscherung berücksichtigt werden, im Falle der Standortgebiete Jura Ost und Jura-Südfuss ist die Wahrscheinlichkeit viel geringer. Während in den Standortgebieten Zürich Nordost und Nördlich Lägern das Wirtgestein so tief liegt, dass die Langzeitstabilität eines SMA-Lagers durch die Vergletscherung nicht beeinflusst wird, ist es beim Standortgebiet Südranden durchaus möglich, dass es bei einer zukünftigen Vergletscherung zu einer Flussumlenkung und damit verbunden zu Durchbruchsrinnen kommt, womit ein Teil der heute vorhandenen Überdeckung des Wirtgesteins wegerodiert würde. Die im Standortgebiet Südranden vorhandenen Durchbruchsrinnen (inkl. der im Rahmen der für Etappe 2 durchgeführten seismischen Untersuchungen nachgewiesenen Neuhauserwald-Rinne) zeigen, dass dies in der Vergangenheit tatsächlich vorgekommen ist und somit auch in Zukunft ein mögliches Szenario darstellt. Weiter ist auch eine glaziale Übertiefung dieser Rinnen möglich. Generell ist die Überdeckung des Wirtgesteins und der oberen Rahmengesteine im Standortgebiet Südranden im Vergleich zu den anderen Standortgebieten eher knapp, sodass dieses Standortgebiet aus Gründen der Erosion bezüglich Langzeitstabilität einen eindeutigen Nachteil aufweist. Auch im Standortgebiet Wellenberg ist im Betrachtungszeitraum von 100'000 Jahren von einer zeitweise erheblichen Vergletscherung auszugehen; wegen der grossen vertikalen Ausdehnung des Wirtgesteinskörpers kann das Lager dort aber zum Schutz vor Erosion tief angeordnet werden. Die beschränkte Prognostizierbarkeit der zukünftigen Entwicklung ist jedoch ein Schwachpunkt für das Standortgebiet Wellenberg, da die Dekompaktionseffekte in der Palfris-Formation gemäss Beobachtungen deutlich tiefer reichen als in den Wirtgesteinen der Nordschweiz.

Bezüglich differenzieller Bewegungen kann in den Standortgebieten in der Nordschweiz den kritischen Zonen mit den Lagerperimetern ausgewichen werden und die neotektonische Aktivität ist hier sehr gering. Im Gegensatz dazu liegt das Standortgebiet Wellenberg in einer grossräumigen Zone mit erhöhter neotektonischer Aktivität, wo im Vergleich zur Nordschweiz im Betrachtungszeitraum mit einer grösseren Hebung und einer erhöhten Seismizität zu rechnen ist. Dadurch ist auch die Wahrscheinlichkeit von differenziellen Bewegungen im Wirtgesteinskörper erhöht. Dies ist insbesondere auch deshalb ein Nachteil, weil im Standortgebiet Wellenberg reaktivierbaren Störungen mit grösseren Versätzen wegen der fehlenden Explorierbarkeit mit Reflexions-Seismik nicht zuverlässig ausgewichen werden kann. Dies führt für das Standortgebiet Wellenberg aus Gründen der Neotektonik im Vergleich zu den anderen Standortgebieten zu eindeutigen Nachteilen bezüglich Langzeitstabilität.

Weiter ist bei der Langzeitstabilität der Wirtgesteine zu beachten, dass die Effinger Schichten wegen der Möglichkeit der Verkarstung der Kalkbankabfolgen gegenüber den anderen Wirtgesteinen einen eindeutigen Nachteil aufweisen. Ein weiterer Aspekt der Langzeitstabilität betrifft die unterschiedliche Empfindlichkeit der Wirtgesteine auf kleine Bewegungen, für welche das Selbstabdichtungsvermögen der Wirtgesteine ausschlaggebend ist. Hier weisen die Mergel-Formationen des Helvetikums im Standortgebiet Wellenberg und die Effinger Schichten gegenüber dem Opalinuston in den Standortgebieten der Nordschweiz einen eindeutigen Nachteil auf.

Schliesslich ist auch die Zuverlässigkeit der Prognosen zur Langzeitentwicklung ein entscheidender Aspekt. In dieser Hinsicht weisen die Standortgebiete Südranden (Prognostizierbarkeit bezüglich Ausräumen bestehender und Bildung neuer Durchbruchsrinnen) und Wellenberg (Modellvorstellungen zur Geodynamik und Neotektonik sowie weitere Prozesse; Seismizität) gegenüber den anderen Standortgebieten eindeutige Nachteile auf.

- **Charakterisier- und Explorierbarkeit der geologischen Barriere:** Die Charakterisierbarkeit beschreibt, wie genau und zuverlässig die für die Barrierenwirkung kritischen Elemente und Parameter der Wirt- und Rahmengesteine erfasst werden können. Dabei geht es primär um die lokalisierte Wasserführung, welche zu präferenziellem Fluss und Radionuklidtransport führt und damit die Barrierenwirkung erheblich reduziert.

Die Explorierbarkeit bestimmt, mit welcher Auflösegenauigkeit bzw. wie genau und zuverlässig die Geometrie (Lage, Kontinuität, Versätze) der für die Sicherheit relevanten geologischen Elemente bestimmt werden kann. Zu den kritischen, sicherheitsrelevanten geologischen Elementen gehören die "harten Bänke" (Existenz, räumliche Lage und Kontinuität) und Schichtversätze als Folge von Störungszonen, die eine erhöhte Wasserführung in den "harten Bänken" nach sich ziehen können.

Für das SMA-Lager wurde in den Standortgebieten mit mehr als einem Wirtgestein in einem ersten Schritt geprüft, ob die dort vorhandenen Wirtgesteine bezüglich Charakterisierbarkeit und Explorierbarkeit der geologischen Barriere gleichwertig sind bzw. ob eines eindeutige Nachteile aufweist. Die Prüfung hat ergeben, dass in den Standortgebieten Zürich Nordost bzw. Nördlich Lägern die Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger' mit ihren Rahmengesteinen im Vergleich zum Opalinuston mit seinen Rahmengesteinen eindeutige Nachteile aufweist. Ferner weisen auch die Effinger Schichten im Standortgebiet Jura-Südfuss gegenüber dem Opalinuston eindeutige Nachteile auf.

Die eindeutigen Nachteile bezüglich Charakterisier- und Explorierbarkeit des 'Braunen Doggers' und der Effinger Schichten gegenüber dem Opalinuston begründen sich in ihrem Gesteinsprofil, wo in vertikal relativ kleinen Abständen "harte Bänke" auftreten, bei denen es wegen ihres schlechten Selbstabdichtungsvermögens schon bei kleinen Versätzen zu einer erhöhten Wasserdurchlässigkeit kommen kann. Wie die Analyse der Explorierbarkeit

zeigt, ist der zuverlässige Nachweis, dass die "harten Bänke" nicht kontinuierlich sind und in den "harten Bänken" keine erhöhte Wasserführung wegen (kleiner) Versätze auftritt, nicht möglich. Dies stellt einen eindeutigen Nachteil dar. Bei den Effinger Schichten kommt wegen des beschränkten Selbstabdichtungsvermögens zusätzlich noch die Möglichkeit der lokalisierten Wasserführung in den Kalkmergelabfolgen hinzu, die schwierig zu erfassen ist; deshalb weisen diese bezüglich Charakterisierbarkeit einen eindeutigen Nachteil gegenüber dem Opalinuston auf.

Auch die Mergel-Formationen des Helvetikums zeigen gegenüber dem Opalinuston eindeutige Nachteile. Dort ist ebenfalls mit Kalkbankabfolgen zu rechnen, die schwierig und nur unzuverlässig zu lokalisieren sind. Die Mergel des Helvetikums enthalten wegen des beschränkten Selbstabdichtungsvermögens ein System mit wasserführenden Klüften und Störungszonen mit lokalisierter Wasserführung, die ebenfalls schwierig zu erfassen und zu lokalisieren ist. Damit haben die Mergel-Formationen des Helvetikums im Vergleich zum Opalinuston eindeutige Nachteile.

Für den Opalinuston in der Nordschweiz ergeben sich bezüglich Explorierbarkeit keine für die Einengung relevanten Unterschiede zwischen den Standortgebieten.

- **Bautechnische Machbarkeit eines Tiefenlagers unter Berücksichtigung der vorgeschlagenen Standortareale (inkl. Platzangebot untertags):** Im Rahmen der bautechnischen Machbarkeit wird die Schädigung des Wirtgesteins in direkter Umgebung der Lagerkammern im Hinblick auf seine Barrierenwirkung und die mögliche Beeinträchtigung der technischen Barrieren als Folge des Ausbaus der Lagerkammern beurteilt. Bei der bautechnischen Machbarkeit wird zusätzlich auch der Zugang nach Untertag von den Standortarealen der Oberflächenanlage zu den untertägigen Lagerperimetern bezüglich Sicherheit und technischer Machbarkeit geprüft. Weiter wird geprüft, ob das Platzangebot untertags innerhalb des Standortgebiets bzw. des zugehörigen Lagerperimeters im bevorzugten Tiefenbereich genügend gross ist.

Für das SMA-Lager ist es mit einer Ausnahme in allen Standortgebieten möglich, die Lagerperimeter so abzugrenzen, dass die maximal auftretende Tiefe der Lagerebene die bevorzugte Tiefe nicht überschreitet; die geotechnischen Bedingungen für den Bau der Lagerkammern sind dort geeignet. Eine Ausnahme bildet das Standortgebiet Nördlich Lägern, wo es nicht möglich ist, einen Lagerperimeter so abzugrenzen, dass die maximale Tiefe der Lagerebene die bevorzugte Tiefe nicht erheblich überschreitet; das Standortgebiet Nördlich Lägern hat diesbezüglich gegenüber den anderen Standortgebieten einen eindeutigen Nachteil.

Die Beurteilung des Platzangebots untertags für die Standortgebiete bzw. für die zugehörigen optimierten Lagerperimeter zeigt erhebliche Unterschiede. Die bei der Abgrenzung der Lagerperimeter zu berücksichtigenden Vorgaben zur Langzeitstabilität und technischen Machbarkeit haben dazu geführt, dass einige Lagerperimeter ein ungenügendes bzw. ein knappes Platzangebot untertags im bevorzugten Tiefenbereich aufweisen und diesbezüglich eindeutige Nachteile haben. Es handelt sich um die Standortgebiete Südranden (Einschränkung des Platzangebots durch ungenügende Tiefenlage), Nördlich Lägern (Einschränkung des Platzangebots durch zu grosse Tiefenlage) und Jura-Südfuss (Einschränkung des Platzangebots durch regionale Störungszonen und lokale Strukturen als Folge der tektonischen Überprägung).

Die Beurteilung des Zugangs nach Untertag erfolgt für die verschiedenen Standortgebiete unter Berücksichtigung der durch die Nagra bezeichneten Standortareale. Die Beurteilung zeigt zwar kleinere Unterschiede zwischen den Standortgebieten, diese sind aber zu wenig stark ausgeprägt, um für die Einengung entscheidend zu sein.

Festlegung der prioritären Wirtgesteine für das SMA-Lager

Basierend auf der oben geführten Diskussion der entscheiderelevanten Merkmale ergibt der Vergleich der Wirtgesteine für die Festlegung der prioritären Wirtgesteine für das SMA-Lager in den Standortgebieten Zürich Nordost, Nördlich Lägern und Jura-Südfuss folgendes Bild¹⁹⁷:

- **Opalinuston:** In den Standortgebieten mit mehr als einem Wirtgestein führt die vergleichende Gesamtbewertung zum Vorschlag, im Hinblick auf die Bewertung und Einengung der Standortgebiete jeweils den Opalinuston mit seinen Rahmengesteinen als prioritäres Wirtgestein einzustufen. Der Opalinuston zeichnet sich durch eine sehr gute Barrierenwirkung aus, welche auf das gute Selbstabdichtungsvermögen, die sehr geringe Durchlässigkeit, eine erhebliche Mächtigkeit, günstige geochemische Bedingungen und seine in den meisten Standortgebieten vorhandenen barriierenwirksamen Rahmengesteine zurückzuführen ist. Seine vertikale und laterale Homogenität erlaubt eine vergleichsweise einfache Charakterisierung und Exploration.
- **Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger':** Die Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger', welche in Etappe 1 in den Standortgebieten Zürich Nordost und Nördlich Lägern neben dem Opalinuston als Wirtgestein für das SMA-Lager vorgeschlagen wurde, wird wegen ihrer im Vergleich zum Opalinuston ungünstigeren Eigenschaften und den mehrfachen eindeutigen Nachteilen nicht als prioritäres Wirtgestein eingestuft. Der 'Braune Dogger' weist wegen der durch die vorhandenen "harten Bänke" (z.B. Sandkalkabfolgen) verursachten Heterogenität, die eine erhebliche Reduktion der Barrierenwirkung erwarten lässt, eindeutige Nachteile auf. Ebenso bildet die stark eingeschränkte Länge des massgebenden Freisetzungspfad in den tonreichen Abfolgen einen eindeutigen Nachteil. Schliesslich stellen auch die beschränkte Charakterisierbarkeit bzw. Explorierbarkeit der "harten Bänke" (Nachweis der fehlenden Kontinuität, der Absenz auch kleiner Versätze sowie der Absenz einer erhöhten Wasserführung) eindeutige Nachteile dar.
- **Effinger Schichten:** Die Effinger Schichten, welche in Etappe 1 im Standortgebiet Jura-Südfuss neben dem Opalinuston als Wirtgestein für das SMA-Lager vorgeschlagen wurden, werden infolge der im Vergleich zum Opalinuston ungünstigeren Eigenschaften und den mehrfachen eindeutigen Nachteilen nicht als prioritäres Wirtgestein eingestuft. Die Effinger Schichten weisen wegen der durch die vorhandenen "harten Bänke" (Kalkbankabfolgen) verursachten Heterogenität, die zu einer erheblichen Reduktion der Barrierenwirkung führt, einen eindeutigen Nachteil auf. Ebenso bildet die stark eingeschränkte Länge des massgebenden Freisetzungspfad in den Kalkmergelabfolgen einen eindeutigen Nachteil. Auch die beschränkte Charakterisierbarkeit bzw. Explorierbarkeit der "harten Bänke" (Nachweis der fehlenden Existenz und Kontinuität von Störungen auch mit kleinen Versätzen in den Kalkbankabfolgen sowie der Absenz einer erhöhten Wasserführung) stellt einen eindeutigen Nachteil dar. Weiter haben die für die Barrierenwirkung massgebenden Kalkmergelabfolgen wegen ihres vergleichsweise geringeren Gehalts an Tonmineralen im Vergleich zum Opalinuston den eindeutigen Nachteil, dass dort von Störungszonen auszugehen ist, welche die Lagerkammern schneiden und im Vergleich zum Opalinuston ungünstigere Transporteigenschaften aufweisen (ungünstigeres Selbstabdichtungsvermögen, Kolloid-Rückhaltung reduziert, lokal erhöhte Transmissivität, lokalisierter Wasserfluss). Schliesslich ist auch das Risiko der Verkarstung der Kalkbankabfolgen in den Effinger Schichten als eindeutiger Nachteil zu werten.

¹⁹⁷ In den Standortgebieten Südanden und Jura Ost ist der Opalinuston das einzige Wirtgestein; im Standortgebiet Wellenberg sind die Mergel-Formationen des Helvetikums das einzige Wirtgestein.

- **Mergel-Formationen des Helvetikums:** Die Mergel-Formationen des Helvetikums kommen nur im Standortgebiet Wellenberg vor und sind dort das einzige Wirtgestein. Deshalb entfällt dort die Frage nach dem prioritären Wirtgestein, sodass der Vergleich der Mergel-Formationen des Helvetikums im Kontext der Standortgebiete vorgenommen wird.

Sicherheitstechnischer Vergleich der Standortgebiete für das SMA-Lager

Zusammenfassend ergibt der sicherheitstechnische Vergleich der Standortgebiete für das SMA-Lager folgendes Bild:

- **Südranden:** Das Standortgebiet wird wegen folgender eindeutiger Nachteile und Schwächen zurückgestellt: Im Standortgebiet besteht eine erhöhte Wahrscheinlichkeit der Bildung von Durchbruchsrinnen, und es gibt erhebliche inhärente Ungewissheiten in den dazu gehörenden Modellvorstellungen zur Erosion. Solche Durchbruchsrinnen würden die Barrierenwirkung der Geologie erheblich beeinträchtigen. Die untiefe Lage des Wirtgesteins im Standortgebiet bietet einen beschränkten Schutz vor glazialer Tiefenerosion. Schliesslich ist als Folge der ungenügenden Überdeckung der oberen Rahmengesteine die Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs im Standortgebiet im Vergleich mit den anderen Standortgebieten beschränkt. Die ungünstige Tiefenlage und die zentral gelegene Neuhauserwaldrinne bieten nur sehr beschränkte Möglichkeiten zur Optimierung und das resultierende Platzangebot untertags ist deshalb im bevorzugten Tiefenbereich sehr knapp.
- **Zürich Nordost:** Das Standortgebiet wird für die vertiefte Untersuchung für Etappe 3 vorgeschlagen. Dieses Standortgebiet hat ein grosses Platzangebot untertags im bevorzugten Tiefenbereich und bietet deshalb breite Möglichkeiten zur Optimierung. Dies führt zu einem bezüglich minimaler und maximaler Tiefenlage ausgewogenen Lagerperimeter mit einem grossen Platzangebot untertags, in welchem der einschlusswirksame Gebirgsbereich (Opalinuston kombiniert mit mächtigen Rahmengesteinen) sehr gute Barriereigenschaften aufweist. Weiter bestehen dort auch gute Bedingungen bezüglich Explorierbarkeit und die geologische Situation bezüglich Langzeitstabilität ist sehr günstig.
- **Nördlich Lägern:** Das Standortgebiet wird wegen folgender eindeutiger Nachteile zurückgestellt: In diesem Standortgebiet besteht nur ein ungenügendes Platzangebot untertags im bevorzugten Tiefenbereich; es gibt deshalb keine Möglichkeit zur Anordnung des Lagers in einer bezüglich geotechnischer Bedingungen geeigneten Tiefenlage. Bei grösseren Tiefen wäre das Platzangebot untertags zwar etwas grösser, aber die geotechnischen Herausforderungen wären gross und können zu einer erheblichen Schädigung der Barrieren führen, welche klar ausserhalb des erwünschten Bereichs liegt.
- **Jura Ost:** Das Standortgebiet wird für die vertiefte Untersuchung für Etappe 3 vorgeschlagen. Dieses Standortgebiet verfügt über ein grosses Platzangebot untertags im bevorzugten Tiefenbereich und bietet deshalb breite Möglichkeiten zur Optimierung. Dies führt zu einem bezüglich minimaler und maximaler Tiefenlage ausgewogenen Lagerperimeter mit einem grossen Platzangebot untertags, in welchem der einschlusswirksame Gebirgsbereich (Opalinuston und seine Rahmengesteine) gute Barriereigenschaften aufweist, auch wenn die Rahmengesteine im Standortgebiet Jura Ost etwas weniger mächtig und weniger günstig ausgebildet sind als im Standortgebiet Zürich Nordost. Weiter bestehen dort auch sehr gute Bedingungen bezüglich Explorierbarkeit und die Anforderungen zur Langzeitstabilität werden erfüllt.
- **Jura-Südfuss:** Das Standortgebiet wird wegen folgender eindeutiger Nachteile und Schwächen zurückgestellt: Die unteren Rahmengesteine (Kalkiger Lias) sind so ausgebildet, dass sie nur beschränkte Beiträge zur Barrierenwirkung liefern; in Kombination mit dem

hier weniger mächtigen Opalinuston und der erwarteten erhöhten Durchlässigkeit der oberen Rahmengesteine führt dies zu einer reduzierten Barrierenwirkung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs. Als Folge der tektonischen Überprägung und unter Berücksichtigung der mit der Seismik erfassten Strukturen müssen erhebliche Platzreserven eingeplant werden, was dazu führt, dass das Platzangebot untertags als knapp eingestuft werden muss. Im Vergleich zu den Standortgebieten Zürich Nordost und Jura Ost ist das im bevorzugten Tiefenbereich vorhandene Platzangebot untertags kleiner und zudem tektonisch stärker beansprucht; unter Berücksichtigung der erforderlichen Platzreserven bildet dies einen eindeutigen Nachteil. Schliesslich ist zu erwähnen, dass die Tiefenlage der Lagerebene in einem erheblichen Teil des Standortgebiets im Quervergleich relativ gross ist.

- **Wellenberg:** Das Standortgebiet wird wegen folgender eindeutiger Nachteile und Schwächen zurückgestellt: Das im Standortgebiet vorhandene Wirtgestein – die Mergel-Formationen des Helvetikums – hat im Vergleich zum Opalinuston ein beschränktes Selbstabdichtungsvermögen. Dies bedeutet, dass das Wirtgestein ein geklüftetes Medium mit erhöhter Transmissivität der präferentiellen Freisetzungspfade darstellt und auch wegen der beschränkten Homogenität eine deutlich weniger gute Barrierenwirksamkeit aufweist als der Opalinuston. Die Bedingungen zur Langzeitstabilität sind im Quervergleich zu denjenigen der Standortgebiete der Nordschweiz ungünstiger; es sind dies insbesondere die Modellvorstellungen zur Geodynamik und Neotektonik und die erhöhte Seismizität. Auch die erwartete Auswirkung der Erosion (Topographie, Vergletscherung) wird als deutlich ungünstiger eingestuft als in den Standortgebieten der Nordschweiz, wobei dies wegen der Möglichkeit der Anordnung der Lagerkammern in grosser Tiefe von weniger grosser Bedeutung ist. Weiter gestalten sich die Charakterisierung und Exploration des Standortgebiets als schwierig; dies betrifft die Lokalisierung von Fremdgesteinseinschlüssen und von Störungzonen, die potenziell stärker Wasser führend sind und/oder evtl. reaktiviert werden können und die Charakterisierung des Wirtgesteins bezüglich lokalisiertem Fluss in Diskontinuitäten sowie die Lokalisierung von Kalkbankabfolgen.

Eine graphische Darstellung der Bewertungsergebnisse (Häufigkeit der Bewertungsstufen der für den Vergleich zu verwendenden entscheidungsrelevanten Merkmale und Indikatoren) findet sich in Fig. 7.3-1.

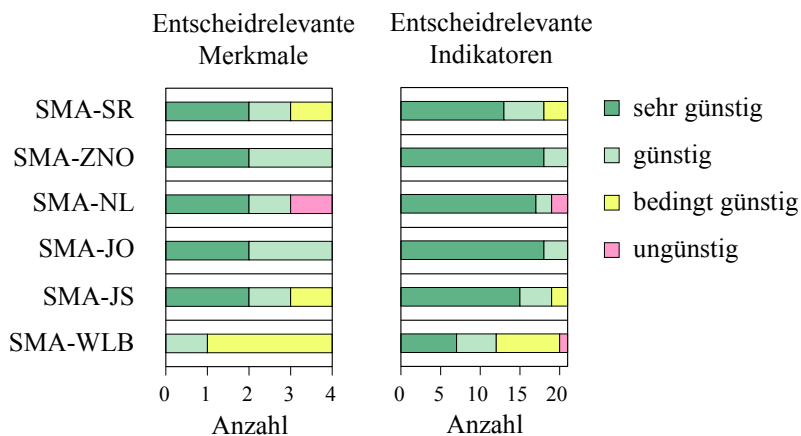


Fig. 7.3-1: Zusammenfassende Darstellung der Bewertungsergebnisse für die Standortgebiete bzw. die zugehörigen Lagerperimeter für das SMA-Lager (entscheidrelevante Merkmale und Indikatoren, massgebender Fall für die Einengung).

Die Histogramme zeigen die Anzahl Bewertungen für die verschiedenen Bewertungsstufen. Rosa und gelb können als Schwäche interpretiert werden, dunkelgrün als Stärke und hellgrün als indifferent.

7.3.2 Begründungen für das HAA-Lager

Nachfolgend werden zuerst die entscheiderelevanten Merkmale diskutiert. Basierend auf dieser Diskussion wird der sicherheitstechnische Vergleich der Standortgebiete erläutert.

Diskussion der entscheiderelevanten Merkmale und Indikatoren für das HAA-Lager

- Wirksamkeit der geologischen Barriere:** Die Barrierenwirkung bestimmt, wie gut die im geologischen Tiefenlager eingelagerten radioaktiven Stoffe zurückgehalten werden und dort vor ihrer Freisetzung zerfallen.
 Für das HAA-Lager wurde in Etappe 1 der Opalinuston als bevorzugtes Wirtgestein festgelegt. Zwischen den HAA-Standortgebieten gibt es bezüglich der nutzbaren Mächtigkeit und der Qualität der oberen Rahmengesteine kleinere Unterschiede, diese sind aber zu wenig stark ausgeprägt, um für die Einengung entscheidend zu sein.
- Langzeitstabilität der geologischen Barriere:** Eine geeignete Langzeitstabilität sorgt dafür, dass die notwendige Barrierenwirkung über den Betrachtungszeitraum erhalten bleibt. Die Abnahme der Radiotoxizität der eingelagerten Abfälle als Folge des radioaktiven Zerfalls ist ausschlaggebend für die Länge des Betrachtungszeitraums, welcher für das HAA-Lager 1 Million Jahre beträgt. Für die Langzeitstabilität sind die Erosion (Entstehung von Durchbruchsrinnen bis auf das Niveau des vertieften Hauptflussnetzes in Zusammenhang mit Vergletscherungen – teilweise erst möglich als Folge der Hebung sowie Über-tiefung von Rinnen durch glaziale Erosion) und mögliche differenzielle Bewegungen im Untergrund wichtig. Der Langzeitentwicklung wird bei der Abgrenzung der Lagerperimeter Rechnung getragen.

Für das HAA-Lager gibt es bezüglich Erosion deutliche Unterschiede bei der Tiefenlage des Wirtgesteins; das Wirtgestein liegt in den beiden Standortgebieten Zürich Nordost und Nördlich Lägern deutlich tiefer als im Standortgebiet Jura Ost. Bezüglich möglicher differenzieller Bewegungen im Untergrund gibt es keine relevanten Unterschiede zwischen den Standortgebieten, da den entsprechenden Zonen bei der Abgrenzung der Lagerperimeter ausgewichen wird. Weiter ist festzuhalten, dass der Opalinuston ein sehr gutes Selbstabdichtungsvermögen besitzt. Schliesslich ist auch die Zuverlässigkeit der Prognosen zur Langzeitentwicklung zu beachten. Diesbezüglich ist das Standortgebiet Jura Ost (beschränkte Prognostizierbarkeit bezüglich Bildung neuer Durchbruchsrinnen für Zeiten von deutlich mehr als 100'000 Jahren) weniger günstig als die Standortgebiete Zürich Nordost und Nördlich Lägern. Dieser Aspekt ist jedoch zu wenig ausgeprägt, um einen eindeutigen Nachteil zu bilden; die Bildung einer Durchbruchsrinne wird gesamthaft als unwahrscheinlich beurteilt, kann aber später im Betrachtungszeitraum nicht vollständig ausgeschlossen werden.

- **Charakterisier- und Explorierbarkeit der geologischen Barriere:** Die Charakterisierbarkeit beschreibt, wie genau und zuverlässig die für die Barrierenwirkung kritischen Elemente und Parameter erfasst werden können. Die Explorierbarkeit bestimmt, wie genau und zuverlässig die Tiefenlage der relevanten geologischen Horizonte bestimmt werden kann.

Zwischen den HAA-Standortgebieten gibt es bezüglich Explorierbarkeit kleinere Unterschiede, diese sind aber wenig stark ausgeprägt und sind für die Einengung nicht von Bedeutung. Das Gleiche gilt auch für die Charakterisierbarkeit des Wirtgesteins und der Rahmengesteine.

- **Bautechnische Machbarkeit eines Tiefenlagers unter Berücksichtigung der vorgeschlagenen Standortareale (inkl. Platzangebot untertags):** Im Rahmen der Analyse der bautechnischen Machbarkeit wird die Schädigung des Wirtgesteins in direkter Umgebung der Lagerkammern im Hinblick auf seine Barrierenwirkung und die mögliche Beeinträchtigung der technischen Barrieren als Folge des Ausbaus der Lagerkammern beurteilt. Bei der Analyse der bautechnischen Machbarkeit wird zusätzlich auch der Zugang nach Untertag von den Standortarealen zu den untertägigen Lagerperimetern bezüglich Sicherheit und technischer Machbarkeit geprüft. Weiter wird geprüft, ob das Platzangebot untertags innerhalb des Standortgebiets (bzw. des zugehörigen Lagerperimeters) im bevorzugten Tiefenbereich genügend gross ist.

Für das HAA-Lager ist es in den Standortgebieten Zürich Nordost und Jura Ost möglich, die optimierten Lagerperimeter so abzugrenzen, dass die maximale Tiefe der Lagerebene die bevorzugte Tiefe nicht überschreitet; die geotechnischen Bedingungen für den Bau der Lagerkammern sind dort geeignet. Im Standortgebiet Nördlich Lägern hingegen ist es nicht möglich, einen Lagerperimeter abzugrenzen, in welchem die maximale Tiefe der Lagerebene die bevorzugte Tiefe nicht erheblich überschreitet; das Standortgebiet Nördlich Lägern hat diesbezüglich einen gewichtigen eindeutigen Nachteil, denn die grosse Tiefenlage könnte zu einer Schädigung des Barrierensystems führen.

Die Beurteilung des Platzangebots untertags für die Standortgebiete (bzw. für die zugehörigen optimierten Lagerperimeter) ergibt bei Berücksichtigung der Vorgaben zur Langzeitstabilität und technischen Machbarkeit ein erhebliches Platzangebot untertags für das Standortgebiet Zürich Nordost und ein ausreichendes Platzangebot untertags für das Standortgebiet Jura Ost. Beim Standortgebiet Nördlich Lägern ergibt sich im bevorzugten Tiefenbereich ein ungenügendes Platzangebot untertags wegen zu grosser Tiefenlage des Wirtgesteins im Standortgebiet; das Standortgebiet Nördlich Lägern weist diesbezüglich einen eindeutigen Nachteil auf.

Die Beurteilung des Zugangs nach Untertag erfolgt für die verschiedenen Standortgebiete unter Berücksichtigung der durch die Nagra bezeichneten Standortareale. Die Beurteilung zeigt zwar kleinere Unterschiede zwischen den Standortgebieten, diese sind aber zu wenig stark ausgeprägt, um für die Einengung entscheidend zu sein.

Sicherheitstechnischer Vergleich für das HAA-Lager

Zusammenfassend ergibt der sicherheitstechnische Vergleich der Standortgebiete für das HAA-Lager folgendes Bild:

- **Zürich Nordost:** Das Standortgebiet wird für die vertiefte Untersuchung für Etappe 3 vorgeschlagen. Dieses Standortgebiet weist im bevorzugten Tiefenbereich ein erhebliches Platzangebot untertags auf und bietet deshalb breite Möglichkeiten zur optimalen Abgrenzung des Lagerperimeters. Dies führt zu einem bezüglich minimaler und maximaler Tiefenlage ausgewogenen Lagerperimeter mit einem grossen Platzangebot untertags, in welchem der einschlusswirksame Gebirgsbereich (Opalinuston kombiniert mit mächtigen Rahmengesteinen) sehr gute Barriereneigenschaften aufweist. Weiter bestehen dort auch gute Bedingungen bezüglich Explorierbarkeit und die geologische Situation bezüglich Langzeitstabilität ist günstig.
- **Nördlich Lägern:** Das Standortgebiet wird wegen folgender eindeutiger Nachteile zurückgestellt: In diesem Standortgebiet gibt es nur ein ungenügendes Platzangebot untertags im bevorzugten Tiefenbereich; es gibt deshalb keine Möglichkeit zur Anordnung des Lagers in bevorzugter Tiefenlage im Hinblick auf die bautechnische Machbarkeit. Bei grösseren Tiefen wäre das Platzangebot untertags zwar etwas grösser, aber die geotechnischen Herausforderungen wären gross und können zu einer erheblichen Schädigung des Barrierensystems führen, welche klar ausserhalb des erwünschten Bereichs liegt.
- **Jura Ost:** Das Standortgebiet wird für die vertiefte Untersuchung für Etappe 3 vorgeschlagen. Dieses Standortgebiet verfügt trotz der beschränkten Tiefenlage des Wirtgesteins über ein ausreichendes Platzangebot untertags im bevorzugten Tiefenbereich, in welchem der einschlusswirksame Gebirgsbereich (insbesondere der Opalinuston und in reduziertem Umfang auch seine Rahmengesteine) gute Barriereneigenschaften aufweist, auch wenn die Rahmengesteine im Standortgebiet Jura Ost etwas weniger mächtig und weniger günstig ausgebildet sind als im Standortgebiet Zürich Nordost. Die beschränkte Tiefenlage kann wegen Erosion zu einem reduzierten Beitrag der oberen Rahmengesteine führen. Weiter ist für Zeiten von deutlich mehr als 100'000 Jahren auch die Bildung einer Durchbruchsrinne zu betrachten. Die Bildung einer Durchbruchsrinne wird insgesamt jedoch als unwahrscheinlich beurteilt, kann aber später im Betrachtungszeitraum nicht vollständig ausgeschlossen werden. Die Dosisberechnungen unter Annahme einer Durchbruchsrinne zeigen, dass auch dann das Schutzziel gemäss ENSI (ENSI G03, ENSI (2009)) eingehalten wird. Der kleinere Schutz vor Erosion wird deshalb in der Gesamtbeurteilung als deutlich weniger bedeutend beurteilt als der eindeutige Nachteil des Standortgebiets Nördlich Lägern bezüglich der Tiefenlage im Hinblick auf die geotechnischen Bedingungen und die damit verbundene mögliche Schädigung des Barrierensystems und bezüglich dem damit verbundenen ungenügenden Platzangebot untertags in bevorzugter Tiefe.

Eine graphische Darstellung der Bewertungsergebnisse (Häufigkeit der Bewertungsstufen der für den Vergleich zu verwendenden entscheidungsrelevanten Merkmale und Indikatoren) findet sich in Fig. 7.3-2.

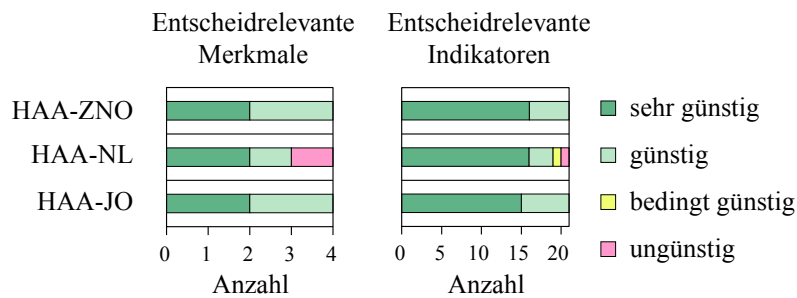


Fig. 7.3-2: Zusammenfassende Darstellung der Bewertungsergebnisse für die Standortgebiete bzw. die zugehörigen Lagerperimeter für das HAA-Lager (entscheidrelevante Merkmale und Indikatoren, massgebender Fall für die Einengung).

Die Histogramme zeigen die Anzahl Bewertungen für die verschiedenen Bewertungsstufen. Rosa und gelb können als Schwäche interpretiert werden, dunkelgrün als Stärke und hellgrün als indifferent.

7.4 Plausibilität der vorgeschlagenen geologischen Standortgebiete

Zur Prüfung der Plausibilität werden die in diesem Bericht unterbreiteten Vorschläge den in Etappe 1 gemachten Überlegungen der Nagra und der Beurteilung der Resultate von Etappe 1 durch die Behörden gegenübergestellt und kommentiert:

- **Auswahl der prioritären Wirtgesteine für das SMA-Lager:** Der Vorschlag der Nagra, in Standortgebieten, in denen mehr als ein Wirtgestein vorkommt, ein prioritäres Wirtgestein für die Einengung festzulegen, hat dazu geführt, dass mit Ausnahme des Standortgebiets Wellenberg überall der Opalinuston als Wirtgestein gewählt wurde. Diese günstige Einstufung des Opalinustons ist in Übereinstimmung mit Etappe 1, wo die Bewertung der Nagra den Opalinuston als Wirtgestein mit der besten Barrierenwirkung ergeben hat. Aus diesem Grund wurde der Opalinuston in Etappe 1 auch als das alleinige Wirtgestein für das HAA-Lager gewählt. Diese positive Einschätzung des Opalinustons durch die Nagra wurde von den Behörden in ihren Gutachten und Stellungnahmen für Etappe 1 bestätigt.
- **Abgrenzung der optimierten Lagerperimeter:** Für die Abgrenzung der Lagerperimeter wurden grundsätzlich die gleichen Überlegungen gemacht wie bei der Abgrenzung der bevorzugten Bereiche in Etappe 1: Bei der Abgrenzung werden die regionalen geologischen Elemente streng berücksichtigt. Die minimale Tiefenlage (Erosion) und die maximale Tiefenlage (Bautechnik) werden bei der Abgrenzung auch verwendet und unter Berücksichtigung des erforderlichen Platzangebots untertags nach Möglichkeit optimiert. Gegenüber Etappe 1 haben sich in Etappe 2 in der Ausgestaltung folgende Anpassungen, Differenzierungen und Weiterentwicklungen ergeben:
 - Für die regionalen geologischen Elemente wird anstelle der in Etappe 1 benutzten 'diffus gestörten Zonen' jetzt die vertiefte Information aus der Seismik genutzt. Es wird unterschieden zwischen 'regionalen Störungszonen' (analog zu Etappe 1) und den neu eingeführten 'zu meidenden tektonischen Zonen', welche auch bei der Abgrenzung verwendet werden.
 - Das grundsätzliche Konzept der 'zu meidenden tektonischen Zonen' wurde in Zusammenhang mit der Untersuchung des Zürcher Weinlands für den Entsorgungsnachweis eingeführt (Nagra 2002b), wo bei der Abgrenzung des Lagergebiets erster Priorität dieser Art von Zonen ausgewichen wurde. Diesem Vorgehen wurde damals von den Behörden zugestimmt.

- Die maximale Tiefenlage wurde reduziert von 900 m auf 700 m unter Terrain für das HAA-Lager und von 800 m auf 600 m unter Terrain für das SMA-Lager. Diese Anpassung berücksichtigt die Hinweise des ENSI und seiner Experten im Gutachten zu Etappe 1, und es entspricht auch dem Vorgehen anderer Entsorgungsorganisationen mit vergleichbarem Wirtgestein.
- Für die Langzeitentwicklung werden neu bei der Erosion Durchbruchsrinnen berücksichtigt, welche für die Bewertung des Standortgebiets Südranden wichtig sind und für deren Existenz es eindeutige Hinweise gibt (inkl. Nachweis der Neuhauserwald-Rinne innerhalb des Standortgebiets Südranden im Rahmen der Untersuchungen für Etappe 2). Die Möglichkeit der Bildung einer Durchbruchsrinne ist auch für ein HAA-Lager im Standortgebiet Jura Ost relevant, obschon dort innerhalb des Standortgebiets heute keine Durchbruchsrinnen existieren.
- **Bewertung und vergleichende Beurteilung der Standortgebiete bzw. Lagerperimeter:** Die Bewertung und die vergleichende Beurteilung der Standortgebiete bzw. Lagerperimeter im Vergleich zur Bewertung der Standortgebiete bzw. der bevorzugten Bereiche in Etappe 1 durch die Nagra bzw. die Behörden in ihren Gutachten und Stellungnahmen zeigen folgendes Bild:
 - In der detaillierten Bewertung der Nagra (Nagra 2008b; Anhang C) fielen für das SMA-Lager für den Opalinuston schon 2008 die Standortgebiete (bzw. bevorzugten Bereiche) Jura-Südfuss und Nördlich Lägern etwas ab; bezüglich Erosion wurde das Standortgebiet Südranden schon damals etwas schlechter bewertet, wo jetzt neu auch zusätzlich die Bildung von Durchbruchsrinnen betrachtet und die Neuhauserwald-Rinne nachgewiesen wurde.

Wie in der in diesem Bericht vorgenommenen Bewertung fiel das Standortgebiet Wellenberg auch in der Bewertung in Etappe 1 deutlich ab, ebenso fielen die bevorzugten Bereiche mit dem 'Braunen Dogger' und den Effinger Schichten als Wirtgestein in der Nagra-Bewertung in Etappe 1 deutlich ab.
 - In seinem Gutachten zu den Ergebnissen der Etappe 1 haben das ENSI und seine Experten auch eine Bewertung durchgeführt, die in den wesentlichen Punkten mit der Beurteilung der Nagra übereinstimmte. Auch die KNE stimmte in ihrer Beurteilung im Wesentlichen damit überein; einzig zum Wellenberg fielen die Vorbehalte noch deutlicher aus.
 - Für das HAA-Lager fiel das Standortgebiet Nördlich Lägern bei der Bewertung durch die Nagra etwas ab, auch wenn die Differenzen zu den Standortgebieten Zürich Nordost und Jura Ost klein waren. Dies war in Übereinstimmung mit der Bewertung des ENSI und seiner Experten, die vor allem wegen der grossen Tiefenlage klare Vorbehalte äusserten.

7.5 Ausblick

Die in diesem Bericht dokumentierten Vorschläge der geologischen Standortgebiete für das SMA- und das HAA-Lager, welche für Etappe 3 gemäss SGT vertieft zu untersuchen sind, werden durch die Behörden geprüft. Basierend auf den Resultaten aus der Behördenbegutachtung sowie den Ergebnissen aus Vernehmlassung und Anhörung werden die von den Bundesbehörden erstellten Objektblätter mit den weiter zu verfolgenden geologischen Standortgebieten ergänzt. Diese werden dem Bundesrat als Resultat der Etappe 2 zur Genehmigung vorgelegt. Gemäss BFE (BFE 2014) soll die Etappe 2 innerhalb von 2½ Jahren nach Einreichung der Vorschläge durch die Nagra abgeschlossen sein. Für Etappe 3 sind die verbleibenden geo-

logischen Standortgebiete für das SMA- und das HAA-Lager vertieft zu untersuchen und die standortspezifischen geologischen Kenntnisse mit erdwissenschaftlichen Untersuchungen (Seismik, Bohrungen, weitere Arbeiten) auf einen Stand zu bringen, der einen weiteren vertieften Vergleich und eine Wahl der Standorte für die Vorbereitung der Rahmenbewilligungsgesuche ermöglicht. Dies umfasst eine 3D-Seismik im Standortgebiet Jura Ost, eine Ergänzung der Seismik im Standortgebiet Zürich Nordost, Bohrungen zur Eichung der Seismik und zur Ergänzung der Charakterisierung der Eigenschaften der Wirt- und Rahmengesteine sowie zur Erfassung von Zustandsparametern, Bohrungen in tiefe Quartärrinnen zur Abklärung von Erosionsszenarien sowie Baugrunduntersuchungen für die Oberflächeninfrastruktur. Ca. 5 Jahre nach Abschluss von Etappe 2 sollen gemäss BFE (2014) die Rahmenbewilligungsgesuche eingereicht werden. Dies soll schliesslich zur raumplanerischen Festsetzung der Standorte für das SMA- und das HAA-Lager und zur Erteilung der Rahmenbewilligungen für die geologischen Tiefenlager führen. Gemäss BFE (2014) wird erwartet, dass der Standortentscheid für die geologischen Tiefenlager für SMA und HAA mit der Rahmenbewilligung durch den Bundesrat ca. 2027 erfolgen wird. Die Rahmenbewilligung wird durch den Bundesrat erteilt, muss durch das Parlament genehmigt werden und unterliegt dem fakultativen nationalen Referendum. Nach Vorliegen der rechtsgültigen Rahmenbewilligungen folgen der Bau der standortspezifischen Felslabors und die untertägige Erkundung. Dies führt dann zu den nuklearen Baubewilligungsverfahren; der Beginn der Betriebsphase für das SMA-Lager ist gemäss heutiger Planung im Jahr 2050 vorgesehen, für das HAA-Lager im Jahr 2060.

8 Literaturverzeichnis

- AG SiKa/KES (2011): Sachplan geologische Tiefenlager (SGT) Etappe 2: Fachbericht zu den ergänzenden Untersuchungen im Hinblick auf die Einengung. Arbeitsgruppe Sicherheit Kantone (AG SiKa) und Kantonale Expertengruppe Sicherheit (KES). Stellungnahme des Ausschusses der Kantone zu Etappe 2 (Mai 2011).
- AG SiKa/KES (2012): Anhörung zum Entsorgungsprogramm 2008 – Stellungnahme. Arbeitsgruppe Sicherheit Kantone (AG SiKa) und Kantonale Expertengruppe Sicherheit (KES) (August 2012).
- BFE (2008): Sachplan geologische Tiefenlager: Konzeptteil. Bundesamt für Energie BFE, Bern.
- BFE (2011a): Sachplan geologische Tiefenlager: Ergebnisbericht zu Etappe 1: Festlegungen und Objektblätter (30. November 2011). Bundesamt für Energie BFE, Abteilung Recht und Sicherheit. Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK, Bern.
- BFE (2011b): Sachplan geologische Tiefenlager: Bericht über die Ergebnisse der Anhörung zu Etappe 1 (30. November 2011). Bundesamt für Energie BFE, Abteilung Recht und Sicherheit. Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK, Bern.
- BFE (2013): Präzisierungen der Projektleitung für Etappe 2 SGT, in Anhang 1, ENSI 33/154 (Januar 2013). Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI, Brugg.
- BFE (2014): Newsletter Tiefenlager, April 2014 / N°12. Bundesamt für Energie, BFE, Bern.
- Birkhäuser, Ph., Roth, Ph., Meier, B.P. & Naef, H. (2001): 3D-Seismik: Räumliche Erkundung der mesozoischen Sedimentschichten im Zürcher Weinland. Nagra Tech. Ber. NTB 00-03.
- Bock, H., Dehandschutter, B., Martin, C.D., Mazurek, M., de Haller, A., Skoczylas, F. & Davy, C. (2010): Self-sealing of fractures in argillaceous formations in the context of geological disposal of radioactive waste. Review and synthesis, OECD/NEA, Paris.
- Chevalier, G., Diamond, L.W. & Leu, W. (2010): Potential for deep geological sequestration of CO₂ in Switzerland: a first appraisal. *Swiss J. Geoscience* 103, 427-455.
- Diamond, L.W., Leu, W. & Chevalier, G. (2010): Studie zur Abschätzung des Potenzials für CO₂-Sequestrierung in der Schweiz, mit 5 Anhängen von L. Burlini, N. Deichmann, H. Naef, R. Pini, R. Wyss. Bundesamt für Energie BFE, Bern.
- ENSI (2009): Spezifische Auslegungsgrundsätze für geologische Tiefenlager und Anforderungen an den Sicherheitsnachweis – Richtlinie für die schweizerischen Kernanlagen ENSI-G03. April 2009. Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI, Brugg.
- ENSI (2010a): Anforderungen an die provisorischen Sicherheitsanalysen und den sicherheitstechnischen Vergleich. Sachplan geologische Tiefenlager, Etappe 2. ENSI 33/075 (April 2010). Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI, Brugg.

- ENSI (2010b): Sicherheitstechnisches Gutachten zum Vorschlag geologischer Standortgebiete. Sachplan geologische Tiefenlager, Etappe 1. ENSI 33/070 (Januar 2010). Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI, Brugg.
- ENSI (2011): Stellungnahme zu NTB 10-01 "Beurteilung der geologischen Unterlagen für die provisorischen Sicherheitsanalysen in SGT Etappe 2". ENSI 33/115 (März 2011). Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI, Brugg.
- ENSI (2012): Sachplan geologische Tiefenlager, Etappe 1: Beurteilung der für das Einengungsverfahren verwendeten Indikatoren und der festgelegten Mindestanforderungen und Bewertungsskalen der Nagra. ENSI 33/43 (Januar 2012). Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI, Brugg.
- ENSI (2013a): Präzisierungen zur sicherheitstechnischen Methodik für die Auswahl von mindestens zwei Standortgebieten je für HAA und SMA in Etappe 2 SGT. ENSI 33/154 (Januar 2013). Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI, Brugg.
- ENSI (2013b): Ablauf der Überprüfung des geologischen Kenntnisstands vor Einreichen der sicherheitstechnischen Unterlagen für Etappe 2 SGT. ENSI 33/155 (Januar 2013). Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI, Brugg.
- ENSI (2013c): Anforderungen an die bautechnischen Risikoanalysen und an ergänzende Sicherheitsbetrachtungen für die Zugangsbauwerke in Etappe 2 SGT. ENSI 33/170 (Januar 2013). Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI, Brugg.
- ENSI (2014): Abschluss der Zwischenhalt-Fachsitzungen und Feststellung des Kenntnisstands zu den 41 ENSI-Forderungen aus ENSI 33/115. Brief des ENSI vom 22. August 2014 an das BFE. Zum Beschluss siehe Medienmitteilung vom 28.08.2014: <http://www.bfe.admin.ch/energie/00588/00589/00644/index.html?lang=de&msgid=54232>
- HSK (2007): Sachplan geologische Tiefenlager: Herleitung, Beschreibung und Anwendung der sicherheitstechnischen Kriterien für die Standortevaluation. HSK 33/001 (November 2007). Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI, Brugg.
- Jolley, S.J., Dijk, H., Lamens, J.H., Fisher, Q.J., Manzocchi, T., Eikmans, H. & Huang, Y. (2007): Faulting and fault sealing in production simulation models, Brent Province, northern North Sea. *Petroleum Geosci.* 13, 321-340.
- KEV (2004): Kernenergieverordnung vom 10.12.2004 (KEV). Systematische Sammlung des Bundesrechts SR 732.11, Schweiz.
- KNE (2010): Sachplan Geologische Tiefenlager, Etappe 1 – Stellungnahme der KNE zur Sicherheit und bautechnischen Machbarkeit der vorgeschlagenen Standortgebiete. Kommission Nukleare Entsorgung KNE, 23. Februar 2010. Eidgenössisches Departement für Verkehr, Umwelt und Kommunikation UVEK.
- KNE (2011): Sachplan Geologische Tiefenlager – Stellungnahme der KNE zur Klärung der Notwendigkeit ergänzender Untersuchungen für die provisorischen Sicherheitsanalysen in Etappe 2 SGT, Kommission Nukleare Entsorgung KNE, 28. März 2011. Eidgenössisches Departement für Verkehr, Umwelt und Kommunikation UVEK.

- KNS (2010): Sachplan geologische Tiefenlager Etappe 1 – Stellungnahme zum sicherheitstechnischen Gutachten des ENSI zum Vorschlag geologischer Standortgebiete. KNS 23/219, April 2010. Eidgenössische Kommission für nukleare Sicherheit KNS, Brugg.
- KNS (2011) Sachplan geologische Tiefenlager Etappe 2 - Stellungnahme zur Notwendigkeit ergänzender geologischer Untersuchungen in Etappe 2. KNS 23/247, Juni 2011. Eidgenössische Kommission für nukleare Sicherheit KNS, Brugg.
- Kohl, T., Schill, E. & Baujard, C. (2010): Integrative Geothermal Resource Assessment of the Swiss Molasse Basin. Proceedings of the World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia, 25-29 April 2010.
- Kosakowski, G. & Smith, P. (2014): Long-term evolution of the engineered gas transport system. Nagra Arbeitsber. NAB 14-16.
- Lanyon, G.W. & Madritsch, H. (2014): Simulation of layout determining fault networks based on 2D-seismic interpretations: Implications for subsurface space reserves in geological siting regions in northern Switzerland. Nagra Arbeitsber. NAB 14-88.
- Nagra (1994): Bericht zur Langzeitsicherheit des Endlagers SMA am Standort Wellenberg. Nagra Tech. Ber. NTB 94-06.
- Nagra (2002a): Project Opalinus Clay: Safety Report. Demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and long-lived intermediate-level waste (Entsorgungsnachweis). Nagra Tech. Ber. NTB 02-05.
- Nagra (2002b): Projekt Opalinuston: Synthese der geowissenschaftlichen Untersuchungsergebnisse: Entsorgungsnachweis für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive sowie langlebige mittelaktive Abfälle. Nagra Tech. Ber. NTB 02-03.
- Nagra (2004): 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 Tech. Ber. NTB 04-06.
- Nagra (2008a): Entsorgungsprogramm. Nagra Tech. Ber. NTB 08-01.
- Nagra (2008b): Vorschlag geologischer Standortgebiete für das SMA- und das HAA-Lager. Darlegung der Anforderungen, des Vorgehens und der Ergebnisse (Hauptbericht). Nagra Tech. Ber. NTB 08-03.
- Nagra (2008c): Vorschlag geologischer Standortgebiete für das SMA- und das HAA-Lager. Geologische Grundlagen. Nagra Tech. Ber. NTB 08-04.
- Nagra (2008d): 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. Nagra Tech. Ber. NTB 08-05.
- Nagra (2008e): Modellhaftes Inventar für radioaktive Materialien MIRAM 2008. Nagra Tech. Ber. NTB 08-06.

- Nagra (2009): Vorschlag geologischer Standortgebiete für das SMA- und das HAA-Lager: Darstellung der hydraulischen Durchlässigkeit versus Tongehalt in Sedimentgesteinen aus Tiefbohrungen in der Nordschweiz und am Wellenberg [...]. Nagra Arbeitsber. NAB 09-28.
- Nagra (2010): Beurteilung der geologischen Unterlagen für die provisorischen Sicherheitsanalysen in SGT Etappe 2. Klärung der Notwendigkeit ergänzender geologischer Untersuchungen. Nagra Tech. Ber. NTB 10-01.
- Nagra (2011): Sachplan geologische Tiefenlager Etappe 2: Vorschläge zur Platzierung der Standortareale für die Oberflächenanlage der geologischen Tiefenlager sowie zu deren Erschliessung. Genereller Bericht und Beilagenband. Nagra Tech. Ber. NTB 11-01.
- Nagra (2013/2014): *Nagra Planungsstudien*¹⁾
- Nagra (2014a): Charakteristische Dosisintervalle und Unterlagen zur Bewertung der Barriersysteme. Nagra Tech. Ber. NTB 14-03.
- Nagra (2014b): Geologische Grundlagen. Nagra Tech. Ber. NTB 14-02.
- Nagra (2014c): Bautechnische Risikoanalysen zur Realisierung der Zugangsbauwerke. Nagra Arbeitsber. NAB 14-50.
- Nagra (2014d): Ergänzende Sicherheitsbetrachtungen für die Untertageanlagen der geologischen Tiefenlager in der Betriebsphase – Vorgaben, Vorgehen und Dokumentation der Ergebnisse. Nagra Arbeitsber. NAB 14-51.
- Nagra (2014e): Modellhaftes Inventar für radioaktive Materialien MIRAM 2014. Nagra Tech. Ber. NTB 14-04.
- Nagra (2014f): Beurteilung der Tiefenlage in Bezug auf die geotechnischen Bedingungen: Grundlagen für die Abgrenzung und Bewertung der Lagerperimeter. Nagra Arbeitsber. NAB 14-81.
- Nagra (2014g): Provisorische Sicherheitsanalysen für SGT Etappe 2: Elektronischer Daten- und Resultateordner (EDR). Nagra Arbeitsber. NAB 14-36.
- Nagra (2014h): Konzepte für die Standortuntersuchungen der Etappe 3. Nagra Arbeitsber. NAB 14-83.
- Nagra (2014i): Standortgebiete für geologische Tiefenlager – Sicherheitstechnischer Vergleich: Vorschläge für Etappe 3. Nagra Broschüre.
- Nagra (2014j): Unterlagen zum Platzbedarf in den Lagerperimetern der geologischen Standortgebiete. Nagra Arbeitsber. NAB 14-99.
- Poller, A., Smith, P., Mayer, G. & Hayek, M. (2014): Modelling of Radionuclide Transport along the Underground Access Structures of Deep Geological Repositories. Nagra Tech. Ber. NTB 14-10.
- Signorelli, S., Andenmatten Berthoud, N. & Kohl, T. (2004): Geothermischer Ressourcenatlas der Schweiz: Erarbeitung und Bewertung des geothermischen Potentials der Schweiz. Schlussbericht. Im Auftrag des BFE, Bern.

StSV (1994): Strahlenschutzverordnung vom 22. Juni 1994 (Stand 1. Januar 2013). Systematische Sammlung des Bundesrechts SR 814.501, Schweiz.

swissnuclear (2013): Probabilistic Seismic Hazard Analysis for Swiss Nuclear Power Plant Sites – PEGASOS Refinement Project. Final Report, Vol. 1 – 5. Swissnuclear, Olten.

swisstopo (2005): Tektonische Karte der Schweiz 1:500'000. Bundesamt für Landestopographie swisstopo, Wabern (Bern).

¹⁾ Nagra (2013/2014): *Nagra Planungsstudien*:

Nagra (2013a): Sachplan geologische Tiefenlager Etappe 2: Standortareal WLB-1-SMA im Planungssperimeter Wellenberg für die Oberflächenanlage eines geologischen Tiefenlagers SMA: Planungsstudie. Nagra Arbeitsber. NAB 13-61.

Nagra (2013b): Sachplan geologische Tiefenlager Etappe 2: Standortareal JS-1-SMA im Planungssperimeter Jura-Südfuss für die Oberflächenanlage eines geologischen Tiefenlagers SMA: Planungsstudie. Nagra Arbeitsber. NAB 13-64.

Nagra (2013c): Sachplan geologische Tiefenlager Etappe 2: Standortareal JO-3+ SMA im Planungssperimeter Jura Ost für die Oberflächenanlage eines geologischen Tiefenlagers SMA: Planungsstudie. Nagra Arbeitsber. NAB 13-66.

Nagra (2013d): Sachplan geologische Tiefenlager Etappe 2: Standortareal JO-3+ HAA im Planungssperimeter Jura Ost für die Oberflächenanlage eines geologischen Tiefenlagers HAA: Planungsstudie. Nagra Arbeitsber. NAB 13-67.

Nagra (2013e): Sachplan geologische Tiefenlager Etappe 2: Standortareal JO-3+ Kombi im Planungssperimeter Jura Ost für die Oberflächenanlage eines geologischen Tiefenlagers Kombi: Planungsstudie. Nagra Arbeitsber. NAB 13-68.

Nagra (2013f): Sachplan geologische Tiefenlager Etappe 2: Standortareal SR-4-SMA im Planungssperimeter Südranden für die Oberflächenanlage eines geologischen Tiefenlagers SMA: Planungsstudie. Nagra Arbeitsber. NAB 13-81.

Nagra (2014k): Sachplan geologische Tiefenlager Etappe 2: Standortareal NL-2-SMA im Planungssperimeter Nördlich Lägern für die Oberflächenanlage eines geologischen Tiefenlagers SMA: Planungsstudie. Nagra Arbeitsber. NAB 14-03.

Nagra (2014l): Sachplan geologische Tiefenlager Etappe 2: Standortareal NL-2-HAA im Planungssperimeter Nördlich Lägern für die Oberflächenanlage eines geologischen Tiefenlagers HAA: Planungsstudie. Nagra Arbeitsber. NAB 14-04.

Nagra (2014m): Sachplan geologische Tiefenlager Etappe 2: Standortareal NL-2-Kombi im Planungssperimeter Nördlich Lägern für die Oberflächenanlage eines geologischen Tiefenlagers Kombi: Planungsstudie. Nagra Arbeitsber. NAB 14-05.

Nagra (2014n): Sachplan geologische Tiefenlager Etappe 2: Standortareal NL-6-SMA im Planungssperimeter Nördlich Lägern für die Oberflächenanlage des geologischen Tiefenlagers SMA: Planungsstudie. Nagra Arbeitsber. NAB 14-06.

- Nagra (2014o): Sachplan geologische Tiefenlager Etappe 2: Standortareal NL-6-HAA im Planungssperimeter Nördlich Lägern für die Oberflächenanlage des geologischen Tiefenlagers HAA: Planungsstudie. Nagra Arbeitsber. NAB 14-07.
- Nagra (2014p): Sachplan geologische Tiefenlager Etappe 2: Standortareal NL-6-Kombi im Planungssperimeter Nördlich Lägern für die Oberflächenanlage des geologischen Tiefenlagers Kombi: Planungsstudie. Nagra Arbeitsber. NAB 14-08.
- Nagra (2014q): Sachplan geologische Tiefenlager Etappe 2: Standortareal ZNO-6b-SMA im Planungssperimeter Zürich Nordost für die Oberflächenanlage des geologischen Tiefenlagers SMA: Planungsstudie. Nagra Arbeitsber. NAB 14-27.
- Nagra (2014r): Sachplan geologische Tiefenlager Etappe 2: Standortareal ZNO-6b-HAA im Planungssperimeter Zürich Nordost für die Oberflächenanlage des geologischen Tiefenlagers HAA: Planungsstudie. Nagra Arbeitsber. NAB 14-28.
- Nagra (2014s): Sachplan geologische Tiefenlager Etappe 2: Standortareal ZNO-6b-Kombi im Planungssperimeter Zürich Nordost für die Oberflächenanlage des geologischen Tiefenlagers Kombi: Planungsstudie. Nagra Arbeitsber. NAB 14-29.