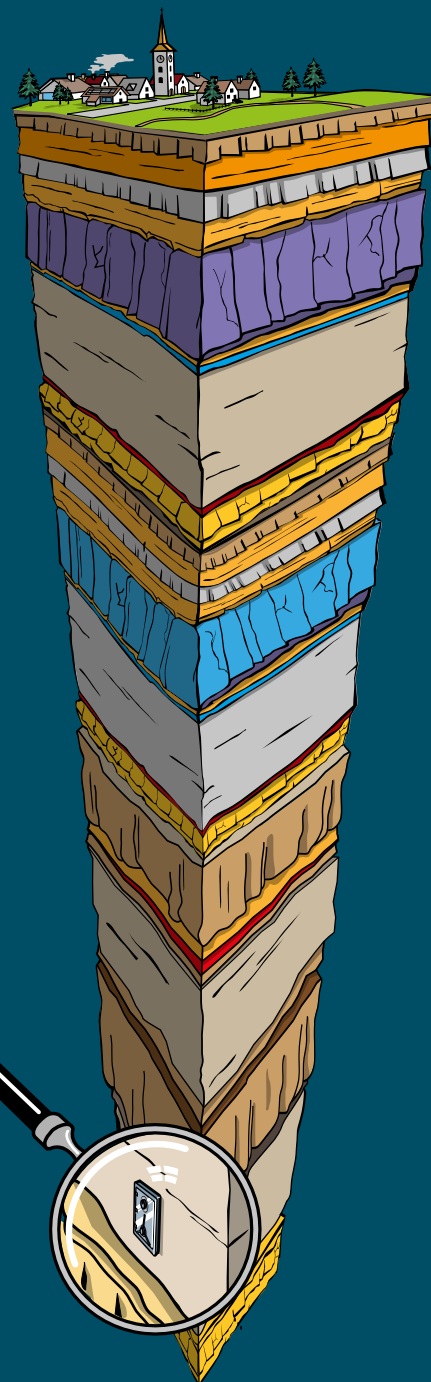


langzeit- sicherheit

die hauptaufgabe
der tiefenlagerung
radioaktiver abfälle



Zu diesem Heft

Dieses Heft handelt von Lagersystemen, technischen Barrieren, Wirtgestein und Naturanaloge eines geologischen Tiefenlagers für hochaktive Abfälle. Diese fallen beim Betrieb eines Kernkraftwerks an.

An Ausstellungen, Vorträgen oder anderen Veranstaltungen stellen Besucher und Besucherinnen Fragen zur Langzeitsicherheit eines geologischen Tiefenlagers. Sie interessieren sich insbesondere für den langfristigen Schutz vor radioaktiven Stoffen. Auch geologische Herausforderungen wie Erdbeben sowie die Langzeitvorsorge für kommende Generationen werden diskutiert. Das vorliegende Themenheft zeigt die wichtigsten Aspekte dazu.

Eine Auswahl der im Text vorkommenden Fachbegriffe sind im Glossar ab Seite 32 erläutert.

Langzeitsicherheit – die Hauptaufgabe der Tiefenlagerung radioaktiver Abfälle

Die Nagra veröffentlicht in loser Abfolge Themenhefte zur nuklearen Entsorgung
Oktober 2015

Druck

Köpfli & Partner AG, Neuenhof

Das Wichtigste in Kürze	4 – 7
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Sicherheit für lange Zeit – eine Einführung 4 – 7 	4 – 7
Langzeitsicherheit – warum?	8 – 11
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Die Auswirkung von Radioaktivität auf den Menschen 8 – 11 Warum sind radioaktive Stoffe gefährlich? 	8 – 11
Heute, morgen, übermorgen	12 – 29
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Tiefenlager als Langzeitschutz 12 – 15 Nicht tiefenlagern heisst immer beaufsichtigen ▪ Geologische Tiefenlager – Sicherheit für lange Zeit 16 – 17 Aufbau eines Tiefenlagers ▪ Die Entwicklung eines Tiefenlagers in der Zukunft 18 – 25 Im Zeitraffer durch die Zukunft ▪ Was können wir von der Natur für die Entsorgung lernen? 26 – 27 Erdgeschichtliche Vergangenheit als Wegweiser ▪ Wie wird Sicherheit nachgewiesen? 28 – 29 Sicherheitsanalysen als wichtiges Element 	12 – 29
Botschaften für Jahrtausende	30 – 31
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Wie kann man Informationen über ein Tiefenlager für künftige Generationen bewahren? 	30 – 31
Glossar	32 – 35

Das Wichtigste in Kürze

Sicherheit für lange Zeit – eine

Die radioaktiven Abfälle in der Schweiz müssen sicher entsorgt, das heisst für sehr lange Zeit vom menschlichen Lebensraum ferngehalten werden.

Schutz vor Radioaktivität

Natürliche Strahlung ist Bestandteil unseres Lebensraums (vgl. Abbildung 1). Vor einer zu hohen Strahlenbelastung muss man sich schützen, da diese zu gesundheitlichen Schäden führen kann. Vor einer Strahlenquelle ausserhalb des Körpers (äussere Bestrahlung) kann man sich leicht durch Abschirmen, Abstand halten oder eine kurze Aufenthaltsdauer schützen. Körperinnere Bestrahlung wird durch die Aufnahme von radioaktiven Stoffen (Radionukliden) hervorgerufen, die im Körper zerfallen. Gegen diese Bestrahlung kann man sich schützen, indem man die Aufnahme von Radionukliden vermeidet.

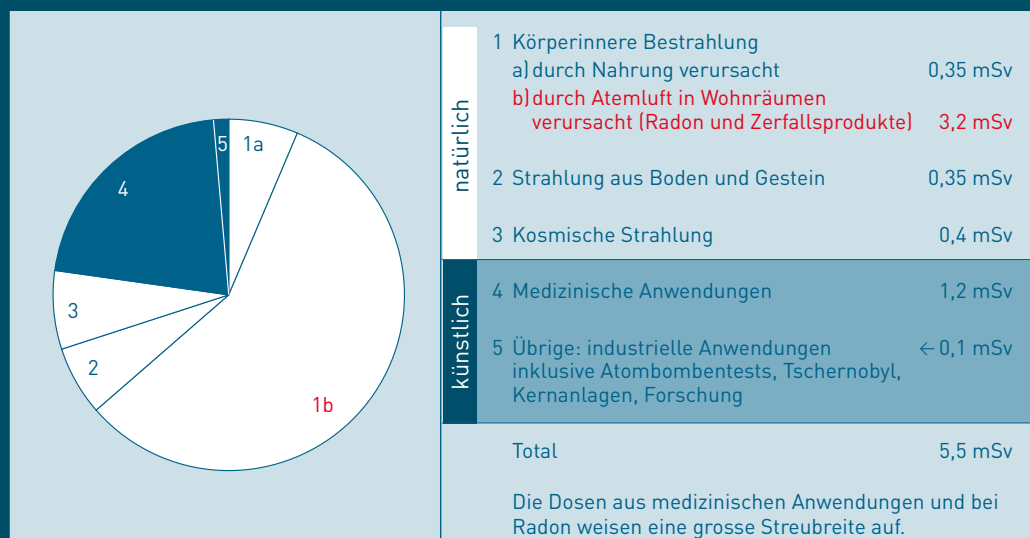
Radioaktive Abfälle müssen sicher eingeschlossen und vom Lebensraum des Menschen isoliert werden, um eine Aufnahme von darin enthaltenen Radionukliden in den Körper zu verhindern.

Tiefenlager sind Konsens

Im Gegensatz zu chemischen Abfällen nimmt die Toxizität von radioaktiven Abfällen durch Zerfall mit der Zeit ab. Es sind aber lange Einschlusszeiten nötig, bis die Strahlung der radioaktiven Abfälle auf ein Niveau abgeklungen ist, das auch in der Natur vorkommt (vgl. Abb. 7, Seiten 12 – 13).

An der Erdoberfläche, im Einflussbereich des Menschen, sind die Bedingungen nicht über lange Zeiträume stabil. Die Weltgeschichte ist von gesellschaftlichen und politischen Umwälzungen geprägt. An der Oberfläche müsste ein Lager für die radioaktiven Abfälle dauernd aktiv überwacht werden. Der sichere Einschluss wäre von einer gut funktionierenden Gesellschaft abhängig.

Geologische Prozesse im Untergrund laufen extrem langsam ab, unabhängig davon, was an der Erdoberfläche geschieht. Die Erdgeschichte zeigt uns, dass viele Gesteinsschichten über Millionen Jahre stabil bleiben und ihre Eigenschaften kaum ändern. Die benötigte Einschlusszeit für hochaktive Abfälle ist relativ kurz im Vergleich zu diesen



© Nagra

Abbildung 1

Mittlere jährliche Strahlenbelastung für eine Person in der Schweiz gemäss Bundesamt für Gesundheit (2014): Weitere Werte sind in der Abbildung 6, Seite 11 zu finden.

Einführung

Zeiträumen, in denen geologische Prozesse ablaufen. Die Abfälle in einem Tiefenlager werden – ohne Eingreifen des Menschen – passiv von undurchlässigen Gesteinsschichten eingeschlossen. Heute besteht ein internationaler Konsens darüber, dass hochaktive Abfälle in stabilen Gesteinsschichten im Untergrund entsorgt werden sollen. Nicht nur geologische Tiefenlager oder das Lagern der Abfälle an der Erdoberfläche wurden diskutiert. Verdünnung, Versenkung im Meer oder selbst das Entsorgen der radioaktiven Abfälle im Weltall waren im Gespräch oder wurden sogar durchgeführt. Diese Konzepte sind aber teilweise mit hohen Risiken für Mensch und Umwelt behaftet, sodass sie nicht mehr verfolgt werden. Im Schweizer Kernenergiegesetz sind geologische Tiefenlager vorgeschrieben (vgl. Textkasten unten). Die radioaktiven Abfälle müssen rückholbar eingelagert werden.

Wissenschaftler weltweit sind sich einig, dass es am sichersten ist, hochaktive Abfälle tief im Untergrund in geologischen Tiefenlagern einzuschliessen. Dort können die Abfälle über Jahrtausende bis zur Unschädlichkeit zerfallen.

Barrieren geben Sicherheit

In geologischen Tiefenlagern werden die radioaktiven Stoffe von Behältern, Stollenverfüllung, Lagereinbauten und vom angrenzenden Gestein sicher eingeschlossen. Diese technischen und natürlichen Barrieren (sog. Sicherheitsbarrieren, vgl. Seite 17) sorgen dafür, dass keine unzulässigen Mengen von radioaktiven Stoffen aus dem Tiefenlager durch Wasser herausgelöst und über das angrenzende Gestein an die Erdoberfläche in unseren Lebensraum gelangen können. Sie stellen sicher, dass die strengen Schutzziele für Mensch und Umwelt auch langfristig zuverlässig eingehalten werden.

Mehrere technische und natürliche Sicherheitsbarrieren gewährleisten in einem Tiefenlager, dass die hochaktiven Abfälle für sehr lange Zeit vom Lebensraum des Menschen und damit von der Erdoberfläche ferngehalten werden.

Kernenergiegesetz

In der Schweiz schreibt das Kernenergiegesetz die geologische Tiefenlagerung für radioaktive Abfälle vor:

Art. 31 Pflicht zur Entsorgung

1 Wer eine Kernanlage betreibt oder stilllegt, ist verpflichtet, die aus der Anlage stammenden radioaktiven Abfälle auf eigene Kosten sicher zu entsorgen. Zur Entsorgungspflicht gehören auch die notwendigen Vorbereitungsarbeiten wie Forschung und erdwissenschaftliche Untersuchungen sowie die rechtzeitige Bereitstellung eines geologischen Tiefenlagers.

Art. 37 Betriebsbewilligung

1 Für geologische Tiefenlager wird die Betriebsbewilligung erteilt, wenn [...]:

- die während des Baus gewonnenen Erkenntnisse die Eignung des Standortes bestätigen;
- die Rückholung der radioaktiven Abfälle bis zu einem allfälligen Verschluss ohne grossen Aufwand möglich ist.

Sicherer Einschluss auch in Zukunft

Während des Zerfalls der Radioaktivität laufen im geologischen Tiefenlager langsame Prozesse ab: Der Bentonit sättigt sich mit Wasser auf und die Lagerbehälter korrodieren. Auch das Verhalten des Bentonits und des Wirtgesteins Opalinuston sind gut erforscht. Dies lässt detaillierte Aussagen über die zukünftige Entwicklung des Lagers zu, bis die Radioaktivität auf natürliche Werte abgeklungen ist (vgl. Seiten 18 – 25).

Wissenschaftler erforschen mittels Experimenten in den geologischen Felslabors der Schweiz und anhand von Modellen, wie sich die Sicherheitsbarrieren in einem geologischen Tiefenlager in Zukunft verhalten.

Lernen von der Natur

Die Materialien, die für technische Barrieren in einem geologischen Tiefenlager vorgesehen sind, existieren in vergleichbarer Form einzeln oder sogar in Kombination als natürliche Lagerstätten oder archäologische Relikte. Diese Lagerstätten können als eine Art Langzeitexperiment betrachtet werden und bieten wertvolle Anschauungsbeispiele für das langfristige Verhalten der Tiefenlager (vgl. Seiten 26 – 27).

Studien über natürliche Abläufe, die sich über sehr lange Zeiträume ausdehnen, helfen dabei, das Langzeitverhalten geologischer Tiefenlager zu verstehen.



© Comet Photoshopping, Dieter Enz

Abbildung 2

100 Personen arbeiten bei der Nagra an der Entsorgung der radioaktiven Abfälle der Schweiz.

Sicherheit kommt an erster Stelle

Die richtige Standortwahl und die Auslegung der geologischen Tiefenlager sorgen für die Langzeitsicherheit. Die Nagra macht umfassende Sicherheitsanalysen, welche die Wirkung der technischen und natürlichen Barrieren untersuchen, nachdem das Tiefenlager ordnungsgemäss verschlossen worden ist. Laufend detailliertere Sicherheitsanalysen sind in allen Etappen des Sachplans geologische Tiefenlager sowie in späteren Bewilligungsverfahren vorgesehen. Dabei muss nachgewiesen werden, dass die mögliche zusätzliche Strahlenbelastung für die Bevölkerung an der Erdoberfläche einen bestimmten Wert, das Schutzkriterium von

0,1 Millisievert pro Jahr, nicht überschreitet. Dies entspricht einem Fünfzigstel der durchschnittlichen jährlichen Strahlenbelastung für einen Menschen in der Schweiz.

Informationen für die Zukunft

Über die Markierung eines Tiefenlagers wird viel diskutiert. Diese soll ein unbeabsichtigtes Eindringen ins Lager verhindern. Es gibt verschiedene Möglichkeiten, die Informationen zu einem Tiefenlager über lange Zeiten zu erhalten.

Die Nagra macht umfassende Sicherheitsanalysen und modelliert die Wirkung der technischen und natürlichen Barrieren nach dem ordnungsgemässen Verschluss des geologischen Tiefenlagers.

Weltweit beschäftigen sich viele Länder damit, wie man das Wissen über geologische Tiefenlager für kommende Generationen bewahren kann. Eine Möglichkeit ist, die Information in verschiedenen Archiven aufzuheben.

Langzeitsicherheit – wa

Die Auswirkung von Radioaktivi

Radioaktive Abfälle müssen sicher eingeschlossen und vom Lebensraum des Menschen isoliert werden, um eine Aufnahme von darin enthaltenen Radionukliden in den Körper zu verhindern.

Radioaktivität ist ein natürlicher Bestandteil der Umwelt. Sie stammt vor allem aus Böden und Gesteinen. Dazu trägt auch das radioaktive Edelgas Radon bei, das aus dem Untergrund entweicht und sich in Kellerräumen sammeln kann. Verschiedene weitere Quellen tragen massgeblich zur natürlichen Strahlenbelastung bei (vgl. Abbildung 1, Seite 4 und Abbildung 6, Seite 11).

Radioaktive Stoffe senden ionisierende Strahlung aus. Davon gibt es drei Arten: Alpha-, Beta- und Gammastrahlung. All diese Strahlenarten haben die Fähigkeit, Elektronen aus der Atomhülle zu entfernen. Dies kann zum Aufbrechen chemischer Verbindungen führen. Deshalb werden diese Strahlungsarten als ionisierend bezeichnet. Alpha-

und Betastrahlen sind Teilchenstrahlen. Sie bestehen aus Heliumkernen respektive Elektronen. Gammastrahlen sind – wie Licht oder Radiowellen – elektromagnetische Wellen, aber mit einer viel kürzeren Wellenlänge und daher energiereicher.

Wie kann man sich schützen?

Für den Schutz vor äusserer Bestrahlung gelten drei Grundsätze:

- Abschirmen
- Abstand einhalten
- Aufenthaltszeiten beschränken

Strahlenquellen kann man abschirmen. Für die verschiedenen Strahlungsarten werden unterschiedlich dicke Materialien benötigt. Um Alphastrahlen zurückzuhalten, reichen schon ein Blatt Papier oder wenige Zentimeter Luft aus. Alphastrahlen durchdringen die obersten Hautschichten



© SKB

Abbildung 3

Verbrauchte Brennelemente im schwedischen Zwischenlager CLAB in Oskarshamn: Die Strahlung der verbrauchten Brennelemente wird durch Wasser abgeschirmt.

rum?

tät auf den Menschen

des Körpers nicht. Zur Abschirmung von Betastrahlen wird eine etwa zwei Millimeter dicke Aluminiumplatte benötigt. Diese Strahlenart kann ins Körpergewebe des Menschen eindringen. Um Gammastrahlen abzuschirmen, werden dichte Materialien benötigt. Um beispielsweise die vom Radionuklid Cäsium-137 (instabile Variante des Elements Cäsium) ausgesendeten Gammastrahlen auf die Hälfte zu reduzieren, braucht es sieben Millimeter Blei oder 1,5 Zentimeter Eisen (vgl. Abbildung 4). Wasser wird in Kernkraftwerken zum Abschirmen der von den verbrauchten Brennelementen ausgesendeten Strahlung verwendet (vgl. Abbildung 3).

Die gesundheitliche Auswirkung von radioaktiven Stoffen ist grösser, wenn sie ins Körperinnere aufgenommen werden, als wenn ihre Strahlung von aussen auf den Körper wirkt.

Einheit

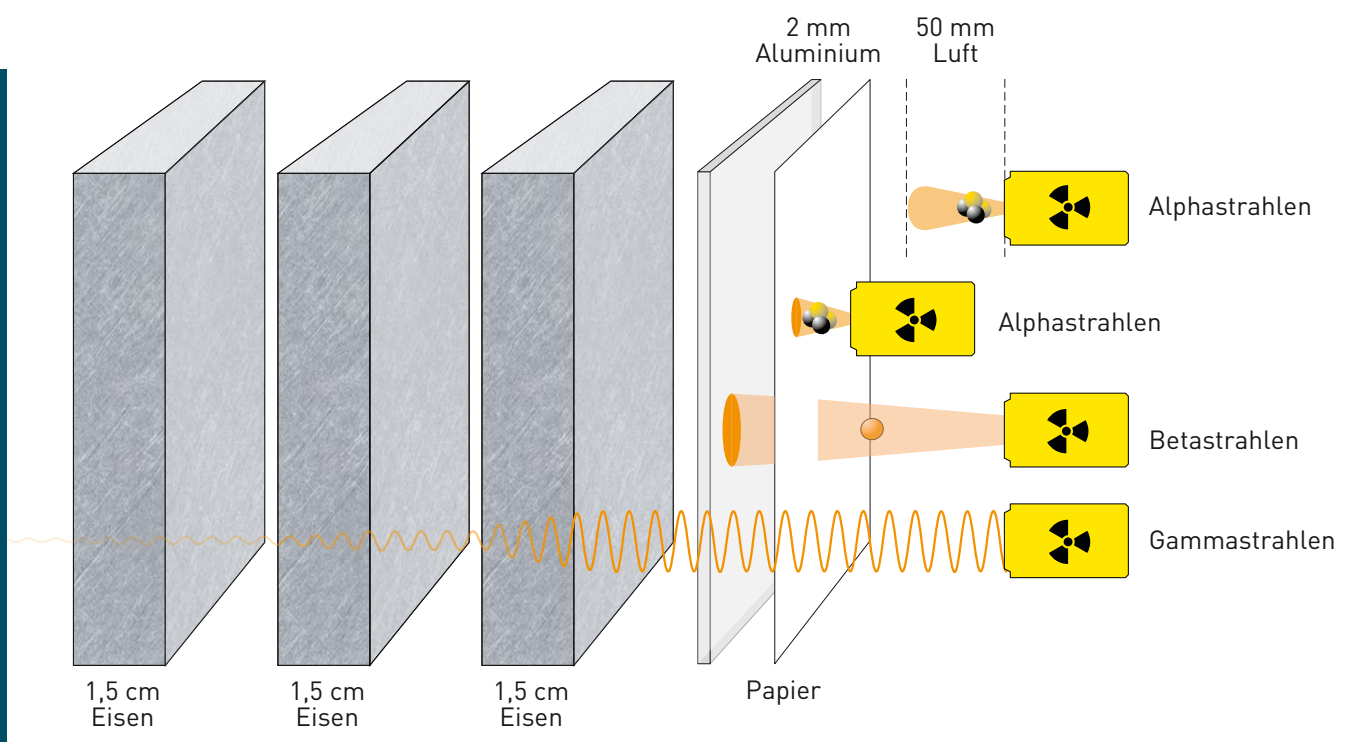
Sievert (Sv)

Die durch ionisierende Strahlung (Alpha-, Beta-, Gamma- und Röntgenstrahlen) verursachte Dosis wird in Sievert angegeben (sog. Äquivalentdosis). Dies ist ein Mass für die biologische Wirkung der Strahlung. Eine gleich hohe Anzahl Sievert bedeutet eine gleiche Strahlenbelastung.

$$1 \text{ Sv} = 1\,000 \text{ mSv (Millisievert)}$$

Abbildung 4

Abschirmung unterschiedlicher Strahlenarten



Vermeiden von Strahlenbelastung

Gegen eine körperlere Bestrahlung schützt man sich, indem man die Aufnahme von radioaktiven Stoffen via Nahrung, Trinkwasser oder Atemluft vermeidet (vgl. Abbildung 5). Mögliche Schutzmassnahmen in der Forschung oder Industrie sind beispielsweise Filtermasken, wenn mit flüchtigen radioaktiven Stoffen gearbeitet wird. Für das private Umfeld kann es sinnvoll sein, den Keller regelmässig zu lüften, um einer Belastung durch Radon vorzubeugen. Oberflächliche Verunreinigungen durch radioaktive Stoffe, sogenannte Kontaminationen, sind abwaschbar.

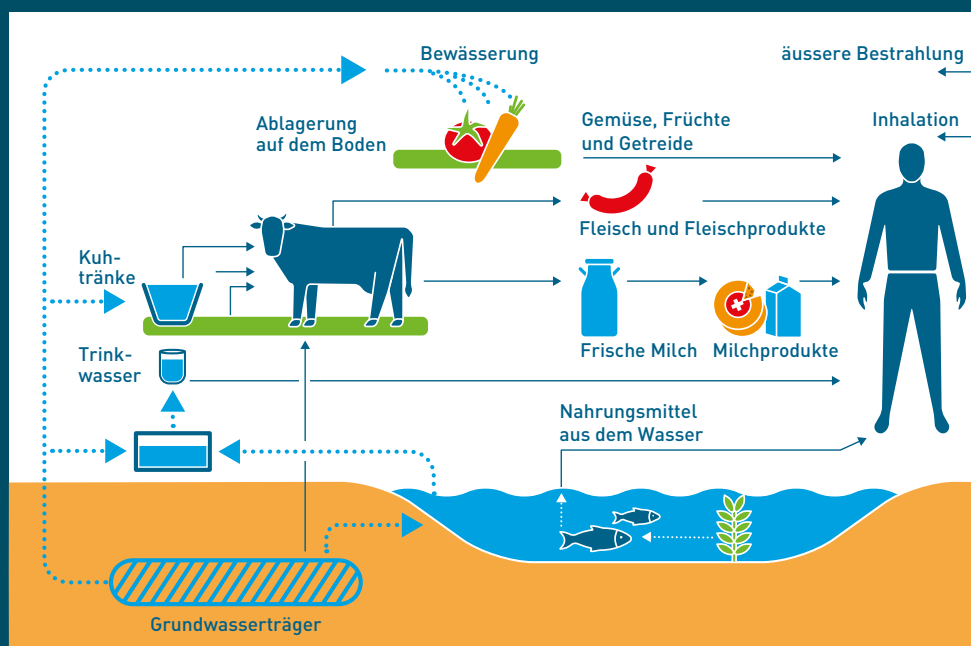
Im Körperinneren zerfallen aufgenommene radioaktive Stoffe. Dabei können Zellen, Gewebe oder Organe direkt geschädigt werden. Wie lange diese Strahlenbelastung andauert, hängt von der Halbwertszeit und der biologischen Verweildauer der Radionuklide im Körper ab.

Dosis: ein Mass für die Wirkung

Die Auswirkung der Strahlung hängt von der aufgenommenen Dosis ab. Wird eine Dosis von ungefähr 250 Millisievert innerhalb kurzer Zeit aufgenommen, treten die ersten Anzeichen einer Strahlenkrankheit auf. Diese Menge entspricht etwa der Strahlenbelastung von 20 Computertomografien von Bauch bis Becken (vgl. Abbildung 6). Bei steigender Dosis können unter anderem Übelkeit, Erbrechen und Kopfschmerzen auftreten. Eine zu starke Strahlenbelastung kann zu Langzeitschäden wie Krebs führen.

Sicheren Einschluss gewährleisten

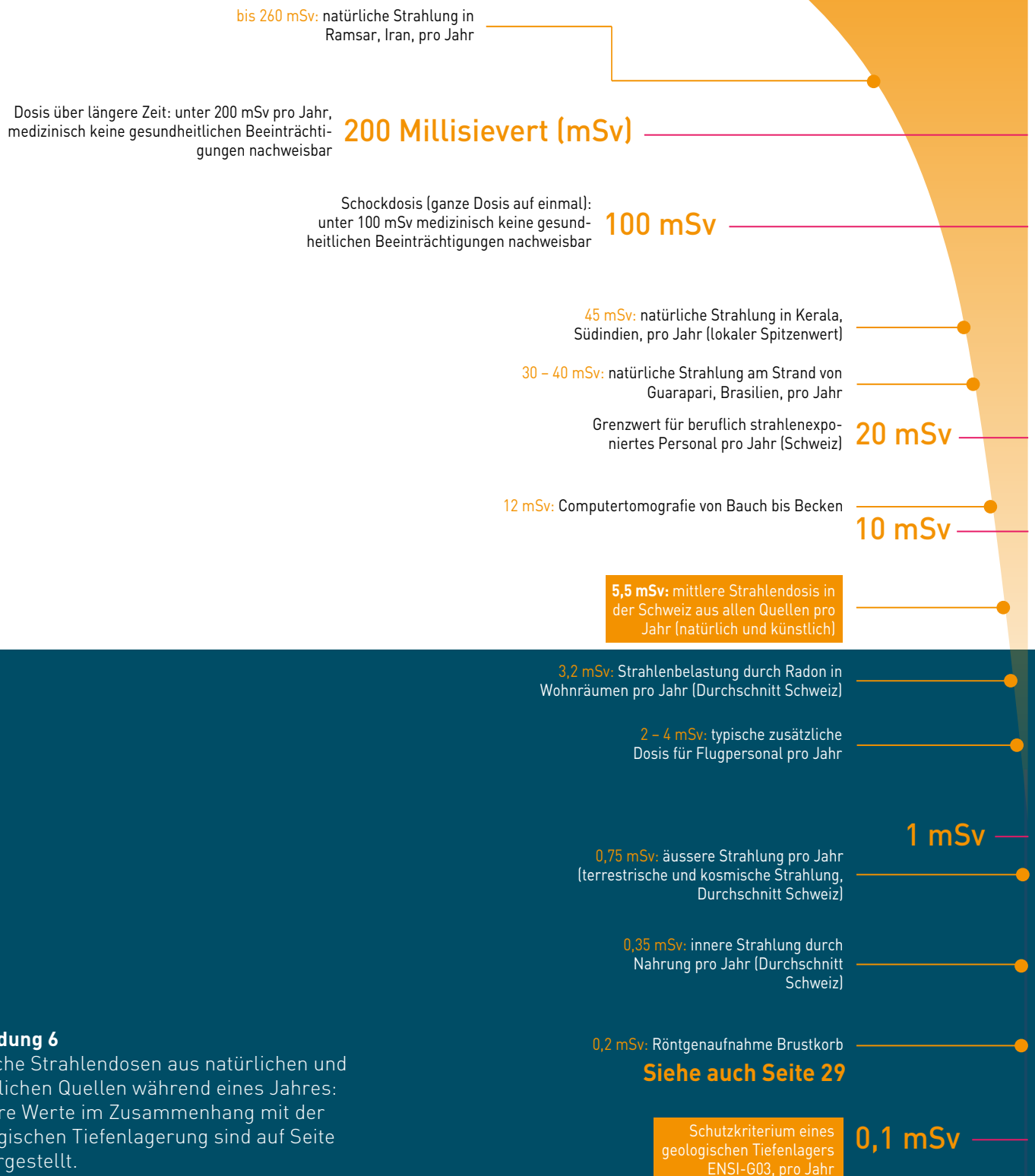
Radioaktive Abfälle müssen sicher eingeschlossen und vom Lebensraum des Menschen (Biosphäre) isoliert werden, um eine Aufnahme von Radionukliden in den Körper zu verhindern. Um dies sicherzustellen, werden die radioaktiven Abfälle der Schweiz in einem Tiefenlager eingeschlossen.



© Claudio Köppel

Abbildung 5
Aufnahme von Radionukliden durch den Menschen

Strahlendosen aus natürlichen und künstlichen Quellen

**Abbildung 6**

Typische Strahlendosen aus natürlichen und künstlichen Quellen während eines Jahres: Weitere Werte im Zusammenhang mit der geologischen Tiefenlagerung sind auf Seite 29 dargestellt.

Heute, morgen, übermo

Tiefenlager als Langzeitschutz

Wissenschaftler sind sich weltweit einig, dass es am sichersten ist, radioaktive Abfälle tief im Untergrund in geologischen Tiefenlagern einzuschliessen. Dort können diese über Jahrtausende bis zur «Unschädlichkeit» zerfallen. Die natürliche Strahlung dient als Vergleich dazu.

Radioaktive Abfälle müssen so entsorgt werden, dass der dauernde Schutz von Mensch und Umwelt gewährleistet ist. Dazu müssen sie getrennt von unserem Lebensraum aufbewahrt werden. Man weiss aus zahlreichen geologischen Untersuchungen, dass der Untergrund in verschiedenen Zonen in der Schweiz über sehr lange Zeiträume ungestört blieb. Gesteinsschichten können nachweislich über viele Jahrtausende stabil bleiben und ihre Eigenschaften behalten. Dies ermöglicht den sicheren Einschluss der radioaktiven Abfälle über sehr lange Zeiträume. Im Untergrund steht die Zeit sozusagen still, unabhängig davon, was an der Erdoberfläche geschieht.

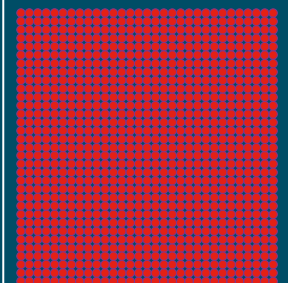
Wie lange sind die Abfälle einzuschliessen?

Der grösste Teil der radioaktiven Abfälle zerfällt rasch (vgl. Abbildung 7). Nach rund zweihundert Jahren beträgt die Strahlung der Abfälle im Tiefenlager nur noch wenige Prozent im Vergleich zum Einlagerungszeitpunkt. Der Anteil radioaktiver Stoffe mit hohen Halbwertszeiten strahlt schwächer, aber über lange Zeit.

In 200 000 Jahren sind die hochaktiven Abfälle (HAA) noch etwa so radiotoxisch wie die entsprechende Menge natürliches Uranerz, die zur Herstellung der Brennelemente abgebaut wurde. Für die Sicherheitsanalysen wird ein Zeitraum von einer Million Jahre betrachtet.

Abbildung 7
Zerfall der hochaktiven Abfälle über einen Zeitraum von einer Million Jahre

Abfälle in Zwischenlager



Aufsummierte Aktivität
sämtlicher Brennelemente
1 Monat
nach Entnahme aus
Reaktor

100%

rgen

Andere Konzepte verworfen

Neben der geologischen Tiefenlagerung wurden auch weitere Entsorgungslösungen geprüft. Dies waren zum Beispiel:

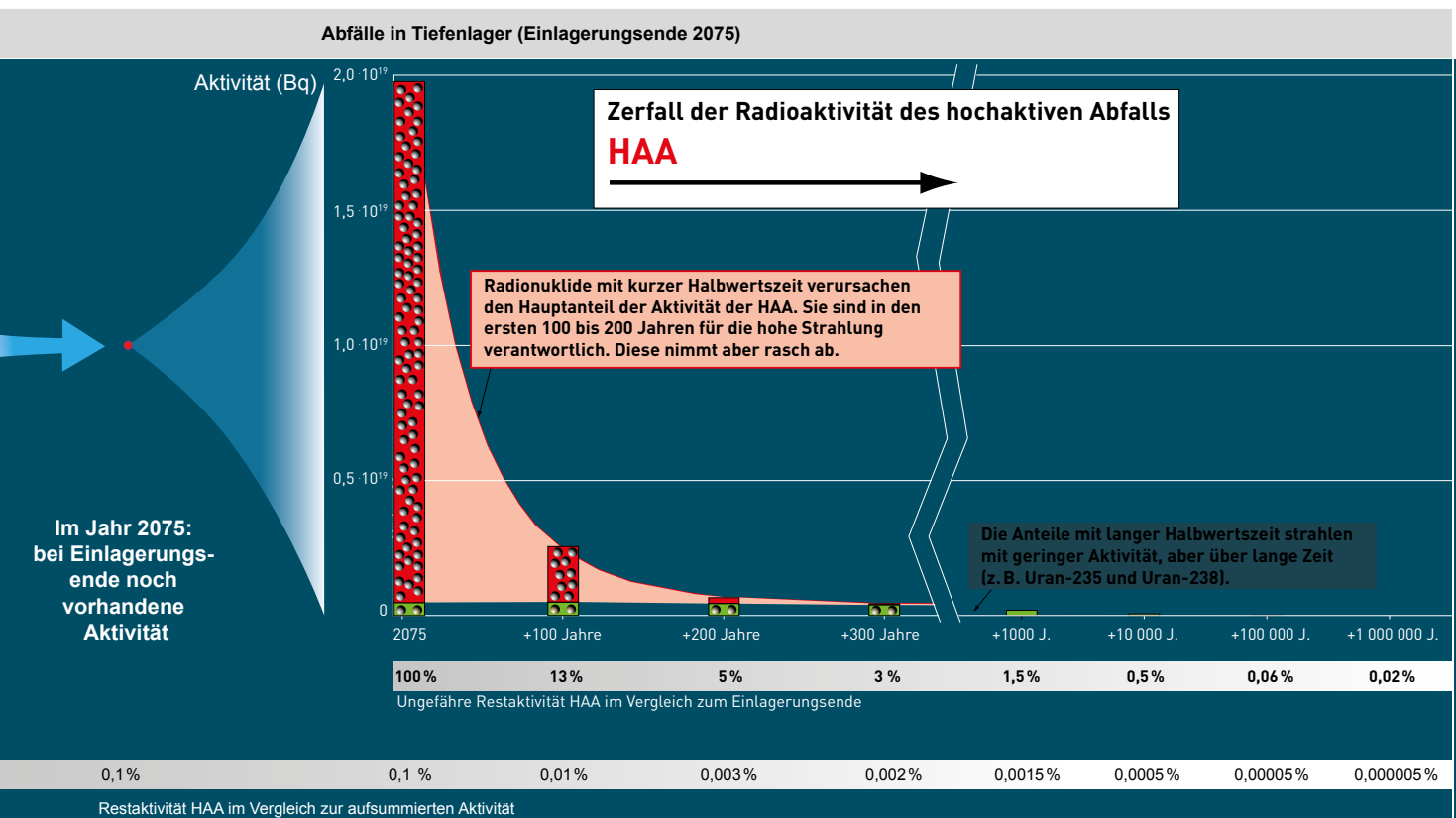
- Verdünnung der radioaktiven Abfälle in die Umwelt
- Entsorgung in ungestörten Meeressedimenten
- Entsorgung im Eis der Antarktis
- Entsorgung im Weltall

Diese Konzepte werden heute nicht mehr verfolgt. Die Versenkung der Abfälle im Meer ist beispielsweise stark umstritten und heute gesetzlich verboten. Die Entsorgung mit Hilfe von Raketen hat ein zu hohes Risiko wegen Explosionen beim Start.

In der Schweiz schreibt das Kernenergiegesetz die Lagerung radioaktiver Abfälle in geologischen Tiefenlagern vor. Die geologische Tiefenlagerung gilt nicht nur in der Schweiz als sicherste Methode. Sie ist weltweit von Experten anerkannt.

Langzeitsicherheit von Anfang an

Die Vorkehrungen für die Langzeitsicherheit eines geologischen Tiefenlagers beginnen schon während der Standortwahl, der Auslegung und dem Bau der untertägigen Anlagen. Während der Standortwahl wird Zonen mit deformierten Gesteinsschichten (Störungszonen) ausgewichen. Das Tiefenlager muss einerseits in einer Tiefe gebaut werden, die ausreichend ist, um vor Gletschern und Erosion zu schützen. Eine zu grosse Tiefenlage kann andererseits die technischen Barrieren und das Wirtgestein beeinträchtigen. Die Anordnung der Lagerstollen im Wirtgestein ist wichtig, damit man die radioaktiven Abfälle optimal einlagern kann. Dies schafft beste Voraussetzungen für einen dauerhaft sicheren Einschluss der Abfälle.



Nicht tiefenlagern heisst beaufsichtigen

Sollte kein Tiefenlager gebaut werden, müssten die Abfälle permanent an der Erdoberfläche gelagert werden. Dies würde die Gesellschaft vor eine unlösbare Aufgabe stellen. Die Beaufsichtigung und der Unterhalt solcher Oberflächenlager müssten über viele Jahrtausende sichergestellt werden. Die gesellschaftliche Entwicklung ist innerhalb solcher Zeiträume nicht vorhersehbar. So könnten zum Beispiel Kriege, Revolutionen, aber auch Epidemien verhindern, dass man die Abfälle weiter überwachen kann, und es bestände die Gefahr, dass sie in falsche Hände geraten.

Verschlossen, aber kontrolliert

Die Überwachung der radioaktiven Abfälle ist im Kernenergiegesetz vorgeschrieben. In einem Pilotlager (siehe Seite 16) kann das Verhalten der verschiedenen Sicherheitsbarrieren nach dem Verschluss der Lagerstollen überwacht werden. In dieser Beobachtungsphase müssen die Abfälle ohne grossen Aufwand zurückgeholt werden können.

Die Ergebnisse der Überwachung müssen auf die Vorgänge im Hauptlager übertragbar sein. Sie bilden eine Grundlage für den Entscheid über den Verschluss des Tiefenlagers (Kernenergieverordnung Artikel 66).

Die Länge der Beobachtungsphase ist nicht vorgeschrieben. Zukünftige Generationen sollen selbst entscheiden, ob und wann sie das Lager endgültig verschliessen wollen.

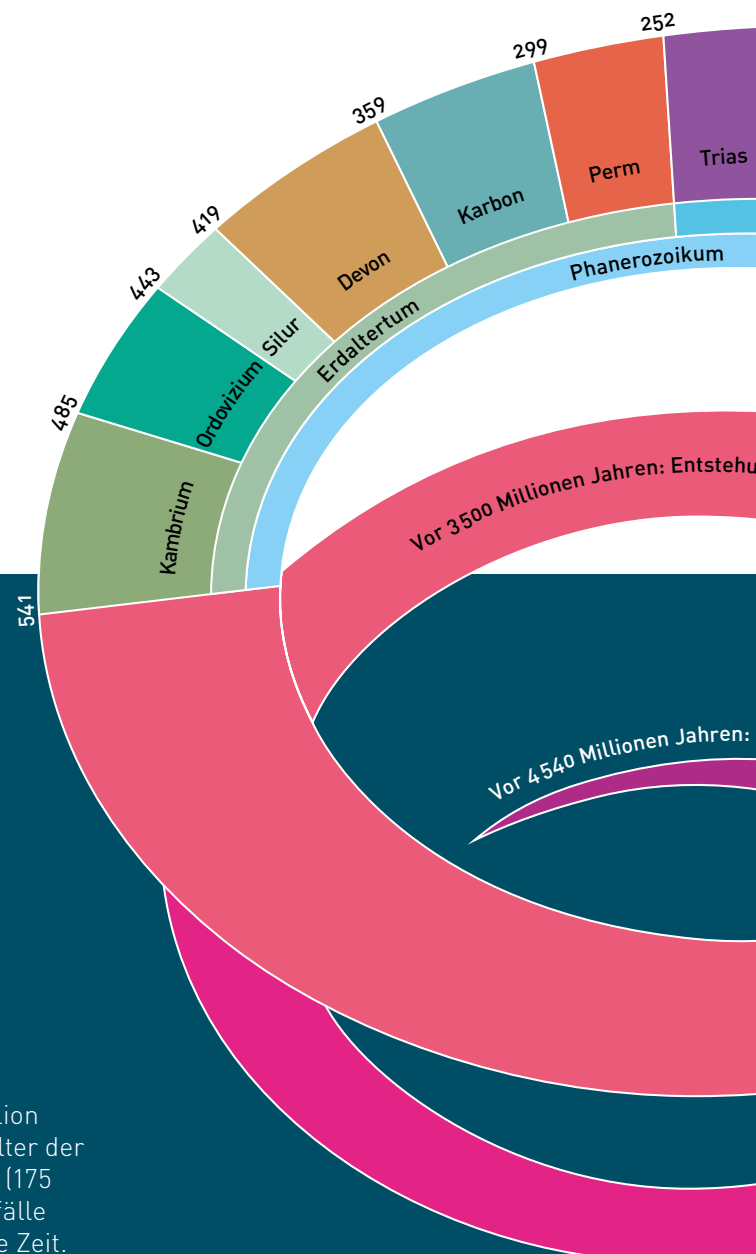


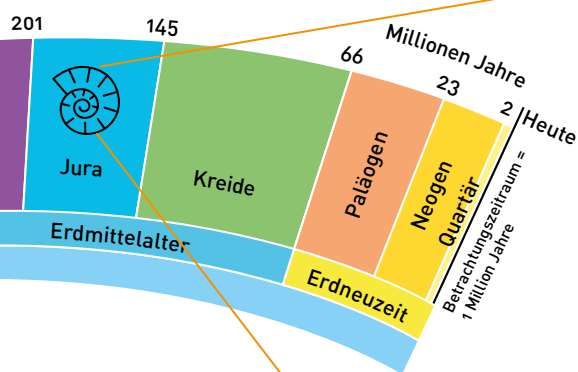
Abbildung 8

Im Vergleich mit der menschlichen Geschichte sind eine Million Jahre eine unvorstellbar lange Zeitspanne. Gemessen am Alter der Erde (4,54 Milliarden Jahre) oder am Alter des Opalinustons (175 Millionen Jahre), der als Wirtgestein für die radioaktiven Abfälle der Schweiz vorgeschlagen wurde, ist es aber nur eine kurze Zeit.

Barrieren geben Sicherheit

Gemäss Schweizer Tiefenlagerkonzept kann ein Tiefenlager nach erfolgtem Verschluss sich selbst überlassen werden. Das heisst: Es ist während der gesamten notwendigen Einschlusszeit passiv sicher und es kann langfristig auf eine Überwachung

verzichtet werden. Das Tiefenlager ist gegenüber zukünftigen Entwicklungen an der Erdoberfläche oder im Untergrund robust – ohne dass der Mensch eingreifen muss. Ermöglicht wird dies durch verschiedene technische und natürliche Barrieren, welche die radioaktiven Abfälle zuverlässig einschliessen.



© Comet Photoshopping, Dieter Enz

Opalinuston als Wirtgestein

Das Tongestein Opalinuston entstand vor rund 175 Millionen Jahren in einem Flachmeer der Jurazeit. Eigenschaften wie Selbstabdichtung und gute Radionuklidrückhaltung machen den Opalinuston zu einem idealen Wirtgestein für geologische Tiefenlager. Benannt wurde der Opalinuston nach den fossilen Schalen des Ammoniten «Leioceras opalinum». Dessen Name geht auf den schillernden (opalisierenden) Glanz der Schale zurück.



Geologische Tiefenlager – Sich

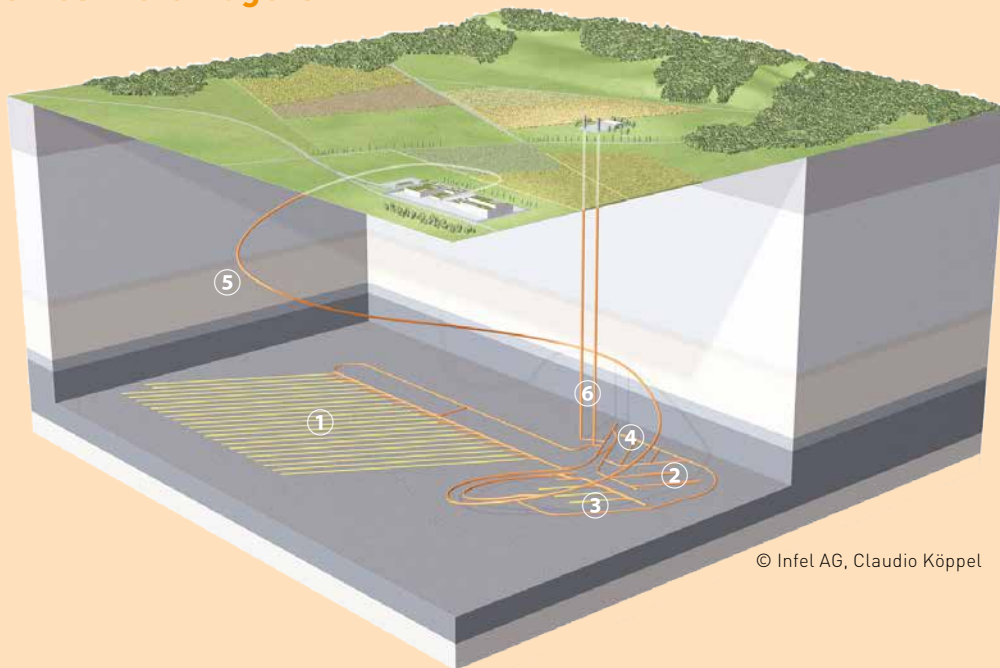
Die hochaktiven Abfälle müssen während einer sehr langen Zeit vom Lebensraum des Menschen und damit von der Erdoberfläche ferngehalten werden. Gewährleistet wird dies durch mehrere Sicherheitsbarrieren.

Ein sicherer Einschluss von radioaktiven Abfällen für lange Zeit in einem Tiefenlager (vgl. Textkasten) wird durch die Kombination von technischen und natürlichen Barrieren gewährleistet (vgl. Seite 17).

Jede einzelne Barriere hat die Aufgabe, die Abfälle vor Störeinflüssen zu schützen und die radioaktiven Stoffe so lange vom Verlassen des Tiefenlagers zurückzuhalten, bis sie auf natürliche Werte zerfallen sind.

Auf den nächsten Seiten wird ein kurzer Einblick vermittelt, wie diese Sicherheitsbarrieren funktionieren.

Aufbau eines Tiefenlagers HAA



© Infel AG, Claudio Köppel

1 Hauptlager BE/HAA

Lagerstollen für verbrauchte Brennelemente und hochaktive Abfälle

2 Lager LMA

Lagerkammern für langlebige mittelaktive Abfälle

3 Pilotlager

Kurzer Lagerstollen im geologischen Tiefenlager, in dem radioaktive Abfälle eingelagert werden. Das Pilotlager wird während der ganzen Betriebs- und Beobachtungsphase überwacht.

4 Testbereich

Der Bereich dient dazu, die erforderlichen Daten für den Lagerbetrieb zu erheben.

5 Zugangstunnel

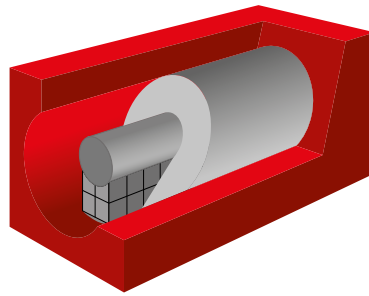
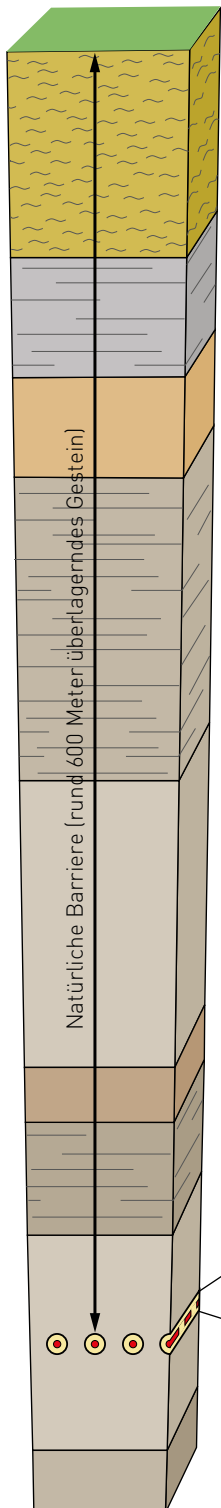
Zugang von der Oberflächenanlage in das Tiefenlager; eine Erschließung durch Schächte ist ebenso möglich.

6 Lüftungsschacht und Bauschacht

Für den Bau und die Belüftung des Tiefenlagers angelegte Schächte

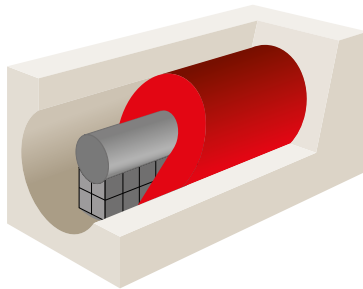
erheit für lange Zeit

Sicherheitsbarrieren in einem geologischen Tiefenlager für hochaktive Abfälle (HAA) und verbrauchte Brennelemente (BE)



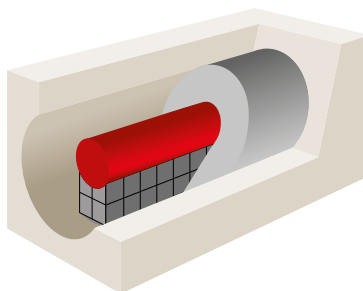
Natürliche Barriere

- Die Lagerstollen liegen im **Wirtgestein** (Opalinuston). Das Gestein ist sehr gering durchlässig. Wie der Bentonit kann der Opalinuston Radionuklide binden und so zurückhalten. Das Wirtgestein und die darüber liegenden Gesteinsschichten schützen die Abfälle und die technischen Barrieren (z. B. vor Gletschern und Erosion).



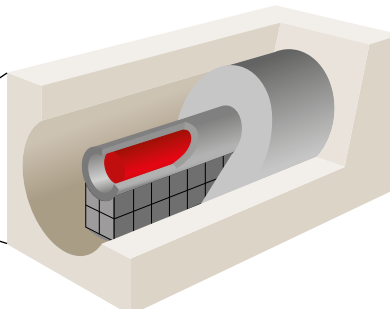
Technische Barriere

- Die Stollenverfüllung aus **Bentonit** (Ton) ist sehr gering durchlässig, quillt bei Feuchtigkeitzutritt und dichtet dadurch Risse und Klüfte ab. Die Tonminerale binden Radionuklide.



Technische Barriere

- Der dickwandige **Endlagerbehälter** verhindert die Freisetzung von radioaktiven Stoffen während mindestens 10 000 Jahren.



Technische Barriere

- Die **Glasmatrix** oder **Brennelemente** mit den darin enthaltenen Radionukliden sind sehr schwer löslich. Das heisst, auch bei Wasserzutritt in den Endlagerbehälter können diese Radionuklide nur sehr langsam ins Wasser gelangen.

Die Entwicklung eines Tiefenlag

Wissenschaftler erforschen mittels Experimenten in den geologischen Felslabors der Schweiz und anhand von Modellen, wie sich die Sicherheitsbarrieren in einem geologischen Tiefenlager in Zukunft verhalten.

 **0 bis 100 Jahre**

Der Bentonit sättigt sich langsam auf

Nach der Einlagerung der Endlagerbehälter werden die Hohlräume in den Lagerstollen des Hauptlagers mit Bentonit verfüllt (vgl. Abbildung 9). Der Bentonit sättigt sich langsam mit Porenwasser auf. Dieses diffundiert aus dem umgebenden Wirtgestein Opalinuston langsam in den Bentonit um die Behälter. Zwar fließt im Opalinuston kein freies Wasser, dennoch ist es in Porenräumen enthalten. Die Wassermenge, die im Gestein gebunden ist, beträgt zirka 120 Liter pro Kubikmeter Opalinuston. Durch Wasseraufnahme beginnt der Bentonit zu quellen und bildet dadurch eine prak-

tisch wasserundurchlässige homogene Masse. Der quellende Bentonit führt auch dazu, dass sich die während des Baus entstandenen Risse im Gestein wieder schliessen. Dabei unterstützt der Bentonit das Selbstabdichtungsvermögen des Opalinustons.

Abfälle bleiben unter Kontrolle

Zirka 20 Jahre ab Einlagerungsbeginn sind alle Lagerstollen verfüllt und versiegelt. Zugänge zum Tiefenlager bleiben während der nun beginnenden Beobachtungsphase offen. Die Abfälle werden in einem Pilotlager überwacht (siehe Seite 16). Wichtig ist, dass die Sensoren für die Überwachung eine hohe Lebensdauer haben. Sie müssen Jahrzehnte einwandfrei funktionieren. Zurzeit untersuchen Wissenschaftler im Felslabor Mont Terri zum Beispiel Sensoren aus Glasfaserkabeln für die Temperaturmessung. Diese Sensoren eignen sich möglicherweise für einen zukünftigen Einsatz in einem Pilotlager.



© Comet Photoshopping, Dieter Enz

Abbildung 9

Bereits heute wird im Felslabor Mont Terri die Verfüllung der Lagerstollen in einem Experiment im Massstab 1:1 getestet.

ers in der Zukunft

🕒 100 bis 1000 Jahre

Ist die Beobachtungsphase beendet, werden das Tiefenlager verschlossen und alle dann noch offenen untertägigen Lagereinrichtungen und Zugangsbauwerke verfüllt und versiegelt. Die Überwachung kann von der Erdoberfläche aus weitergeführt werden.

Behälter als starke Barriere

Im heutigen Referenzkonzept sind die Endlagerbehälter aus Stahl und schliessen mit einer Wandstärke von mindestens 15 Zentimetern die radioaktiven Abfälle in den ersten Jahrtausenden wirkungsvoll ein (vgl. Abbildung 10). Alternative Behältermaterialien sind zum Beispiel Kupfer oder Keramik; diese untersucht die Nagra zusammen mit internationalen Forschungspartnern. Die Nagra sieht Endlagerbehälter mit einer Mindestlebensdauer von 10 000 Jahren vor.

Strahlung abgeschirmt

Die direkte Strahlung wird von Behältern, Stollenverfüllung, Lagereinbauten und Wirtgestein abgeschirmt. Die Strahlung der eingelagerten hochaktiven Abfälle ist im Wirtgestein bereits ein bis zwei Meter von der Stollenwand entfernt tiefer als die natürliche Strahlung des Gesteins.

Nutzungskonflikte ausgeschlossen

Bei der Wahl der Standortgebiete werden mögliche Nutzungskonflikte beurteilt. Insbesondere ob im oder um das Wirtgestein herum wirtschaftlich nutzbare Rohstoffe vorkommen. Darunter fallen zum Beispiel Erdöl, Erdgas oder die Geothermie als potenzielle Energiequelle. Indem man solche Gebiete meidet, reduziert man das Risiko, dass zukünftige Generationen dort nach solchen Rohstoffen suchen.



© Nagra

Abbildung 10

Endlagerbehälter für verglaste hochaktive Abfälle (oben) und verbrauchte Brennelemente (unten) aus Stahl

🕒 1000 bis 10 000 Jahre

Bentonit ist wassergesättigt

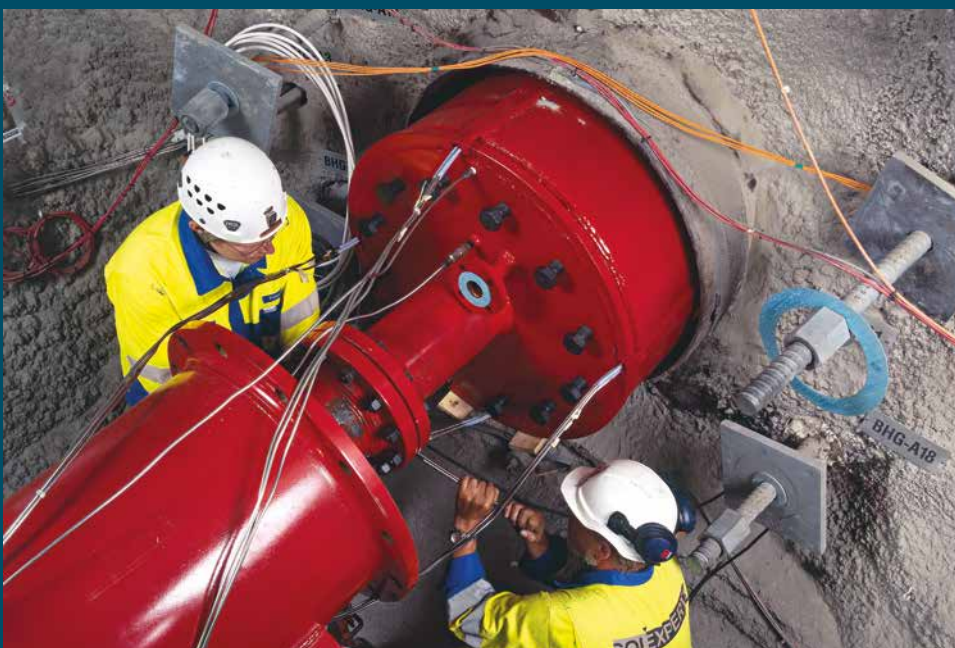
Der Bentonit ist nun vollständig mit Wasser gesättigt. Er besitzt ähnliche Eigenschaften wie das ihn umgebende Wirtgestein. Er ist praktisch wasserundurchlässig und hat die Fähigkeit, Radionuklide zu binden. Das heißt, die meisten Stoffe bleiben an den Tonmineralien haften und werden daran gehindert, weiter zu wandern.

Abfälle werden kühler

Im Lauf der Zeit nimmt die Wärme, die durch den Zerfall der Radionuklide in den eingelagerten hochaktiven Abfällen entsteht, immer weiter ab. Nach etwa 1000 Jahren beträgt die Wärmeleistung der eingelagerten Brennelemente nur noch zirka acht Prozent des Werts bei Einlagerung. Die Temperaturen der Abfälle und des sie umgebenden Wirtgesteins haben sich angeglichen.

Auswirkungen der Gasbildung sind beherrschbar

Durch den Kontakt mit Porenwasser beginnen die Endlagerbehälter zu korrodieren. Bei der Reaktion zwischen Wasser und Eisen entsteht Wasserstoffgas. Dieses nicht radioaktive Gas muss entweichen oder abgebaut werden können, damit sich der Druck in den Lagerstollen nicht unzulässig erhöht. Die Gasentstehung könnte sonst zu einer Rissbildung im Wirtgestein führen und dadurch Wegsamkeiten schaffen, die den Transport der Radionuklide beschleunigen könnten. Versuche in den Felslabors Mont Terri und Grimsel (vgl. Abbildung 11) sowie Berechnungen zeigen, dass die Gasdrücke in den Lagerkammern auch bei der Verwendung von Endlagerbehältern aus Stahl unterhalb des Drucks bleiben, bei dem mit der Bildung von Rissen im Wirtgestein gerechnet werden muss. Das Gas kann an den Grenzflächen von Wirtgestein und Bentonit entweichen.



© Comet Photoshopping, Dieter Enz

Abbildung 11

Im Felslabor Mont Terri werden zahlreiche Untersuchungen durchgeführt, unter anderem über die Gasfließwege.

10 000 bis 100 000 Jahre

Die Endlagerbehälter sind so ausgelegt, dass sie mindestens für 10 000 Jahre absolut dicht sind. Später, wenn die Behälter allenfalls durchkorrodiert sind, können die Abfälle mit dem sie umgebenden Porenwasser aus dem Bentonit in Kontakt kommen.

Radioaktive Stoffe können sich jetzt nur sehr langsam aus den verbrauchten Brennelementen und den verglasten Abfällen aus der Wiederaufarbeitung lösen. Beide sind nur schlecht in Wasser löslich. Da es um die Abfallbehälter kein fließendes Wasser gibt, können sich die gelösten Radionuklide im Bentonit nur sehr langsam durch Diffusion ausbreiten.

Was ist Diffusion?

Diffusion ist ein passiver Konzentrationsausgleich von gelösten Stoffen zwischen Bereichen höherer und niedrigerer Konzentration. Diffusion findet vereinfacht erklärt statt, wenn ein Stück Zucker in eine Tasse Kaffee gegeben wird. Nach einiger Zeit wird der Kaffee süß, auch wenn nicht umgerührt wird. Die Zuckermoleküle diffundieren, bis der Kaffee überall ähnlich süß ist, also bis sich die Konzentration der Zuckermoleküle im Kaffee ausgeglichen hat.

Das Wirtgestein wird zur wichtigsten Barriere

Radionuklide, die nicht schon im Behälter oder während der Diffusion durch den Bentonit zerfallen sind, hält der Opalinuston als weitere, natürliche Barriere zurück (vgl. Abbildung 12).



© Comet Photoshopping, Dieter Enz

Abbildung 12

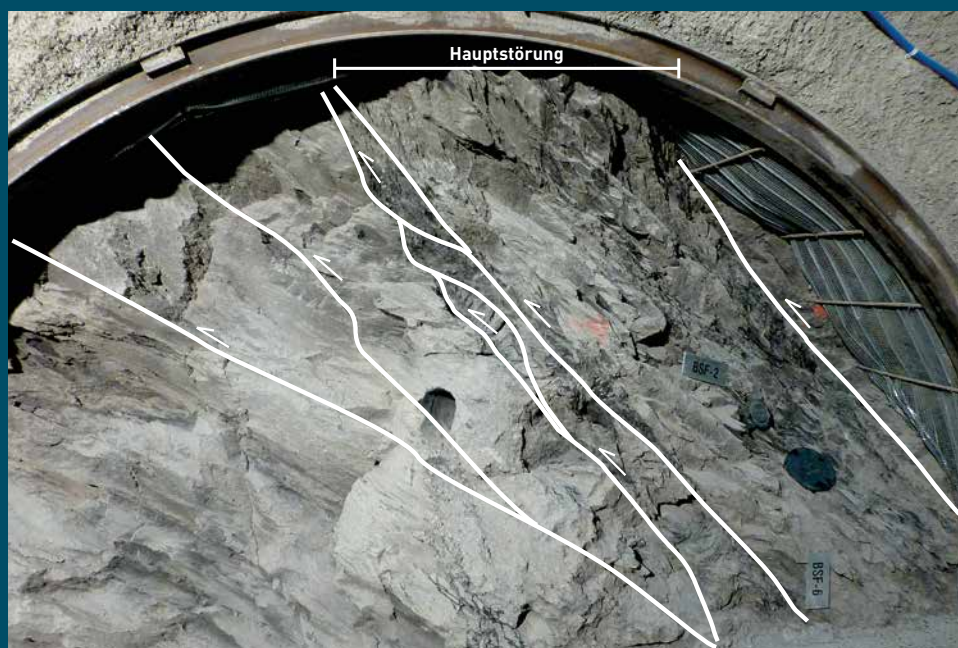
Der Opalinuston wurde von der Nagra als Wirtgestein für das Tiefenlager für hochaktive Abfälle und verbrauchte Brennelemente evaluiert.

Der Opalinuston besitzt – wie auch der Bentonit – die Fähigkeit, Radionuklide festzuhalten. Der Opalinuston ist zudem praktisch wasserundurchlässig. Der Stofftransport erfolgt hauptsächlich über Diffusion, wie im Bentonit.

Radionuklide vom Lebensraum des Menschen wirksam fernhalten

Um die Radionuklide vom menschlichen Lebensraum fernzuhalten, muss das Tiefenlager durch die Sicherheitsbarrieren den Transport von Radionukliden ins Grundwasser begrenzen. Über Stö-

rungen im Gestein kann kein Grundwasser in das Tiefenlager eindringen und den Transport der radioaktiven Stoffe ermöglichen. Verantwortlich dafür ist eine weitere Eigenschaft des Wirtgesteins: sein Selbstabdichtungsvermögen. Kommt der Opalinuston mit Wasser in Kontakt, beginnen die Tonminerale zu quellen. So werden entstehende Risse wieder verschlossen und mögliche Wasserfließwege abgedichtet (sog. Selbstabdichtung). Dies wurde in mehreren Experimenten nachgewiesen und ist auch direkt in Aufschlüssen zu beobachten (vgl. Abbildung 13).



Legende

- Störung
- ← Scherrichtung

Abbildung 13

Durch den Opalinuston im Bild verläuft eine Störungszone. Trotzdem ist das Gestein trocken (Felslabor Mont Terri).

Bis 1 000 000 Jahre

Kein Klimamodell kann heute zuverlässig eine solche Zeitspanne vorhersagen. In einer Million Jahre ändern sich die Klimabedingungen wahrscheinlich mehrmals. Auch grosse Gletschervorstösse sind nicht ausgeschlossen. Darum werden verschiedene Klimaszenarien für die Standortwahl berücksichtigt.

Tief unter dem Gletscher

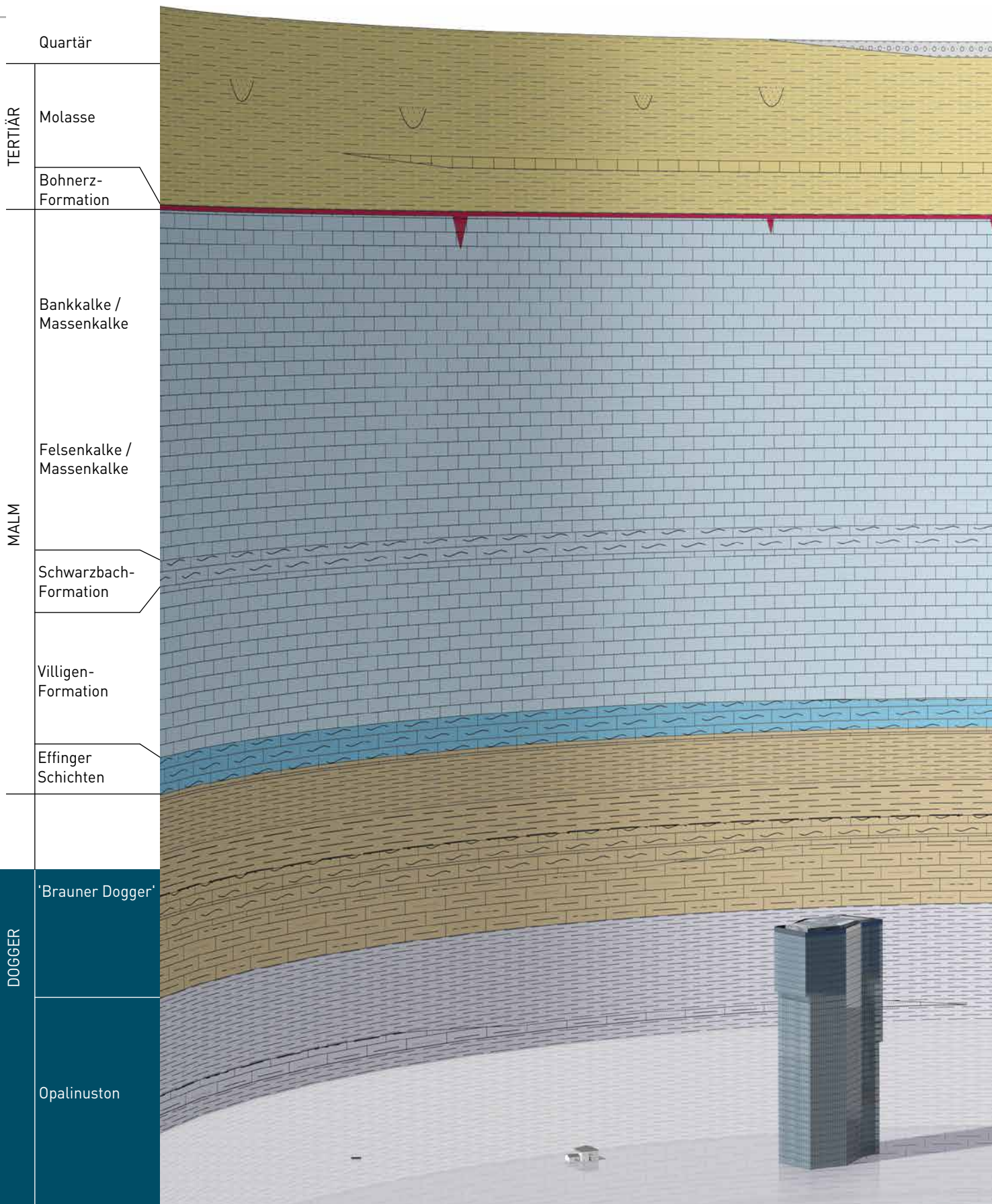
Geologische Prozesse wie die Erosion laufen in der Natur nur sehr langsam ab. Um aber zuverlässig zu verhindern, dass das Tiefenlager durch glaziale Einflüsse oder durch Hebung der Erdoberfläche

(bei gleichzeitiger Erosion) freigelegt wird, baut man das Lager in geeigneter Tiefe. Für das HAA-Lager sind je nach Standort etwa 600 Meter unter der Erdoberfläche vorgesehen (vgl. Abbildung 14, Seiten 24 – 25). Vergangene geologische Entwicklungen sagen etwas über zukünftige Erosionsraten aus. Man schliesst also aus der Vergangenheit auf die Zukunft.

Die Natur zeigt uns auch, wie sich natürliche Lagersysteme, Barrieren oder das Wirtgestein über sehr lange Zeiträume verhalten können. Beispiele dafür sind die im nächsten Kapitel vorgestellten Naturaloga. Sie liefern Kennwerte und wichtige Hinweise für die Modellbetrachtungen.

Erdbeben – eine Gefahr für Tiefenlager?

Starke Erdbeben können in dem langen Betrachtungszeitraum nicht ausgeschlossen werden. Tiefenlager werden daher grundsätzlich ausserhalb von bekannten Störungszonen im Untergrund gebaut. Störungen, an denen sich Spannungen aufbauen und möglicherweise ruckartig wieder abbauen, wird ausgewichen. Zu Störungen im Lagerbereich wird ein Sicherheitsabstand eingehalten. Dadurch wird verhindert, dass Lagerbehälter sowie technische und geologische Barrieren durch Verschiebungen beeinträchtigt werden können. Durch ein Erdbeben neu entstandene Klüfte dichten sich in kurzer Zeit durch das Quellen der Tone selber ab. Ein Transport von radioaktiven Substanzen durch Kluftwasser wird dadurch verhindert.



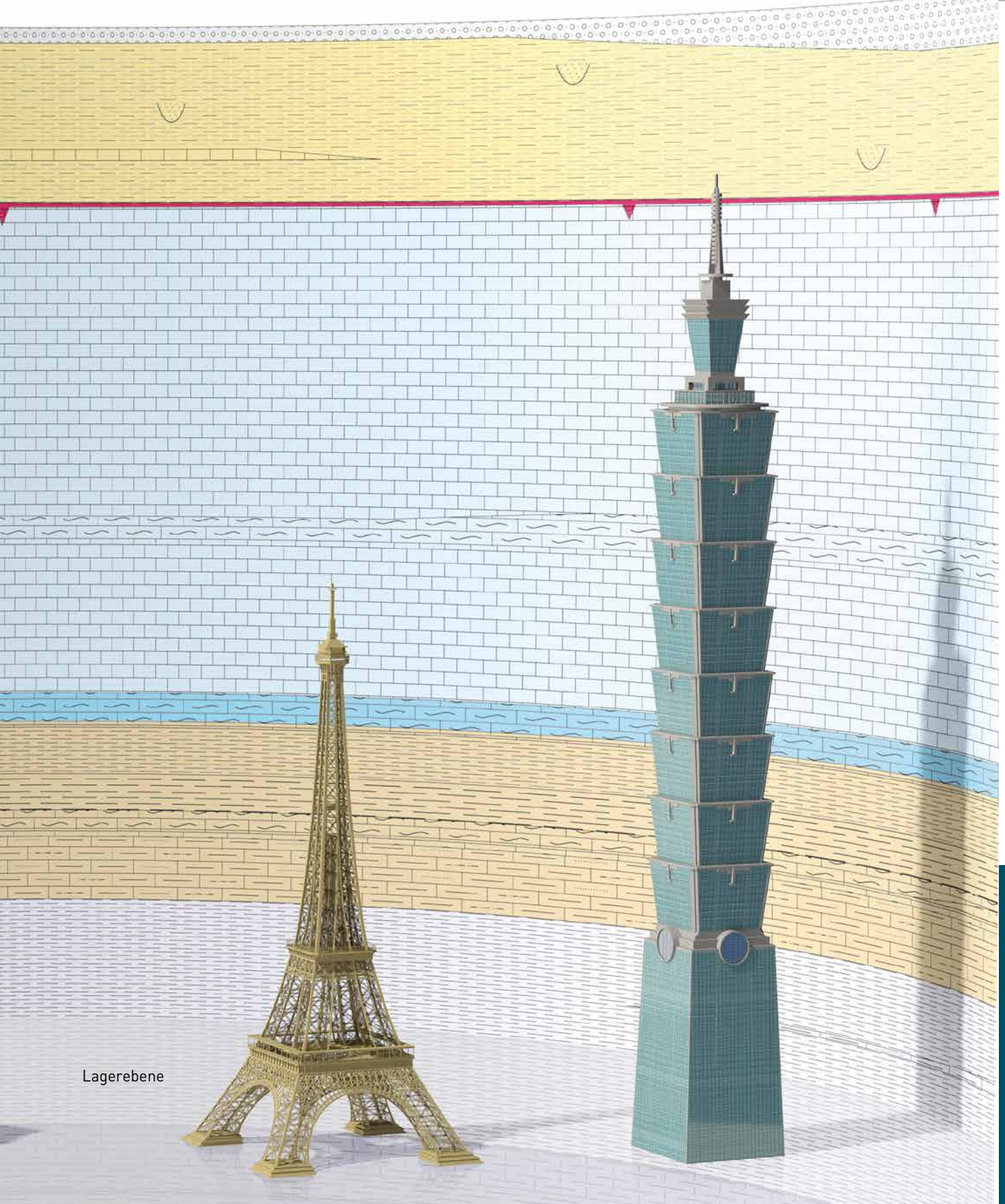
Endlagerbehälter
Durchmesser: 1 Meter

Einfamilienhaus
Höhe: 6 Meter

Prime Tower, Zürich
Höhe: 126 Meter

Abbildung 14

Diese Grafik veranschaulicht die Tiefenlage eines geologischen Tiefenlagers im Vergleich zu Bauwerken.



Lagerebene

Eiffelturm, Paris
Höhe: 324 Meter

Taipei 101, Taipeh
Höhe: 508 Meter

Was können wir von der Natur

Studien über natürliche Abläufe, die sich über sehr lange Zeiträume ausdehnen, helfen dabei, das Langzeitverhalten geologischer Tiefenlager zu verstehen.

Man kann keine Experimente über Jahrtausende ausführen. Warum kann man sich dann sicher sein, dass das Tiefenlager Radionuklide über sehr lange Zeit zurückhält?

Auch in der Natur findet man Prozesse und Situationen, wie sie sich im Umfeld eines geologischen Tiefenlagers abspielen. Sogenannte Naturanaloge vertiefen das Verständnis darüber, wie sich geologische Lager für radioaktive Abfälle über lange Zeit verhalten. Im Gegensatz zu kurzfristigen Laborexperimenten kann man hier Abläufe beobachten, die sich über viele Millionen bis Milliarden von Jahren erstreckt haben.

Natürlicher Reaktor als Beispiel

Ein wichtiges Naturanalogon sind die Naturreaktoren in Oklo (Gabun, Afrika). Vor etwa zwei Milliar-

den Jahren liefen dort natürliche Kettenreaktionen ab. Dabei entstanden unter sehr hohem Druck und hohen Temperaturen (bis 600 °C) einige Tonnen hochaktive Spaltprodukte, die im Lauf der Zeit immer weiter zerfielen. Die wichtigste Erkenntnis für die geologische Tiefenlagerung hochaktiver Abfälle sind aber nicht diese Zahlen. Es ist die Tatsache, dass Spaltprodukte aus diesen Reaktoren innerhalb von zwei Milliarden Jahren nur wenige Meter transportiert wurden. Die Natur hat somit in Oklo bereits ein Tiefenlager geschaffen (vgl. Abbildung 15).

Glas dient als Barriere

Ins Meer aufsteigende Lava wird aufgrund sehr schneller Abkühlung zu vulkanischem Glas (vgl. Abbildung 16). Das bekannteste Beispiel für Gesteinsglas ist Obsidian, den steinzeitliche Kulturen wegen seiner Eigenschaften zur Herstellung von Werkzeugen und Waffen bevorzugten. Diese Werkzeuge sind noch sehr gut erhalten. Untersuchungen von vulkanischem Glas, das sich im Meer gebildet hatte, zeigte eine Korrosionsrate von wenigen Mikrometern in 1000 Jahren. Da dieser



© Nagra

Abbildung 15

Der Naturreaktor in Oklo ist ein gutes Beispiel für ein natürliches Tiefenlager und die Radionuklidrückhaltung im Gestein.

für die Entsorgung lernen?

Prozess so langsam verläuft, ist Glas eine sehr gute Barriere für den Einschluss von Radionukliden.

Bei der Wiederaufbereitung verbrauchter Brennelemente entstehen Abfallprodukte. Diese werden in einer Glasschmelze verfestigt und in verschweissten Stahlzylindern ins geologische Tiefenlager gebracht.

Stahl korrodiert unter Tage langsam

Stahl wird im Tiefenlager zum Beispiel für die Endlagerbehälter benutzt. Die Korrosionsrate von Stahl lässt sich anhand archäologischer Funde abschätzen. Es ist nachgewiesen, dass der Mensch seit etwa 3 500 Jahren einfachen Stahl herstellen kann. Der Erhaltungsgrad sagt etwas über die

Korrosionsraten der stählernen Fundstücke aus. In sauerstoffarmer Umgebung – wie im geplanten Tiefenlager – korrodieren Metalle sehr langsam. Die Korrosionsschicht selbst wirkt als zusätzliche Schutzschicht gegen eine weitere Korrosion.

Opalinuston schliesst Meerwasser ein

Auch das Wirtgestein Opalinuston ist ein Naturanalogon. Der rund 175 Millionen Jahre alte Opalinuston enthält noch immer 10 bis 20 Gramm gelöstes Salz pro Liter Porenwasser. Dieses Salz stammt noch aus dem ursprünglichen Meer, in dem der Opalinuston abgelagert wurde. Das Meerwasser, das seit vielen Millionen Jahren im Gestein erhalten blieb, ist ein Beispiel dafür, wie gut der Opalinuston Stoffe über Jahrtausende einschließen kann.

Zum Weiterlesen

Nagra Themenheft Nummer 1: «Spuren der Zukunft»



© Comet Photoshopping, Dieter Enz

Abbildung 16

Vulkanisches Glas entsteht, wenn Lava sehr schnell abgekühlt wird.

Wie wird Sicherheit nachgewie

Die Standortwahl und die Auslegung eines Tiefenlagers sorgen für die Langzeitsicherheit. Die Nagra macht umfassende Sicherheitsanalysen, welche die Wirkung der technischen und natürlichen Barrieren nach dem ordnungsgemässen Verschluss des geologischen Tiefenlagers illustrieren.

An geologische Tiefenlager werden höchste Sicherheitsanforderungen gestellt. Das Auswahlverfahren möglicher geologischer Standortgebiete ist von Anfang an auf Langzeitsicherheit ausgerichtet. Das Gesetz und die behördlichen Vorschriften verlangen, dass die Langzeitsicherheit geologischer Tiefenlager mit Sicherheitsanalysen nachgewiesen wird. Diese erfolgen stufenweise und zunehmend detaillierter. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse werden genutzt, um bei Bedarf die Auslegung des geologischen Tiefenlagers anzupassen.

Die gesetzlich zugelassene zusätzliche maximale Strahlendosis für die Bevölkerung liegt bei 0,1 mSv pro Jahr. Dies entspricht etwa einem Fünzigstel

der durchschnittlichen Strahlenbelastung (vgl. Abbildung 1, Seite 4). Die Analysen müssen die Einhaltung des Schutzziels belegen.

Verschiedene Szenarien überprüft

Mit umfassenden Sicherheitsanalysen überprüft die Nagra, ob die geologischen Tiefenlager die festgelegte maximale Dosis überschreiten. Diese Analysen dienen als Grundlage für die Beurteilung, ob das Tiefenlager aus Sicht der Sicherheit akzeptabel ist.

In den Sicherheitsanalysen werden die mögliche Freisetzung der im Tiefenlager vorkommenden Radionuklide und ihre potenziellen Wanderwege vom geologischen Tiefenlager bis in den Lebensraum des Menschen quantitativ bestimmt. Die Berechnungen basieren auf dem Abfallinventar sowie wissenschaftlich abgestützten Angaben zu den Eigenschaften der vorgesehenen technischen und natürlichen Barrieren. Eigenschaften sind: Lage, Geometrie und Eigenschaften des Gesteins, bau-technische Auslegung, Rückhaltefähigkeit der

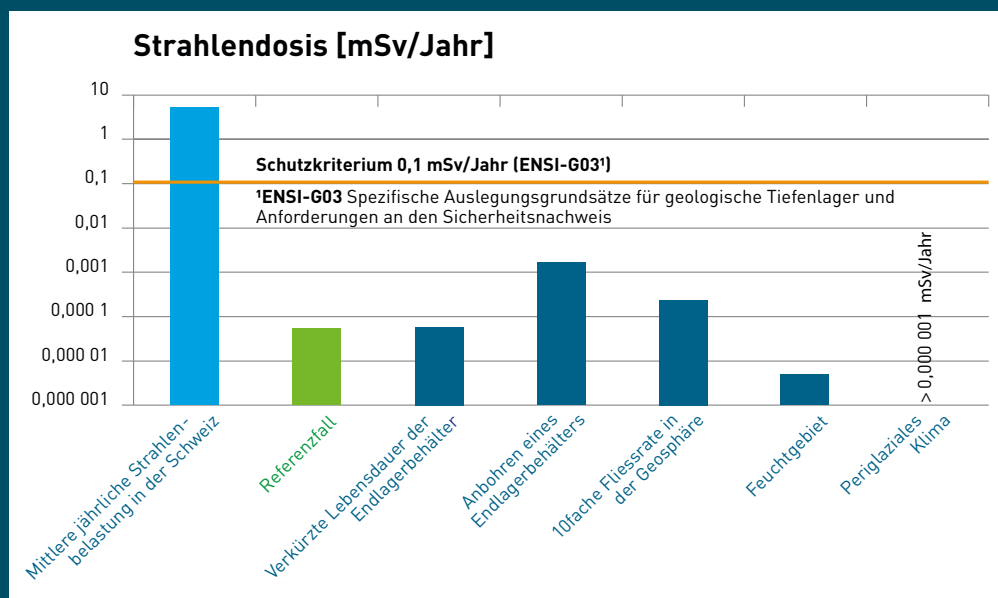


Abbildung 17

Die Sicherheitsanalysen müssen nachweisen, dass die Dosiswerte unter dem Schutzkriterium liegen (vereinfacht aus NTB 02-05, Tab. 8.2-2).

sen?

Barrieren und regionale hydrologische Situation. All diese Faktoren fließen in die Modellrechnungen ein. Dabei werden auch die Ungewissheiten berücksichtigt, das heisst, für die Beurteilung der Sicherheit werden auch ungünstige Situationen analysiert und die Resultate mit dem Schutzkriterium (vgl. Abbildung 17) verglichen.

Szenarien für alle Fälle

Bei den Sicherheitsanalysen betrachtet die Nagra viele verschiedene Szenarien. Unter anderem sind dies:

- Erhöhte Wasserbewegung durch den Tiefenlagerbereich
- Ungünstige Diffusionswerte
- Erhöhte Löslichkeit der Radionuklide
- Erhöhte Auflösungsrate von eingelagerten Brennelementen
- Reduzierte Lebensdauer der Endlagerbehälter
- Verringerte Rückhaltefähigkeit (Sorption) der technischen Barrieren und des Wirtgesteins
- Alternative Klimavarianten

Schutzkriterium wird eingehalten

Bei den bisherigen Sicherheitsanalysen zeigte sich, dass – selbst unter pessimistischen, teilweise hypothetischen Annahmen zum Verhalten der technischen Barrieren und des Wirtgesteins – das Schutzkriterium von 0,1 mSv pro Jahr eingehalten wird (vgl. Abbildung 17). Auch menschliches Handeln wird in den Sicherheitsanalysen betrachtet. Darum wird die Möglichkeit eines direkten Anbohrens von Endlagerbehältern miteinbezogen. Selbst in einem solchen Fall liegt das Maximum der Strahlendosis für die Bevölkerung unter dem behördlich vorgegebenen Schutzkriterium.

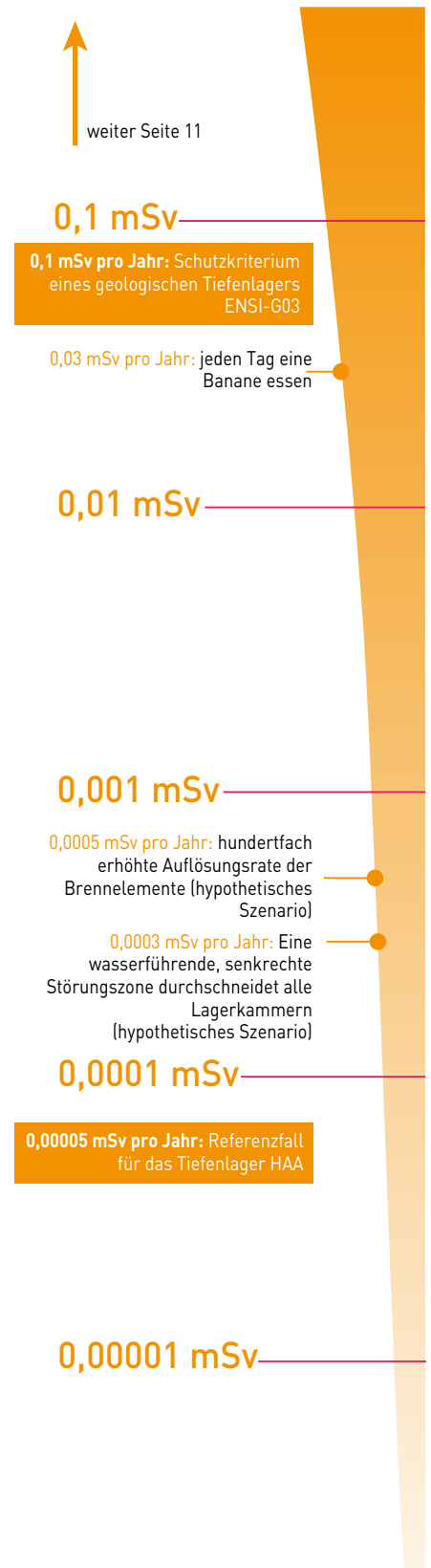


Abbildung 18

In den Sicherheitsanalysen wird berechnet, wie hoch die individuelle Jahresdosis für einen Menschen ist. In der Grafik sind die Höchstwerte, die sich innerhalb einer Zeitspanne von einer Million Jahre ergeben, dargestellt. Ein Vergleich mit natürlichen Werten findet sich auf Seite 11.

Botschaften für Jahrtausende

Weltweit beschäftigen sich viele Länder damit, wie man das Wissen über geologische Tiefenlager für kommende Generationen erhalten kann. Eine Möglichkeit ist, die Information in verschiedenen Archiven aufzubewahren.

Das Wissen über Standort und Inventar eines geologischen Tiefenlagers soll möglichst lange erhalten bleiben. Warnhinweise gegen ein unbeabsichtigtes zukünftiges Eindringen werden diskutiert. So fordert das Schweizer Kernenergiegesetz die dauerhafte Markierung eines Tiefenlagers. Und die Kernenergieverordnung hält fest, dass eine Dokumentation erstellt werden muss, welche die Kenntnisse über das Lager sicherstellt. Nach dem Verschluss sorgt der Bund dafür, dass die Informationen erhalten bleiben. Wie lässt sich dieses Wissen über sehr lange Zeiträume bewahren und übermitteln?

Wissen bewahren

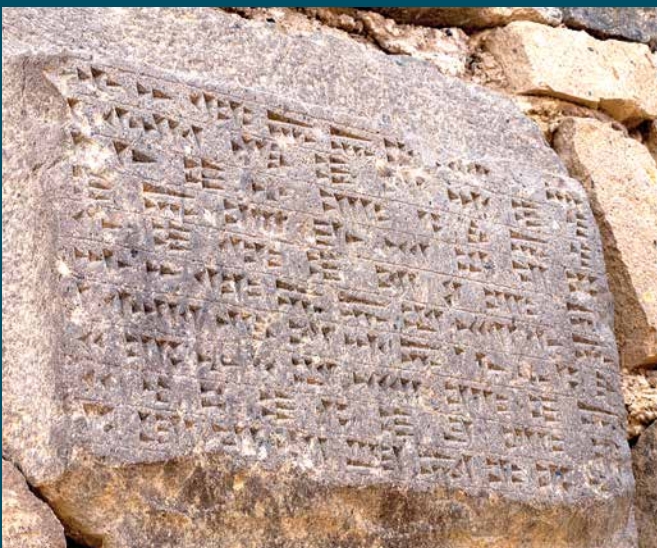
Mit Möglichkeiten und Strategien dazu befasst sich eine internationale Expertengruppe der NEA, der Atomenergieagentur der OECD, in ihrem Projekt

«Preservation of Records, Knowledge and Memory across Generations». Die Gruppe entwickelt Strategien, um Informationen und Wissen in Zusammenhang mit der geologischen Tiefenlagerung radioaktiver Abfälle über lange Zeiträume zu erhalten. Im Zentrum stehen Überlegungen, das Wissen nicht nur an einem Ort zu sammeln, sondern Informationen über Abfallinventar, Aufbau und Standort der Tiefenlager in Archiven von nationalen und internationalen Behörden aufzubewahren. Dies soll verhindern, dass das gesamte Wissen auf einmal verloren geht.

Kommt es in zukünftigen Gesellschaften zu grossen Umwälzungen, müssen die Verantwortlichen auch dann – basierend auf dem vorhandenen Wissen – wohlüberlegt entscheiden können. Insbesondere sollen die weitergegebenen Informationen ein unabsichtliches Eindringen in die Lager verhindern.

Botschaften für 100 Generationen?

Keine der wissenschaftlichen Studien und keines der Länder, das sich mit der Markierung von Tiefenlagern auseinandersetzt, geht von einer



© Shaun Dunphy

Abbildung 19

Keilschrift an der Mauer der antiken Festung Erebuni im heutigen Armenien (ca. 800 v. Chr.)

sende

Markierungsdauer von einer Million Jahre, sondern von mehreren Tausend Jahren aus. Dies, weil danach die strahlenbedingte Giftigkeit der Abfälle (Radiotoxizität) sehr stark abgenommen haben wird.

Tiefenlager markieren

Die Forschung für den generationenübergreifenden Wissenstransfer und die Markierung geologischer Tiefenlager steht am Anfang. Sprachen und Symbole sind zudem im ständigen Wandel. Wie sehen eindeutige Kennzeichen aus, welche die Menschen auch dann noch warnen, wenn sich Schrift und Symbole in der Zukunft ändern (vgl. Abbildungen 19 und 20)?

Auch die Haltbarkeit der Informationsträger selbst ist wichtig. Für die Markierung eines Tiefenlagerstandorts werden verschiedene Ideen diskutiert: Bauten vor Ort oder im Boden vergrabene Tonscherben mit Informationen über das Tiefenlager.

Langfristige Information

Die Sicherheit eines Tiefenlagers basiert auf dessen Standort und Auslegung. Die radioaktiven Abfälle sind während der Zeit, in der sie bis zur «Unschädlichkeit» zerfallen, sicher eingeschlossen, auch ohne dass der Mensch eingreifen muss. Der Erhalt des Wissens über ein Tiefenlager ist erstrebenswert, auch wenn dies keine Voraussetzung für die Langzeitsicherheit eines Tiefenlagers ist. Die Informationen an mehrere nationale und internationale Behörden und Archive weiterzugeben, ist eine gute Möglichkeit, das Wissen zu bewahren.

Weitergabe und Erhalt von Wissen an zukünftige Generationen ist nicht nur bei der Entsorgung radioaktiver Abfälle eine Herausforderung. Wissen zu bewahren, stellt unsere Gesellschaft immer wieder vor grosse Aufgaben.

Abbildung 20

Diese internationalen Gefahrensymbole sollen vor ionisierender Strahlung warnen. Das rechte Symbol dient zur Ergänzung und soll das richtige Verhalten bei starken Strahlenquellen verdeutlichen.



Glossar

Abfallinventar

Alle radioaktiven Abfälle der Schweiz werden in einem Inventar zusammengefasst. Dieses Inventar erhält Daten über Herkunft und Aktivität der Materialien.

Atom

(Altgriechisch atomos «unteilbar») Atome bestehen aus einem positiv geladenen Atomkern (bestehend aus Protonen und Neutronen) und einer Atomhülle aus negativ geladenen Elektronen. Im Normalzustand sind Atome elektrisch neutral. Durch Entfernen oder Hinzufügen eines Elektrons bekommen sie eine Ladung. Dieser Prozess heisst Ionisierung, das entstehende Teilchen ist ein Ion.

Auslegung

Die Auslegung bezeichnet in der Technik die Gestaltung von Bauteilen, damit sie ihren definierten Zweck erfüllen können. Das kann alle Aspekte des Entwurfs, der Konstruktion, der Herstellung, des Betriebs und des Einsatzendes betreffen.

Bentonit

Der Bentonit ist ein Gestein aus verschiedenen Tonmineralien mit starker Wasseraufnahmefähigkeit. Bentonit entsteht durch Verwitterung aus vulkanischer Asche. Er wird bei Bauwerksabdichtungen verwendet und als mögliche Barriere bei der Tiefenlagerung von radioaktiven Abfällen. Man findet Bentonit in verschiedenen Produkten, unter anderem auch in Katzenstreu.

Brennelement

Ein Brennelement besteht aus einem Bündel von Brennstäben. Diese enthalten spaltbares Material, den sogenannten Brennstoff (meist Uran). Brennelemente werden in den Reaktor eines Kernkraftwerks eingesetzt und dort zur Energieproduktion durch Kernspaltung genutzt. Wesentlich zur Radioaktivität eines verbrauchten Brennelements tragen Uran und Neptunium, Technetium, Iod und Cäsium bei.

Cäsium (Cs)

Das extrem reaktive, in Reinform silbrig glänzende Alkalimetall schmilzt bei Körpertemperatur. Das natürliche Cs-133 ist stabil. Alle anderen Cäsiumisotope sind radioaktiv und kommen nur als künstliche Spaltprodukte bei Kernreaktionen vor.

Felslabor

Dies ist eine Laboranlage direkt im Fels, die realistische Versuchsbedingungen bietet, um Experimente (z. B. zu den Eigenschaften von Gesteinen oder zur bautechnischen Umsetzung eines Tiefenlagers) im Massstab 1:1 durchzuführen.

Halbwertszeit

Die Halbwertszeit ist eine Zeitspanne, in der die Menge und damit die Radioaktivität eines bestimmten Radionuklids auf die Hälfte des ursprünglichen Werts gesunken ist. Bei Cäsium-137 sind dies etwa 30 Jahre (vgl. Abbildung 21).

Hochaktive Abfälle (HAA)

Das sind Abfälle, die stark strahlen. Es handelt sich um Spalt- und Aktivierungsprodukte aus verbrauchten Brennelementen, die bei der Wiederaufarbeitung abgetrennt und mit Glas verschmolzen werden. Auch verbrauchte Brennelemente, die nicht wiederaufgearbeitet werden, gelten in der Schweiz als hochaktive Abfälle.

Korrosion

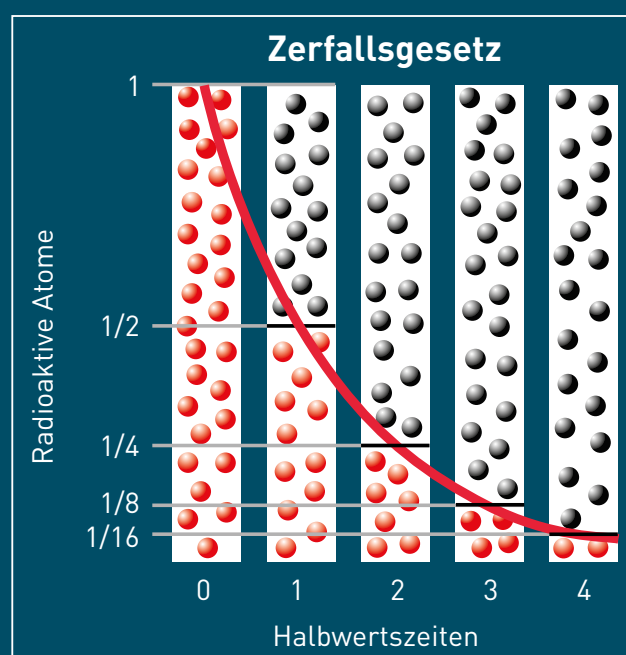
Allmähliche Umwandlung eines Stoffs durch Einwirkung anderer Stoffe. Ein Beispiel ist die Korrosion von Eisen an der Luft in Kontakt mit Feuchtigkeit, besser bekannt als Rosten.

Naturaloga

Als Naturaloga bezeichnet man die für die Tiefenlager relevanten Geosysteme, Materialien und Prozesse der Natur, deren Verhalten über lange Zeiträume der Vergangenheit untersucht werden können. Darunter fallen auch vom Menschen hergestellte Materialien.

Abbildung 21

Innerhalb einer Halbwertszeit zerfällt die Hälfte der Kerne eines radioaktiven Isotops. Die Halbwertszeit ist von Isotop zu Isotop verschieden. Sie kann Bruchteile von Sekunden bis Milliarden von Jahren betragen.



NTB

Nagra technischer Bericht

OECD

Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung

Pilotlager

Im Pilotlager ist das Verhalten der Abfälle, der Verfüllung und des Wirtgesteins bis zum Ende der Beobachtungsphase zu überwachen. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse bilden eine Grundlage für die Entscheidung über den Verschluss des Tiefenlagers. Die beobachteten Vorgänge und Systeme (z. B. Sicherheitsbarrieren) müssen dabei auf das Hauptlager übertragbar sein.

Porenwasser

Als Porenwasser wird das Wasser bezeichnet, das in Hohlräumen von Böden und Gesteinen enthalten ist.

Radionuklid

Instabiler Atomkern, der unter Aussendung von radioaktiver Strahlung spontan zerfällt. Es gibt natürlich vorkommende und künstlich erzeugte Radionuklide.

Radiotoxizität

Bezeichnung für die Giftigkeit radioaktiver Stoffe, wenn sie in den menschlichen Körper gelangen

Radon (Rn)

Radon ist als radioaktives Edelgas ein Bestandteil der Luft und hat am natürlichen Strahlungsaufkommen auf der Erdoberfläche den grössten Anteil. Es entsteht im Gesteinsuntergrund durch den Zerfall von Uran und steigt dann durch Risse im Gestein an die Erdoberfläche. Die durchschnittliche, effektiv durch Radon verursachte Dosis pro Person beträgt in der Schweiz zirka 3,2 Millisievert pro Jahr. Dies sind etwa 60 Prozent der durchschnittlichen jährlichen Strahlenbelastung.

Referenzfall

Der Referenzfall bildet die plausibelste Situation und deren Entwicklung vereinfacht ab. In der Sicherheitsanalyse werden die Auswirkungen von alternativen Szenarien im Vergleich mit dem Referenzfall aufgezeigt.

Referenzkonzept (Behälter)

Dieses Konzept beschreibt den dickwandigen Stahlbehälter, der in den Sicherheitsanalysen verwendet wird.

Schutzkriterium

Für jede als wahrscheinlich eingestufte zukünftige Entwicklung darf die Freisetzung von Radionukliden zu keiner Individualdosis an der Erdoberfläche führen, die 0,1 mSv pro Jahr überschreitet (Richtlinie ENSI-G03).

SKB

Svensk Kärnbränslehantering AB, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company

Störung (Geologie)

Dies ist eine tektonisch bedingte Trennfläche im Gestein, an der sich Gesteinspakete gegeneinander verschieben oder verschoben haben. Störungen können eine Länge im Millimeter- bis Kilometerbereich haben (Störungszone).

Wiederaufarbeitung

Dabei handelt es sich um ein chemisches Verfahren, bei dem Bestandteile des verbrauchten Brennstoffs abgetrennt werden. Auf diesem Weg werden noch vorhandenes Uran und Plutonium aus den verbrauchten Brennelementen zurückgewonnen, um neue Brennelemente herzustellen.

Nationale Genossenschaft
für die Lagerung
radioaktiver Abfälle

Hardstrasse 73
Postfach 280
5430 Wettingen
Schweiz

Tel. 056 437 11 11
Fax 056 437 12 07

info@nagra.ch
www.nagra.ch

nagra ● **aus verantwortung**