

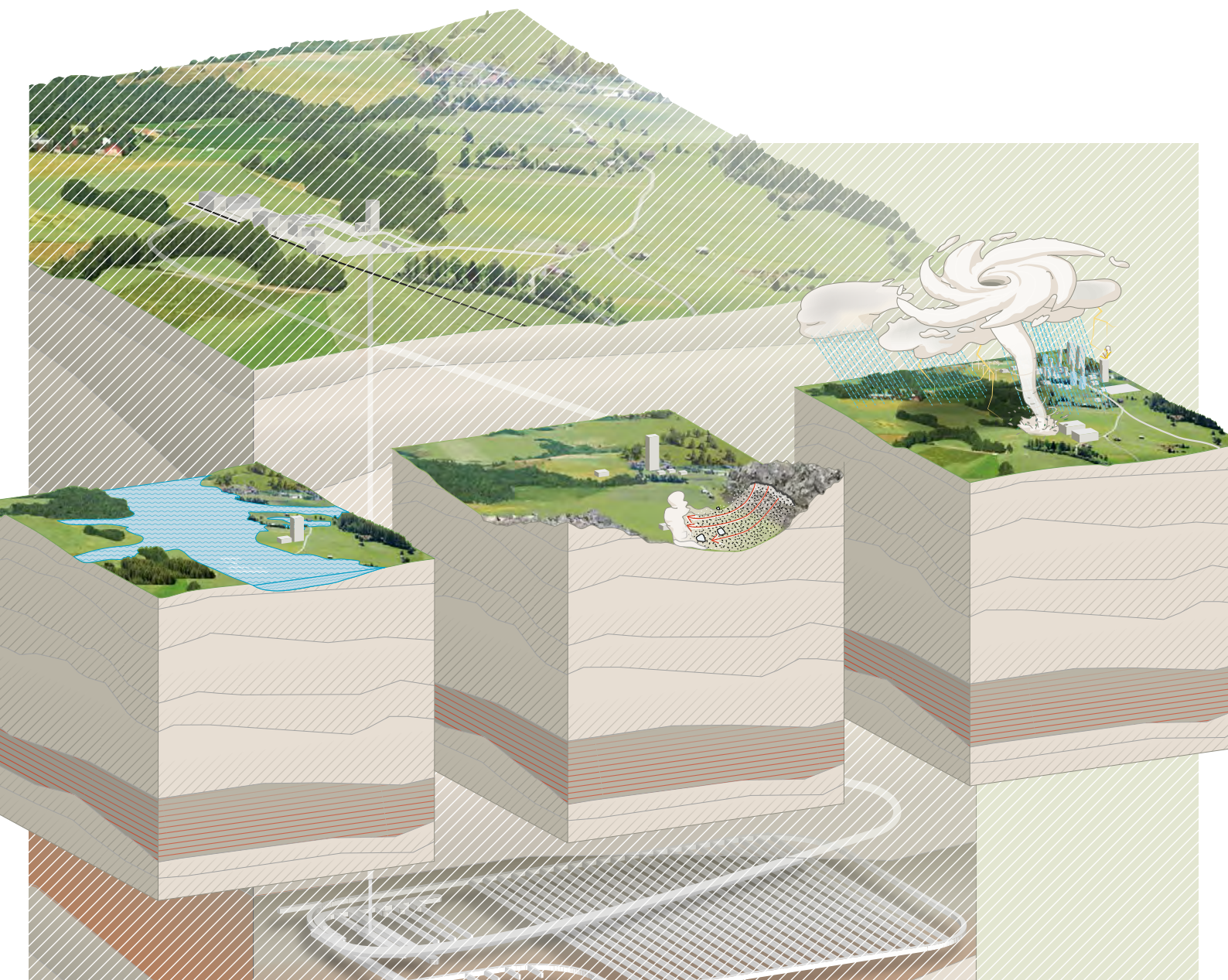


Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI
Inspection fédérale de la sécurité nucléaire IFSN
Ispettorato federale della sicurezza nucleare IFSN
Swiss Federal Nuclear Safety Inspectorate ENSI

Geologische Tiefenlager

RADIOAKTIVE ABFÄLLE SICHER ENTSORGEN



Inhalt

Partizipation braucht Information	3
Langer Weg bis zum Tiefenlager	4
So sucht die Schweiz ein Lager: Sachplan geologische Tiefenlager	6
Zwei Lager für die radioaktiven Abfälle	8
Felslabor Mont Terri – Forschung auf hohem Niveau	10
Der Untergrund wird durchleuchtet	12
Woher radioaktive Abfälle stammen	14
Barrieren halten radioaktive Stoffe zurück	16
Mit Abstand sicher: Schutzbereich um Tiefenlager	18
Das langfristige Strahlenrisiko eines Tiefenlagers	20
Wie lange eine Million Jahre dauert	22
Hohe Anforderungen an die Bautechnik	24
Was man vom Tiefenlager an der Oberfläche sieht	26
Gefahren während des Lagerbetriebs	28
Naturgefahren für Oberflächenanlagen	30
Die Erosion und die Langzeitperspektive	32
Wenn die Erde bebt	34
Wasser im Untergrund	36
Gasbildung und mikrobielle Aktivität	38
Ein Tiefenlager setzt Wärme frei	40
Sicherheit geht vor	42

IMPRESSUM

Informationsbroschüre — Geologische Tiefenlager, 3. Auflage, ENSI 33/879

© 2021 Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI

Herausgeber

ENSI

Industriestrasse 19

CH-5201 Brugg

Telefon: +41 56 460 84 00

E-Mail: info@ensi.ch

Internet: www.ensi.ch

Folgen Sie uns: twitter.com/ENSI_CH

Grafik und Illustration

nougat GmbH, St. Johannis-Vorstadt 17, CH-4056 Basel

Seiten 22/23: Landschaften unter Verwendung von Illustrationen des Mammutmuseums Niederweningen.

Partizipation braucht Information

Liebe Leserinnen, liebe Leser

In der Schweiz werden bei der Stromproduktion in Kernkraftwerken und Anwendungen in Medizin, Industrie und Forschung seit mehr als 50 Jahren radioaktive Abfälle erzeugt. Sie entstehen sowohl im Betrieb von Anlagen als auch bei deren Stilllegung.

Mit dem Kernenergiegesetz hat die Schweiz die Art der Entsorgung dieser Abfälle bestimmt: die geologische Tiefenlagerung. Weltweit sind sich die Experten darüber einig, dass einzig diese Entsorgungsmethode Mensch und Umwelt langfristig vor den Gefahren radioaktiver Abfälle schützt. Dass die Entsorgung und somit auch die Standortsuche in der Schweiz selbst geschehen muss, wird ebenfalls im Kernenergiegesetz geregelt.

Verantwortlich für die Entsorgung der radioaktiven Abfälle sind die Abfallverursacher. Sie haben 1972 die Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra) gegründet, welche Lösungen für eine sichere Entsorgung erarbeiten muss. Als Aufsichtsbehörde erstellt das Eidgenössische Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI die dazu nötigen sicherheitstechnischen Vorgaben und überprüft die Vorschläge der Nagra.

Die Suche nach Standorten für die Lagerung radioaktiver Abfälle ist eine interdisziplinäre und anspruchsvolle Aufgabe. Der Bundesrat hat deshalb 2008 den Sachplan geologische Tiefenlager verabschiedet. Bei diesem Auswahlverfahren hat die Sicherheit oberste Priorität. Es gewährleistet einen frühzeitigen Einbezug der beteiligten

Behörden, Fachorganisationen und Regionen. Der Sachplan schafft somit die Voraussetzungen für ein systematisches, transparentes und partizipatives Vorgehen.

Partizipation stützt sich auf Information. In diesem Sinne liefern wir Ihnen mit dieser Broschüre einen Überblick über die sicherheitstechnischen Aspekte der Tiefenlagerung. Diese Broschüre beinhaltet Antworten zu Fragen, die am «Technischen Forum Sicherheit» gestellt worden sind. Dieses Forum, geleitet vom ENSI, bildet eine zentrale Informations- und Austauschplattform im Sachplanverfahren. Im Forum sind Fachpersonen verschiedener Organisationen und Gremien vertreten. Es dient dazu, technische und wissenschaftliche Fragen zu Sicherheit und Geologie aus der Bevölkerung, von Gemeinden, Standortregionen, Organisationen, Kantonen und dem Gemeinwesen betroffener Nachbarstaaten zu diskutieren und zu beantworten. Es sorgt dafür, dass die Öffentlichkeit sachgerecht mit fundierten Informationen bedient wird. Konkrete Fragen und Antworten aus dem Technischen Forum Sicherheit bilden hierfür die Basis.

Ich wünsche Ihnen eine gute Lektüre!

NOCH FRAGEN? – BITTE UMBLÄTTERN!



Dr. Felix Altorfer

Mitglied ENSI-Geschäftsleitung,
Leiter Aufsichtsbereich Entsorgung



Langer Weg bis zum Tiefenlager

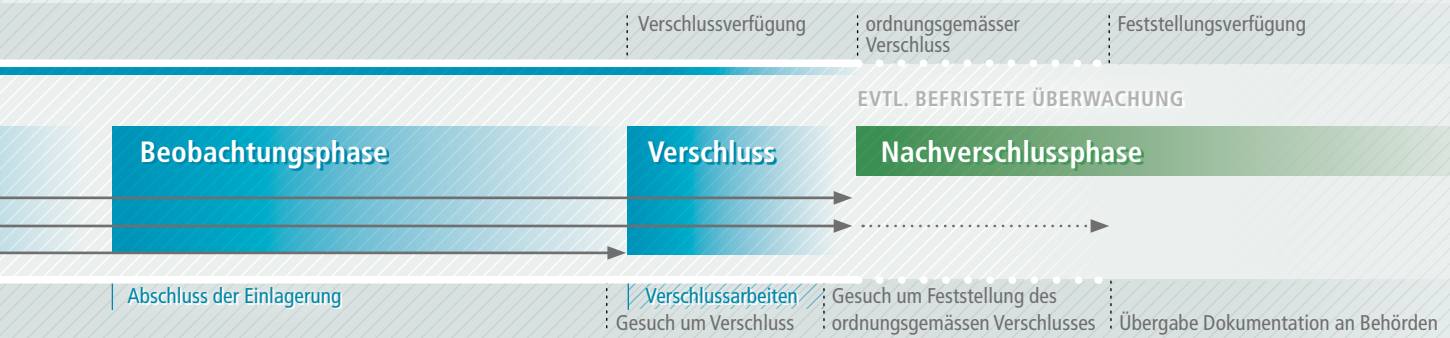
Die Schweiz hat radioaktive Abfälle. Diese stammen aus der Stromproduktion und der Verwendung radioaktiven Materials in Medizin, Industrie und Forschung. Die Radioaktivität in den Abfällen klingt über lange Zeiträume ab. Als nutzniessende Generation sind wir dazu verpflichtet, nachhaltige Lösungen für die Entsorgung der Abfälle zu suchen und umzusetzen. Das schweizerische Kernenergiegesetz schreibt vor, dass alle radioaktiven Abfälle in geologische Tiefenlager gebracht werden müssen.

Gemäss Gesetz ist die sichere Entsorgung Aufgabe der Abfallproduzenten. Diese tragen auch die Kosten der Entsorgung. Für die Entsorgung der radioaktiven Abfälle aus Medizin, Industrie und Forschung ist der Bund zuständig, für die Entsorgung der radioaktiven Abfälle aus der Stromproduktion sind es die Betreiber der Kernkraftwerke. Zur Entsorgung der Abfälle haben die Kernkraftwerksbetreiber gemeinsam mit dem Bund die Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra) gegründet. Die Nagra erarbeitet die technisch-wissenschaftlichen Grundlagen für die Entsorgung, schlägt Standortgebiete für ein Tiefenlager vor, führt Untersuchungen zur Charakterisierung der Standortgebiete durch und bereitet Bau und Betrieb der Anlagen vor. Als unabhängige Aufsichtsbehörde überprüft das ENSI, ob die Nagra die gesetzlichen Vorschriften einhält und den internationalen Stand von Wissenschaft und Technik berücksichtigt.

Das ENSI wird bei seiner Arbeit von unabhängigen Experten aus Forschung und Privatwirtschaft unterstützt.

Grundsätzlich müssen die radioaktiven Abfälle in der Schweiz entsorgt werden. Internationale Lösungen werden im Gesetz zwar nicht ausgeschlossen, in der Praxis dürften internationale Lager aber kaum realisiert werden – auch aufgrund der gesetzlichen Rahmenbedingungen der einzelnen Staaten. Ein wichtiger Schritt zur Schaffung eines geologischen Tiefenlagers in der Schweiz ist die Suche nach geeigneten Standortgebieten. Diese Standortsuche wird mit dem so genannten «Sachplan geologische Tiefenlager» geregelt. Dabei wird ein Standortgebiet für ein Lager für hochaktive Abfälle (HAA) gesucht und eines für ein Lager für schwach- und mittelaktive Abfälle (SMA). Die Standortsuche läuft seit 2008 und soll bis voraussichtlich 2029 mit einem Bundesratsentscheid abgeschlossen werden.

Ist ein geeignetes Standortgebiet gefunden, verbleibt noch ein langer Weg, bis ein Tiefenlager gebaut, die radioaktiven Abfälle eingelagert und schliesslich alle Zugänge verschlossen sein werden. Meilensteine auf diesem Weg sind verschiedene Bewilligungsschritte, die den Bau, den Betrieb, die Beobachtungsphase und den Verschluss umfassen. Nach ordnungsgemäsem Verschluss oder nach Ablauf einer Überwachungsfrist stellt der Bundesrat fest,



dass das Lager nicht mehr der Kernenergiegesetzgebung untersteht. Der Bund kann weitergehende Massnahmen nach diesem Zeitpunkt, wie eine Umweltüberwachung, durchführen. Nach aktueller Zeitplanung wird die Einlagerung von SMA nicht vor 2050 und die Einlagerung von HAA nicht vor 2060 beginnen. Viele SMA fallen erst bei der Stilllegung der Kernkraftwerke an. Bis HAA eingelagert

werden können, müssen sie zur Abkühlung ca. 40 Jahre zwischengelagert werden.



ENSI 33/592: Stellungnahme zum Entsorgungsprogramm 2016 der Entsorgungspflichtigen, ENSI, 2018.

ENSI 35/114: Stellungnahme zu NTB 08-02 «Bericht zum Umgang mit den Empfehlungen in den Gutachten und Stellungnahmen zum Entsorgungsnachweis», ENSI, 2012.

Offene Fragen und die Realisierung eines geologischen Tiefenlagers

Viele Entscheide auf dem langen Weg zum geologischen Tiefenlager sind noch nicht gefallen. Soll beispielsweise der Zugang zum Lager im Untergrund mit einer Rampe oder einem Schacht erfolgen? Diese und weitere Fragen werden bei jedem Bewilligungsschritt betrachtet, so im Entsorgungsnachweis, in den Etappen des Sachplans und in den einzureichenden Rahmenbewilligungs- und Baugesuchen. So können Planung und Bau des Lagers schrittweise den neusten Erkenntnissen aus Technik und Wissenschaft angepasst werden.

Der Fortschritt bei der Klärung offener Fragen wird im Entsorgungsprogramm der Entsorgungspflichtigen dokumentiert, welches alle fünf Jahre zu aktualisieren ist, vom ENSI geprüft und nach Prüfung vom Bundesrat genehmigt. Das ENSI empfiehlt dem Bundesrat in seinen Stellungnahmen jeweils Auflagen im Hinblick auf künftig einzureichende Entsorgungsprogramme. In diesem Dokumenten finden sich jeweils folgende Angaben:

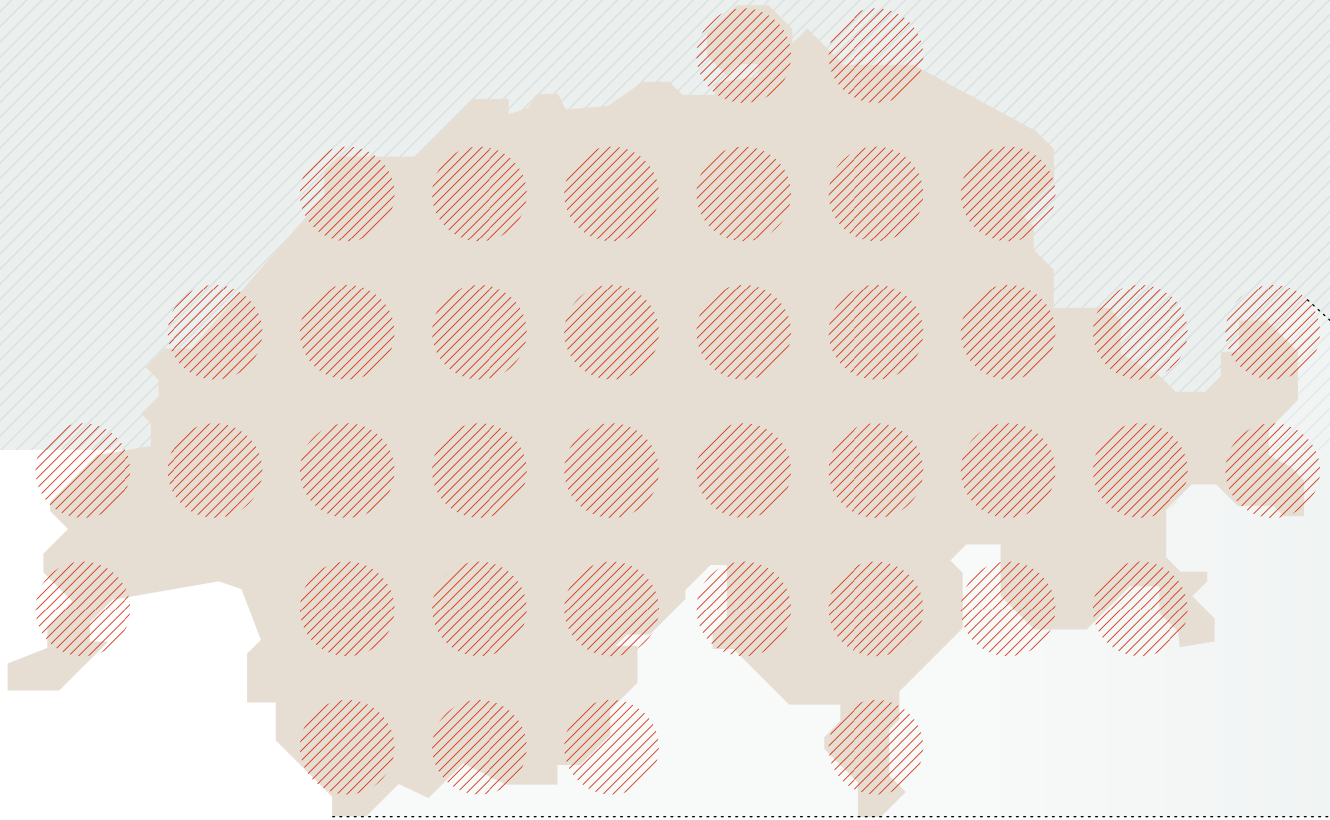
- Herkunft, Art und Menge der radioaktiven Abfälle;
- benötigte geologische Tiefenlager einschliesslich ihrer Lagerkonzepte;
- Zuteilung der Abfälle zu den geologischen Tiefenlagern;
- Realisierungsplan für die Erstellung der geologischen Tiefenlager;
- Dauer und benötigte Kapazität der Zwischenlagerung;
- Kostenplan für alle Entsorgungsarbeiten bis zum Verschluss der Tiefenlager.

Teil des Entsorgungsprogramms ist auch das Forschungsprogramm der Nagra. Mit diesem Programm wird aufgezeigt, mit welchen Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten bestehende offene Fragen angegangen werden und bis zu welchem Zeitpunkt diese zu klären sind. Das ENSI nimmt auch zu diesem Bericht jeweils Stellung.

Technisches Forum Sicherheit, Fragen Nr. 50, 64 und 81



ENSI 33/593: Empfehlungen und Hinweise aus der Beurteilung des Entsorgungsprogramms und des RD&D-Plans 2016.

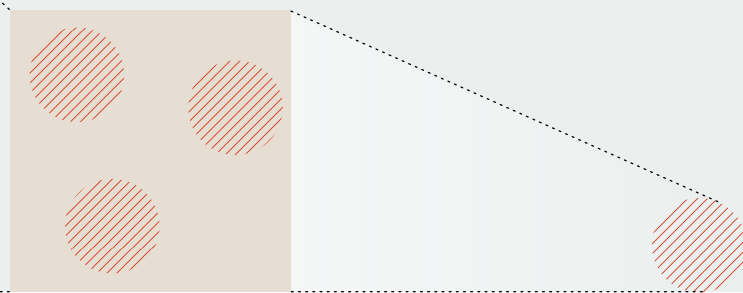


Der «Sachplan geologische Tiefenlager» legt das Verfahren fest, wie in der Schweiz Standorte für geologische Tiefenlager radioaktiver Abfälle ausgewählt werden. Sachpläne sind ein Mittel der Raumplanung und organisieren die Zusammenarbeit zwischen Bund und Kantonen. Das Konzept zum Sachplan geologische Tiefenlager wurde vom Bundesamt für Energie mit weiteren Behörden und Organisationen entwickelt und 2008 vom Bundesrat verabschiedet. Der Sachplan soll eine transparente und faire Standortwahl ermöglichen.

Ziel der geologischen Tiefenlagerung ist der langfristige Schutz von Mensch und Umwelt. Daher erfolgt die Standortauswahl primär nach sicherheitstechnischen Kriterien. Andere Kriterien wie gesellschaftliche und wirtschaftliche Aspekte spielen eine untergeordnete Rolle. Am Ende des Verfahrens werden die Standorte feststehen – je einer für die hochaktiven Abfälle (HAA) und für die schwach- und mittelaktiven Abfälle (SMA) oder ein Standort für alle Abfälle in einem Kombilager.

Das Sachplanverfahren besteht aus drei Etappen. In **ETAPPE 1** hat die Nagra geologisch geeignete Standortgebiete vorgeschlagen (sechs Gebiete für ein SMA-Lager und drei für ein HAA-Lager), welche die vom Bund vorgegebenen Kriterien zur Sicherheit und technischen Machbarkeit erfüllen. Die Nagra hat sich dabei auf das aktuelle geologische Wissen abgestützt und musste zahlreiche behördliche Vorgaben berücksichtigen. Das ENSI hat den Vorschlag der Nagra überprüft und den Standortgebieten zugestimmt. Weitere Gremien aus dem In- und Ausland haben ebenfalls empfohlen, die vorgeschlagenen Standortgebiete in Etappe 2 vertieft zu untersuchen. Vorbereitend für Etappe 2 erfolgte der Aufbau der regionalen Mitwirkung. In den sogenannten Regionalkonferenzen können die Standortregionen ihre Interessen vertreten. Etappe 1 wurde Ende 2011 mit der Festlegung der geologischen Standortgebiete durch den Bundesrat abgeschlossen.

So sucht die Schweiz ein Lager: Sachplan geologische Tiefenlager



In **ETAPPE 2** wurden die Standortgebiete sicherheitstechnisch miteinander verglichen. Basierend auf diesem Vergleich schlug die Nagra vor, die Standortgebiete Jura Ost und Zürich Nordost in Etappe 3 vertieft zu untersuchen. Das ENSI überprüfte den Vorschlag und kam zum Schluss, dass auch das Standortgebiet Nördlich Lägern weiter zu untersuchen sei. Der Bundesrat hat Ende 2018 entschieden, dass das Verfahren in Etappe 3 mit diesen drei Gebieten weitergeführt wird. In allen Standortgebieten ist die Lagerung von HAA und SMA möglich. Neben der Einengung der möglichen Standorte hatte die Nagra in Etappe 2 in intensiver Zusammenarbeit mit den Standortregionen Standortareale für die Oberflächenanlagen ermittelt und bezeichnet. Neben der sicherheitstechnischen Bewertung, die weiterhin oberste Priorität hat, erfolgte hierbei die Beurteilung auch nach gesellschaftlichen, wirtschaftlichen und raumplanerischen Gesichtspunkten.

Am Ende von **ETAPPE 3** steht die Erteilung einer oder zwei Rahmenbewilligungen für die geologischen Tiefenlager. Das ENSI hat die Vorgaben für diese letzte Etappe präzisiert. Die Nagra untersucht die drei Standortgebiete mit Tiefbohrungen und 3D-seismischen Messungen. Die Lagerprojekte werden unter Einbezug der Standortregionen konkretisiert und die Auswirkungen der Lager auf Gesellschaft und Wirtschaft vertieft untersucht. Die Nagra gibt voraussichtlich 2022 ihre Standortwahl bekannt und reicht für die gewählten Standorte die finalen Dokumente für Rahmenbewilligungsgesuche voraussichtlich 2024 ein. Diese werden vom ENSI und weiteren Fachstellen geprüft. Der Bundesrat wird voraussichtlich 2029 über die Rahmenbewilligungen befinden, welche auch vom Parlament genehmigt werden müssen. Diese Standortentscheide unterliegen dem nationalen fakultativen Referendum. Das Schweizer Volk hat also das letzte Wort zur Standortwahl.



ENSI 33/649: Präzisierungen der sicherheitstechnischen Vorgaben für Etappe 3 des Sachplans geologische Tiefenlager, 2018.

BFE (2011): Sachplan geologische Tiefenlager – Konzeptteil, BFE, (Revision vom 30. November 2011).

HSK 33/001: Sachplan geologische Tiefenlager – Herleitung, Beschreibung und Anwendung der sicherheitstechnischen Kriterien für die Standortevaluation, HSK, 2007.

Zwei Lager für die radioaktiven Abfälle

Die heute produzierten radioaktiven Abfälle stellen für Jahrtausende eine Gefahr für Mensch und Umwelt dar. Deshalb müssen die Abfälle so entsorgt werden, dass der langfristige Schutz von Mensch und Umwelt sichergestellt ist. Einen solchen Schutz bieten nur geologische Tiefenlager. Andere Entsorgungskonzepte wie Lager an der Erdoberfläche, Versenken der Abfälle im Meer oder die Abfälle mit Raketen ins All zu schiessen wurden in der Schweiz von der Expertengruppe Entsorgungskonzepte für radioaktive Abfälle (EKRA) geprüft, aber als zu unsicher verworfen. Das heutige Entsorgungskonzept sieht den Bau eines geologischen Tiefenlagers für schwach- und mittelaktive Abfälle sowie den Bau eines Tiefenlagers für hochaktive Abfälle vor. Alternativ ist auch ein Kombilager mit einer gemeinsamen Oberflächenanlage möglich.

In allen Fällen besteht ein geologisches Tiefenlager aus dem **Hauptlager**, dem **Pilotlager** und den **Testbereichen**. Vor Baubeginn wird in den Testbereichen ein Felslabor eingerichtet. In diesem Labor können Experimente unmittelbar am Wirtgestein durchgeführt und dessen Eigenschaften überprüft werden. Erst wenn die gewonnenen Daten die hohen Sicherheitsanforderungen bestätigen, beginnt der Bau der weiteren Lagerteile (zuerst Pilotlager, dann Hauptlager). Im Pilotlager werden für das Tiefenlager repräsentative Abfälle eingelagert und über einen längeren Zeitraum überwacht. Sowohl im Felslabor als auch im Pilotlager können wichtige Annahmen und Parameter, die dem

Lager- und Barrierenkonzept zu Grunde liegen, überprüft werden. Nachdem das Pilotlager verfüllt ist und dessen Überwachung begonnen hat, beginnt die Einlagerung der radioaktiven Abfälle im Hauptlager.

Die Einlagerung schwach- und mittelaktiver Abfälle beginnt frühestens ab 2050. Hochaktive Abfälle müssen etwa 40 Jahre zwischengelagert werden, bis sie genügend abgekühlt sind. Deren Einlagerung beginnt etwa ab 2060. Rund 20 Jahre später ist die Einlagerung beendet und der Betrieb geht in eine Beobachtungsphase über, deren Dauer von den zukünftigen Behörden festgelegt wird. Auch während der Beobachtungsphase muss die Rückholung der Abfälle weiterhin möglich sein. Technische Massnahmen wie die Offenhaltung von Zugangsstollen erleichtern die Rückholung, die mit erhöhtem Aufwand auch nach dem Verschluss des Tiefenlagers möglich bleibt. Ist der dauernde Schutz von Mensch und Umwelt gewährleistet, ordnet der Bundesrat den Verschluss an. Die noch offenen Teile des Tiefenlagers werden dann verfüllt und versiegelt. Das verschlossene Lager muss von den nachkommenden Generationen weder gewartet noch überwacht werden. Eine Überwachung kann aber im Rahmen der nationalen Umweltüberwachung weitergeführt werden.

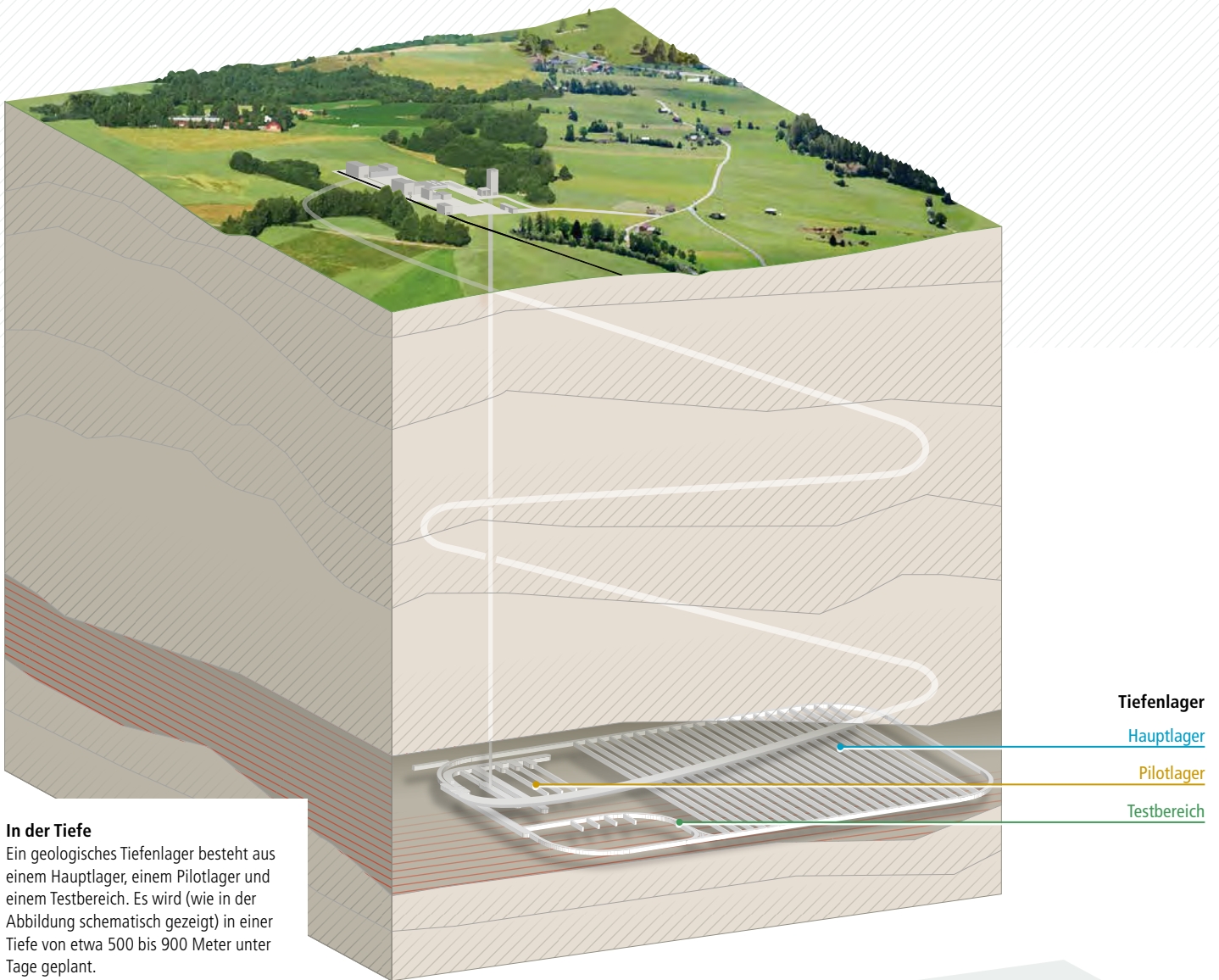


BFE (2011): Sachplan geologische Tiefenlager – Konzeptteil, BFE, (Revision vom 30. November 2011).

NTB 02-02: Projekt Opalinuston, Konzept für die Anlage und den Betrieb eines geologischen Tiefenlagers, Nagra, 2002.

Wann ist ein Kombilager möglich?

Bei einem Kombilager handelt es sich um zwei räumlich getrennte Lagerbereiche für einerseits hochaktive sowie andererseits schwach- und mittelaktive Abfälle, die gemeinsame Anlagen (eine WEG) an der Oberfläche nutzen. Für ein Kombilager gelten gemäss den präzisierten Vorgaben des ENSI die gleichen Sicherheitsanforderungen wie für einzelne Tiefenlager. Es setzt genügend Platz im Untergrund voraus. Aufgrund der strengeren Anforderungen an die geologischen Barrieren und des längeren Betrachtungszeitraums für ein Lager für hochaktive Abfälle (HAA) ist in Etappe 3 zuerst der Standort für das HAA-Lager zu wählen. Danach wird der Standort für das Lager für schwach- und mittelaktive Abfälle (SMA) gewählt. Ein Kombilager kann von der Nagra nur vorgeschlagen werden, falls die Platzierung des HAA- und SMA-Lagers im gleichen Standortgebiet sicherheitstechnische Vorteile ergibt. Dazu dürfen die möglichen Wechselwirkungen zwischen den beiden Lagern im Untergrund keine sicherheitsrelevante Beeinträchtigung darstellen. *Technisches Forum Sicherheit, Fragen Nr. 41, 113, 116, 140*



In der Tiefe

Ein geologisches Tiefenlager besteht aus einem Hauptlager, einem Pilotlager und einem Testbereich. Es wird (wie in der Abbildung schematisch gezeigt) in einer Tiefe von etwa 500 bis 900 Meter unter Tage geplant.

Tiefenlager

Hauptlager

Pilotlager

Testbereich

Welche Forschungsarbeiten sind noch erforderlich, um das bestehende Lagerkonzept weiter zu entwickeln?

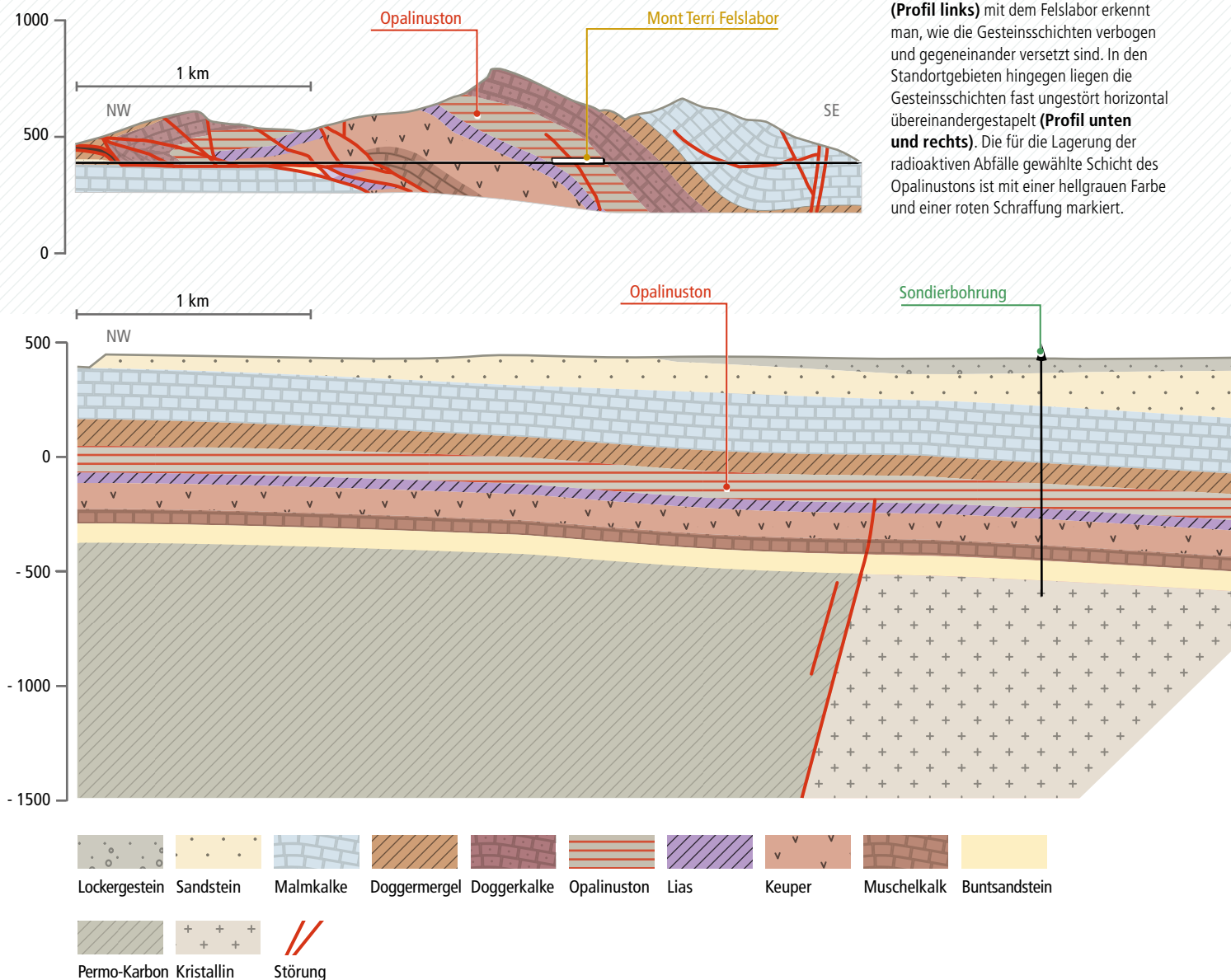
Das ENSI hat im Rahmen des AGNEB-Forschungsprojekts «Lagerauslegung» verschiedene Fragestellungen diskutiert. Zudem wurde die Lagerauslegung in anderen Ländern in tonreichem Wirtgestein (Belgien, Frankreich und Kanada) im Bericht beschrieben. Die wichtigsten Fragen waren:

- Welche Möglichkeiten der Anordnung der Lagerstollen gibt es und welches sind ihre Vor- und Nachteile?
- Wie ist die Lagerauslegung optimal auf die geologisch-tektonische Situation am Standort anzupassen (Trennflächengeometrie und -häufigkeit, Spannungsverteilung)?
- Mit welchen Techniken können wirksam und langfristig Wassereinträge in den Zugangsbauwerken (Schacht/Rampe) bei der Querung von Aquiferen oder Störungszonen vermieden bzw. deren Wirkung aufgefangen werden?
- Was sind die Vor- und Nachteile der verschiedenen Kombinationsmöglichkeiten von Schächten und Rampen bei den Zugangsbauwerken?
- Was sind die sicherheitstechnischen Vor- und Nachteile eines Kombilagers?
- Welchen Einfluss hat die Behältergröße auf das Lagerkonzept?



ENSI 33/503: Schlussbericht zum Agneb-Forschungsprojekt Lagerauslegung.

Technisches Forum Sicherheit, Fragen Nr. 40, 54, 78, 110, 129 und 151



Gleiches Gestein – andere Verhältnisse

Im Felslabor wird der Opalinuston untersucht. Dieses Gestein ist in der Schweiz als Wirtgestein für die Lagerung radioaktiver Abfälle vorgesehen. Doch nicht alle Untersuchungsergebnisse können vom Felslabor Mont Terri direkt auf die Standortgebiete der Nordschweiz übertragen werden. Die Gesteine in der Nordschweiz sind ruhig gelagert (Profil oben), die Gesteine am Mont Terri verfaultet und schräggestellt (Profil ganz oben links). Gut gelingt dies bei den primären Gesteinseigenschaften, die nur wenig von der Schräglage und Faltung der Schichten, den damit verbundenen Verformungen und Störungen des Gesteinsverbands oder der geringeren Tiefenlage unter Terrain beeinflusst sind. Zu diesen Eigenschaften zählen die Wasserdichtheit, die kleinen Durchmesser der Poren im Gestein oder der hohe Anteil an Tonmineralen, welche den Opalinuston aufbauen. Auch die methodischen Entwicklungen und die Forschung zu den im Tiefenlager vorgesehenen technischen Barrieren, wie den Tiefenlagerbehältern oder den Verfüllmaterialien, können später in den Standortgebieten direkt genutzt werden.

Warum die Aufsichtsbehörde im Felslabor Mont Terri forscht

Das ENSI definiert den Stand von Wissenschaft und Technik. Dieser stützt sich auf der internationalen Forschung ab, wie sie im Felslabor Mont Terri betrieben wird.

Das ENSI ist national und international vernetzt und pflegt die Zusammenarbeit mit Fachbehörden und Fachleute.

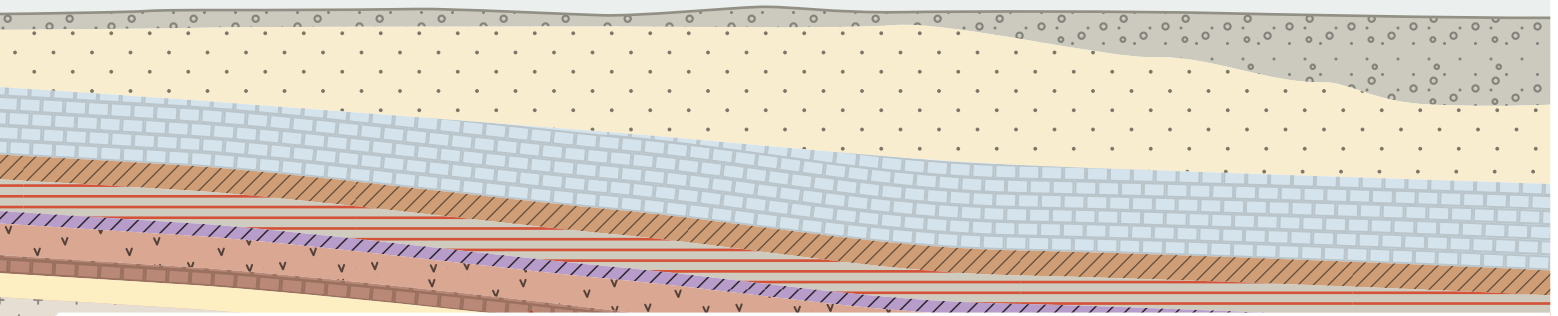
Das ENSI erweitert die Fachkompetenz seiner Mitarbeitenden und seiner Fachleute.

Das ENSI validiert eigene Modellrechnungen an unabhängig erworbenen Feldergebnissen, um die Unterlagen der Nagra überprüfen zu können.

Das ENSI kann in der Forschung neue Impulse aufnehmen, die aus seiner Sicht noch nicht ausreichend verfolgt wurden.

Felslabor Mont Terri – Forschung auf hohem Niveau

SE



Nicht alle Fragen rund um die geologische Tiefenlagerung sind heute schon abschliessend geklärt. Dies ist auch nicht notwendig, denn Bau, Betrieb und Verschluss liegen noch weit in der Zukunft. Bereits heute werden im Felslabor Mont Terri nahe St-Ursanne (JU), einem internationalen Forschungsprojekt abseits der vorgeschlagenen Standorte für geologische Tiefenlager, Erkenntnisse zu wichtigen, sicherheitsrelevanten Eigenschaften des Opalinustons gesammelt. So leistet das Felslabor einen Beitrag zur sicheren Entsorgung radioaktiver Abfälle.

Die Forschung im Felslabor deckt drei übergeordnete Themen ab:

- Forschung und Entwicklung (z. B. Messmethoden, die zur Erkundung und Beobachtung geologischer Tiefenlager eingesetzt werden können)
- Charakterisierung des Opalinustons (Gesteinseigenschaften, siehe links: «Gleiches Gestein, andere Verhältnisse»)
- Optimierung technischer Barrierensysteme (z. B. Demonstrationsexperimente, um die Wechselwirkung zwischen Abfall und Opalinuston aufzuzeigen)

Seit seiner Gründung 1994 ist das Mont Terri-Projekt stetig gewachsen. Heute forschen dort 22 Partnerorganisationen aus neun Ländern. Eine Besonderheit stellt dabei die demokratische Organisationsstruktur des Projekts dar, welche von den Partnerorganisationen vereinbart wurde und innerhalb derer auch die jährlichen Forschungsprogramme

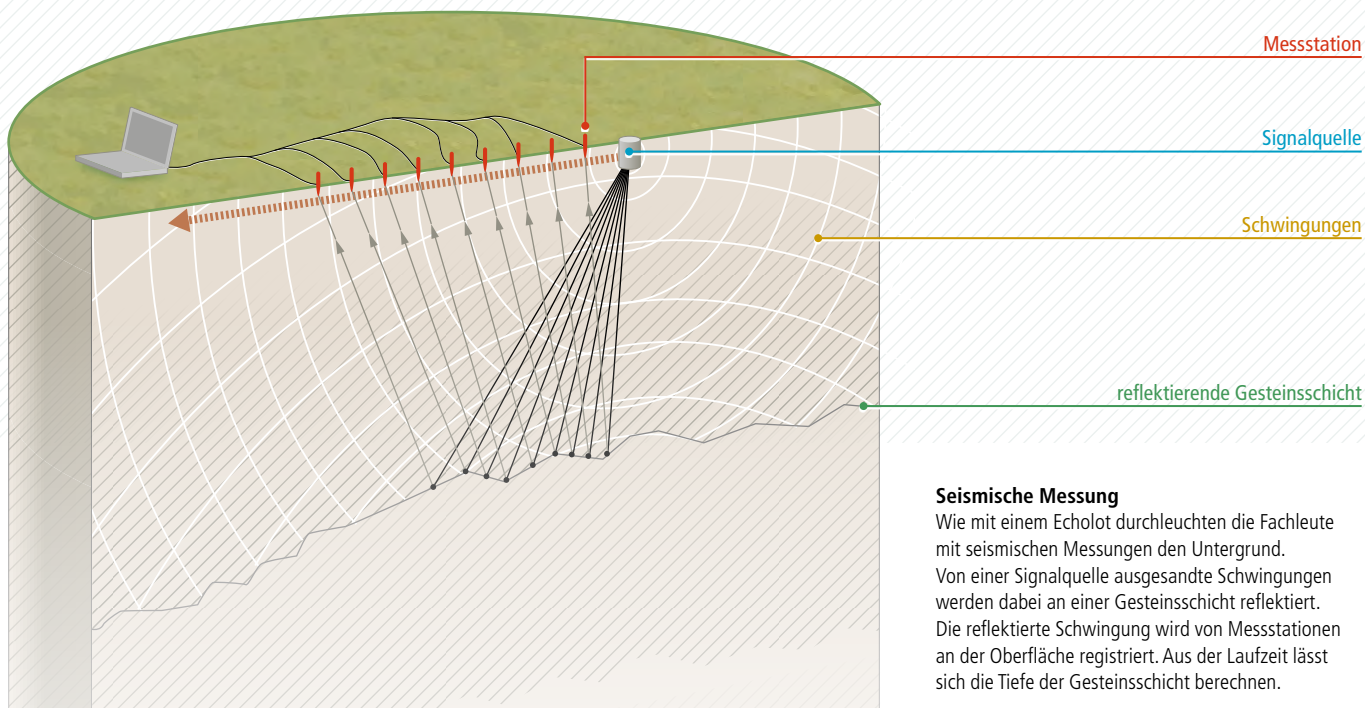
verabschiedet werden. Von 1996 bis Mitte 2021 wurden insgesamt 103 Millionen Franken in mehr als 150 Experimente investiert. Das Felslabor wird durch das Bundesamt für Landestopographie (swisstopo) betrieben. Mehrere Male wurde die unterirdische Anlage erweitert und ausgebaut. Zuletzt kamen 2019 weitere 515 Stollenmeter hinzu, sodass heute Galerien von ca. 1200 Metern Gesamtlänge für Experimente zur Verfügung stehen. Auch neue Forschungsthemen abseits der Entsorgung radioaktiver Abfälle sind hinzugekommen, wie etwa zur Speicherung von Kohlendioxid im Untergrund oder zur Funktion von Tongesteinen als Deckschicht von Kohlenwasserstofflagerstätten.

Das ENSI beteiligt sich seit der Gründung des Felslabors mit eigenen Forschungsarbeiten am Mont Terri-Projekt. Im Laufe der Zeit kamen mehr und mehr Themen hinzu. Dazu gehört etwa, wie verschiedene Prozesse (hydraulische, thermische, chemische oder mechanische Prozesse) beim Transport von radioaktiven Stoffen durch das Gestein hindurch zusammenwirken. Die Arbeiten werden mit verschiedenen Forschungsgruppen und verschiedenen Projektpartnern realisiert.

Das Felslabor kann unter der Woche und an Samstagen von Gruppen besucht werden. Informationen zu Führungen finden sich unter:



www.mont-terri.ch



Seismische Messung

Wie mit einem Echolot durchleuchten die Fachleute mit seismischen Messungen den Untergrund. Von einer Signalquelle ausgesandte Schwingungen werden dabei an einer Gesteinsschicht reflektiert. Die reflektierte Schwingung wird von Messstationen an der Oberfläche registriert. Aus der Laufzeit lässt sich die Tiefe der Gesteinsschicht berechnen.

Auf der Suche nach einem geeigneten Lagerstandort muss der geologische Untergrund gut bekannt sein. Daten und Erkenntnisse können dafür über ein breites Spektrum von erdwissenschaftlichen Untersuchungen gewonnen werden. Solche Untersuchungen können das zu untersuchende Gestein verletzen (z. B. Bohrungen). Das Gestein kann aber beispielsweise auch mit geophysikalischen Untersuchungsmethoden (Seismik) zerstörungsfrei «durchleuchtet» werden. Weitere Erkenntnisse gewinnen die Geologen auch anhand von Aufschlüssen – an Stellen im Gelände also, bei denen das zu untersuchende Gestein zutage tritt.

Ein wichtiger Faktor für die Sicherheit eines geologischen Tiefenlagers ist die Unversehrtheit der Gesteine, die die radioaktiven Abfälle einschliessen. Deshalb sind Untersuchungsmethoden von grosser Bedeutung, die diese Gesteine nicht verletzen. Gerade mit seismischen Untersuchungen gewinnen die Fachleute ein genaues Bild des Untergrunds.

Das Prinzip von seismischen Messungen ist mit dem Echolot von Schiffen vergleichbar: Von einer **Signalquelle** (Sprengung, Vibration) werden **Schwingungen** in den Untergrund ausgesendet. Diese Schwingungen breiten sich wellenartig aus. An der Grenze zwischen zwei **Gesteinsschichten** werden die Schwingungen reflektiert und an **Messstationen** an der Oberfläche registriert. Basierend auf der Laufzeit der Schwingungen durch den Untergrund wird mit Computern berechnet, in welcher Tiefe sich die reflektierende Gesteinsschicht befindet. Die Auswertung vieler

solcher Messungen erlaubt es, die geologischen Strukturen im Untergrund zu bestimmen.

Das Verfahren der seismischen Messung wird schon seit mehreren Jahrzehnten in verschiedensten Bereichen der Geologie angewendet, etwa bei der Suche nach Rohstoffen (u. a. Erdöl, Erdgas, Grundwasser), bei Untersuchungen des Baugrundes oder von Altlasten, sowie bei der Abschätzung von Naturgefahren. Die Fachleute können deshalb auf eine grosse Erfahrung zurückgreifen. Die Auflösung der geologischen Strukturen und physikalischen Parameter im Untergrund ist stark von der Messanordnung abhängig. Mit den heutigen seismischen Methoden kann eine Auflösung in der Grössenordnung von zehn Metern im Tiefenbereich eines geologischen Tiefenlagers erreicht werden.

Weitere Methoden, die in der Geophysik zum Einsatz kommen, sind gravimetrische (Messung der örtlichen Schwerkraft), elektrische, elektromagnetische oder magnetische Messverfahren. Um ein umfassendes Bild der geologischen Strukturen und der physikalischen Eigenschaften im Untergrund zu gewinnen, werden häufig verschiedene, sich ergänzende erdwissenschaftliche Untersuchungen angewendet.

Geophysikalische Methoden erlauben eine grossräumige Erfassung des zu untersuchenden Untergrunds. Mit der 3D-Seismik werden jedoch nur die Zeiten gemessen, die vergehen, bis ein Signal wieder zurück an die Oberfläche

Der Untergrund wird durchleuchtet

Seismische Messung

Wie mit einem Echolot durchleuchten die Fachleute mit seismischen Messungen den Untergrund. Von einer Signalquelle ausgesandte Schwingungen werden dabei an einer Gesteinsschicht reflektiert. Die reflektierte Schwingung wird von Messstationen an der Oberfläche registriert. Aus der Laufzeit lässt sich die Tiefe der Gesteinsschicht berechnen.

Erkennen geophysikalische Untersuchungsmethoden auch grössere Störungen unterhalb des Wirtgesteins Opalinuston?

In den Gesteinsschichten, die wie der Opalinuston zum sedimentären Deckgebirge gehören, sind grössere Störungen mit seismischen Messungen in der Regel zuverlässig erkennbar. Denn die unterschiedlichen Gesteinsschichten lassen sich aufgrund ihrer unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften gut abbilden. Störungen unterhalb des sedimentären Deckgebirges im kristallinen Grundgebirge sind schwieriger erkennbar. Die Wahrscheinlichkeit, dass grosse Störungen unterhalb des Opalinustons, welche diesen nicht erreichen – und demzufolge seit mindestens etwa 170 Millionen Jahren nicht mehr aktiv waren – innerhalb der nächsten Million Jahre reaktiviert werden und sich nach oben fortsetzen, ist sehr gering. Weil dieser Fall aber nicht vollständig ausgeschlossen werden kann, wird er in der Sicherheitsanalyse berücksichtigt.

Technisches Forum Sicherheit, Frage Nr. 32

kommt. Die zusätzlichen Bohrungen helfen, die Zeiten aus der 3D-Seismik in der Tiefe umzurechnen. Dazu kann in den Bohrungen die genaue Position der Schichten bestimmt und die seismischen Wellengeschwindigkeiten im Bohrloch gemessen werden. Die Bohrungen dienen vor allem dazu, aus der Tiefe Bohrkerne zu gewinnen und daran die Eigenschaften der Gesteine im Untergrund zu bestimmen.

Zur Untersuchung der oberflächennahen Lockergesteine werden zudem Quartärbohrungen durchgeführt, welche u.a. Hinweise zu früheren Erosionsprozessen liefern.

Die Informationen aus allen Bohrungen und der Seismik bilden die wesentliche Datengrundlage für die Beurteilung der Sicherheit der Wirtgesteine und Geologie, welche die wichtigste Barriere für das zukünftige geologische Tiefenlager darstellt.



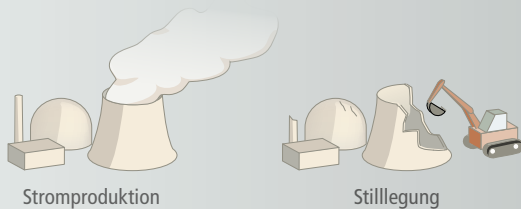
ENSI 33/540: Sicherheitstechnisches Gutachten zum Vorschlag der in Etappe 3 SGT weiter zu untersuchenden geologischen Standortgebiete, 2017.

ENSI 33/646: Expertenbericht: Beurteilung der Datenverarbeitung und Interpretation der 2D-Seismik der Nagra.

Nagra: www.nagra.ch/de/seismik.htm

Woher radioaktive Abfälle stammen

Kraftwerke



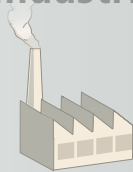
Stromproduktion

Stilllegung

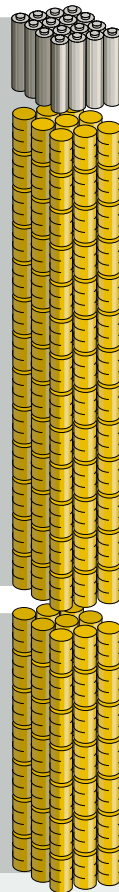
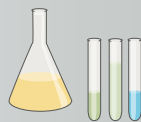
Medizin



Industrie



Forschung



10 % hochaktive Abfälle
VOLUMEN (inkl. langlebige mittelaktive Abfälle)

99 %
RADIOTOXIZITÄT

1 %
RADIOTOXIZITÄT

90 % schwach- und mittelaktive Abfälle
VOLUMEN

Radioaktive Abfälle in der Schweiz

Das Volumen der radioaktiven Abfälle setzt sich zu zwei Dritteln aus Abfällen der Kernkraftwerke sowie zu einem Drittel aus Abfällen der Medizin, Industrie und Forschung zusammen.

Etwa 10 % des Gesamtvolumens sind hochaktive Abfälle, die etwa 99 % der Radiotoxizität beinhalten.

Werden Schweizer Abfälle ins Ausland exportiert?

Radioaktiver Abfall aus der Schweiz ist gemäss Kernenergiegesetz grundsätzlich in der Schweiz zu entsorgen. Die Ausfuhr von Abfällen zur Entsorgung ist nur in Ausnahmefällen möglich, wenn es dafür völkerrechtliche Vereinbarungen gibt. Bis ins Jahr 2006 wurden abgebrannte Brennelemente zur Wiederaufarbeitung nach Frankreich (La Hague) und England (Sellafield) geschickt. Die entsprechenden Abfälle wurden bis Ende 2016 wieder vollständig in die Schweiz rückgeführt. Ab 2006 wurde die Ausfuhr zur Wiederaufarbeitung durch ein zehnjähriges Moratorium verboten. Seit 2018 ist dieses Verbot ohne zeitliche Begrenzung im Kernenergiegesetz verankert. *Technisches Forum Sicherheit, Frage Nr. 23*

Die radioaktiven Abfälle in der Schweiz stammen zu gut zwei Dritteln aus Kernkraftwerken und zu knapp einem Drittel aus Medizin, Industrie und Forschung. Die Abfälle werden in die Kategorien hochaktive Abfälle (HAA), alphatoxische Abfälle (ATA) und kurzlebige schwach- und mittelaktive Abfälle (SMA) unterteilt, wobei die ATA entweder mit den HAA oder den SMA in einem gemeinsamen geologischen Tiefenlager entsorgt werden.

Zur Kategorie der hochaktiven Abfälle gehören abgebrannte Brennelemente aus Kernkraftwerken sowie verglaste Rückstände aus der Wiederaufarbeitung der Brennelemente. Das Volumen der HAA wird etwa 9500 m³ betragen und schliesst die Tiefenlagerbehälter ein. Alphatoxische Abfälle umfassen Abfälle aus der Wiederaufarbeitung (z. B. Hülsen und Endstücke der Brennelemente) und mittelaktive Betriebsabfälle aus Kernkraftwerken und Forschungsanlagen. Das Volumen der ATA wird etwa 1100 m³ betragen. HAA und ATA zusammen beinhalten etwa 99 Prozent der Radiotoxizität aller radioaktiven Abfälle der Schweiz.

Bei den schwach- und mittelaktiven Abfällen handelt es sich überwiegend um Betriebs- und Stilllegungsabfälle aus Kernkraftwerken und Forschungseinrichtungen sowie um Abfälle aus medizinischen und industriellen Anwendungen. Das Volumen der SMA wird etwa 82000 m³ betragen, was rund 86 Prozent des gesamten Abfallvolumens entspricht. Gleichzeitig enthalten sie aber nur etwa 1 Prozent der gesamten Radiotoxizität. Die Abfallmengen basieren auf der

Annahme einer 60-jährigen Betriebszeit der bestehenden Kernkraftwerke einschliesslich ihrer Stilllegungsabfälle.

Bis zur Einlagerung in ein geologisches Tiefenlager werden die Abfälle in Zwischenlagern aufbewahrt. Für jeden Tiefenlagerbehälter werden das Materialinventar und die eingeschlossene Radioaktivität dokumentiert. Um das Abfallvolumen möglichst gering zu halten, werden beispielsweise organische Abfälle, soweit technisch möglich, verbrannt. Abfälle dürfen nur in fester und stabilisierter Form in ein Tiefenlager gebracht werden. Dazu werden sie in einer Matrix, z. B. aus Glas, Zement oder Bitumen, eingebunden.

Die Behälter für den Transport und die Zwischenlagerung der hochaktiven Abfälle sind gegen mögliche Transport- und Handhabungsstörfälle ausgelegt. Diese Transportbehälter (z. B. «Castorbehälter») sind u. a. wegen ihrer Grösse nicht für die Tiefenlagerung geeignet. Abgebrannte Brennelemente und verglaste Abfälle aus der Wiederaufarbeitung werden deshalb vor der Tiefenlagerung an der Oberfläche in der «heissen Zelle» der Verpackungsanlage in endlagerfähige Behälter, sogenannte Tiefenlagerbehälter, verpackt. Fässer mit schwach- und mittelaktiven Abfällen werden in dickwandige Betoncontainer umgeladen.

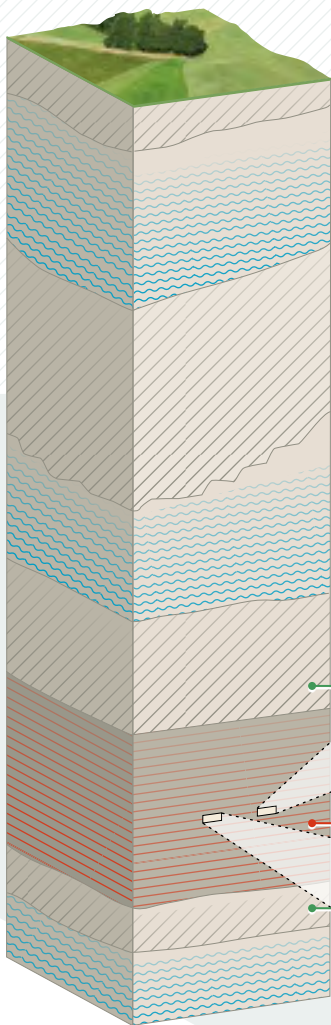


NTB 16-01: Entsorgungsprogramm 2016 der Entsorgungspflichtigen, Nagra, Wettingen.

ENSI (2020): Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management – Seventh National Report of Switzerland, 2020.

Wichtige Begriffe

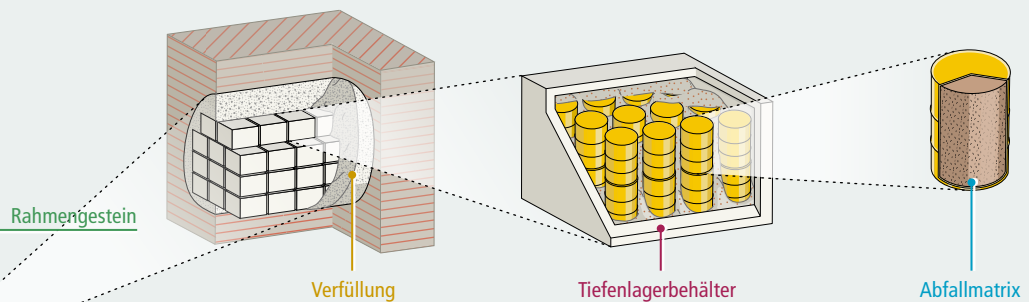
- *Radioaktivität:* Eigenschaft bestimmter Stoffe, sich ohne äussere Einwirkungen umzuwandeln und dabei elektromagnetische Strahlung (γ) oder Teilchen (α , β) auszusenden.
- *Radiotoxizität:* Mass für das strahlenbedingte gesundheitliche Risikopotenzial radioaktiver Stoffe.



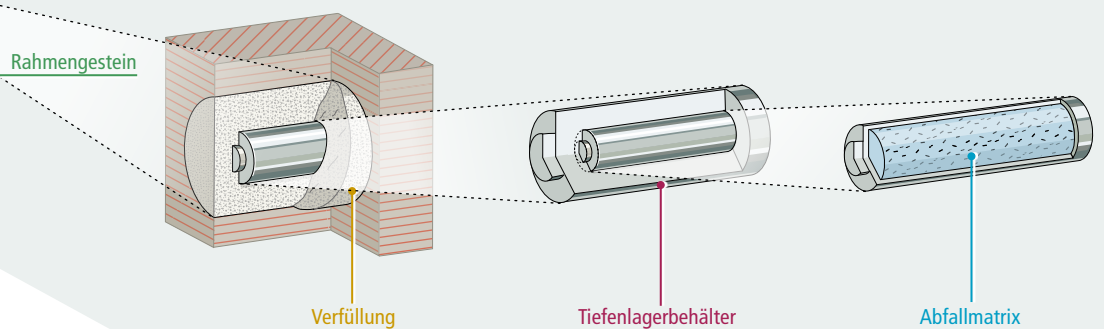
Ineinander verschachtelt

Eine Kombination aus technischen und natürlichen Barrieren soll möglichst viele Radionuklide möglichst lange zurückhalten. Bei den hochaktiven Abfällen (HAA) sind technisch aufwändigere Barrieren nötig als bei den schwach- und mittelaktiven Abfällen (SMA).

Tiefenlager SMA



Tiefenlager HAA



Technische und natürliche Barrieren verzögern in einem Tiefenlager die Freisetzung der Radionuklide und begrenzen deren Transport in das umgebende Gestein. Die Barrieren sorgen für die passive Sicherheit, d. h. das Lager muss langfristig nicht aktiv gewartet und überwacht werden.

DIE TECHNISCHEN BARRIEREN

Abfallmatrix

Hochaktiver Abfall ist in einer festen Matrix eingebunden. Für abgebrannte Brennelemente ist dies der schwer lösliche Brennstoff selbst, während Abfall aus der Wiederaufarbeitung in Glas eingeschmolzen wird. Brennstoff und Glas halten die radioaktiven Stoffe zurück. Sowohl Brennstoff als auch Glas verwittern im Tiefenlager sehr langsam. Auch schwach- und mittelaktive Abfälle werden in einer festen Matrix fixiert. Meist handelt es sich dabei um Glas, Zement oder Bitumen.

Tiefenlagerbehälter

Der Tiefenlagerbehälter umschließt die Abfälle und schützt sie vor einer frühzeitigen Auflösung. Für hochaktive Abfälle wird gemäss dem heutigen Lagerkonzept ein Behälter aus 15 cm dickem Stahl verwendet, der den Einschluss der Abfälle für mehrere tausend Jahre gewährleistet. Innerhalb dieses Zeitraums zerfällt ein grosser Teil der radioaktiven Stoffe. Die bei der Korrosion der Stahlbehälter entstehenden Stoffe können Radionuklide durch chemische Reaktionen binden. Der in Fässern eingelagerte schwach- und mittelaktive Abfall wird für die Tiefenlagerung in dickwandige Betoncontainer verpackt und die verbleibenden Hohlräume werden mit Mörtel vergossen.

Verfüllung

Für die Verfüllung der Lagerstollen des hochaktiven Abfalls wird quellfähiges Tonmaterial (Bentonit) verwendet. Dieser

Barrieren halten radioaktive Stoffe zurück

Weshalb will die Schweiz den radioaktiven Abfall in einem Tongestein entsorgen?

Weltweit verfolgen viele Länder Projekte für den Bau geologischer Tiefenlager. Die Länder wählen dabei unterschiedliche Wirtgesteine wie zum Beispiel Salz (USA), Kristallin (Finnland, Schweden) oder Tongesteine (Schweiz, Belgien, Frankreich). Das «ideale» Wirtgestein gibt es nicht, aber die Geologie eines Landes gibt jeweils die geologischen Rahmenbedingungen vor. So gibt es z. B. in der Schweiz keine geeigneten Salzvorkommen, aber geeignete Tongesteine für die Tiefenlagerung. Die Projekte in den verschiedenen Ländern werden abhängig vom Wirtgestein so ausgelegt, dass sie die vorgegebenen Schutzziele erreichen.

Technisches Forum Sicherheit, Fragen Nr. 25, 30, 82, 130

Zerfallen die Tiefenlagerbehälter nicht früher als die Abfälle?

In den einzulagernden Abfällen sind auch Radionuklide mit deutlich längeren Zerfallszeiten (Halbwertszeiten) enthalten als die zu erwartende Lebensdauer eines Tiefenlagerbehälters. Das Sicherheitskonzept eines geologischen Tiefenlagers beruht deshalb auf dem Mehrfachbarrierenprinzip – einer Abfolge von technischen und natürlichen Barrieren, die die Ausbreitung von Radionukliden verhindern oder auf ein ungefährliches Mass beschränken. Die beschränkte Lebensdauer einer Barriere ist im Lagerkonzept bereits berücksichtigt.

Technisches Forum Sicherheit, Frage Nr. 11

Damit Radionuklide erst nach langer Zeit und in unbedenklicher Menge in den menschlichen Lebensraum vordringen, sind u.a. folgende Eigenschaften für die natürlichen Barrieren oder die Standortgebiete vorteilhaft:

- ausreichende Mächtigkeit und geeignete Tiefenlage von Wirt- und Rahmengesteinen
- kleine Gesteinsporen, durch die sich Wasser nicht oder kaum bewegen kann
- die Fähigkeit des Gesteins, Risse selbst abzudichten
- lang anhaltende geologische Stabilität
- fehlende oder geringe vertikale Störungen (Deformation)
- Fähigkeit, radioaktive Stoffe zu binden

füllt durch seine Quellfähigkeit die Lagerstollen komplett aus und wirkt bei entstehenden Rissen selbstabdichtend. Ausserdem besitzt er eine sehr geringe Wasserdurchlässigkeit. Die meisten Radionuklide haften sehr gut an Bentonit, was den Transport verzögert. Dadurch zerfällt ein grosser Teil der Radionuklide, bevor diese den Bentonit durchquert haben. Bei schwach- und mittelaktivem Abfall werden die Lagerstollen mit Zementmörtel verfüllt. Auch an diesem Material haften die meisten Radionuklide gut.

DIE NATÜRLICHEN BARRIEREN

Wirt- und Rahmengestein

Das **Wirtgestein** nimmt den Lagerbereich des geologischen Tiefenlagers auf und verhindert oder verzögert die Ausbreitung der radioaktiven Stoffe. Ober- und unterhalb des Wirtgesteins können gering durchlässige **Rahmengesteine** liegen. Diese tragen ebenfalls zum Einschluss der radio-

aktiven Abfälle bei. Jene Gesteinsschichten, die zum Einschluss der radioaktiven Stoffe beitragen (Wirtgestein und Rahmengesteine), werden auch als «einschlusswirksamer Gebirgsbereich» bezeichnet. Wie die technischen Barrieren halten auch die natürlichen Barrieren die Radionuklide passiv zurück.

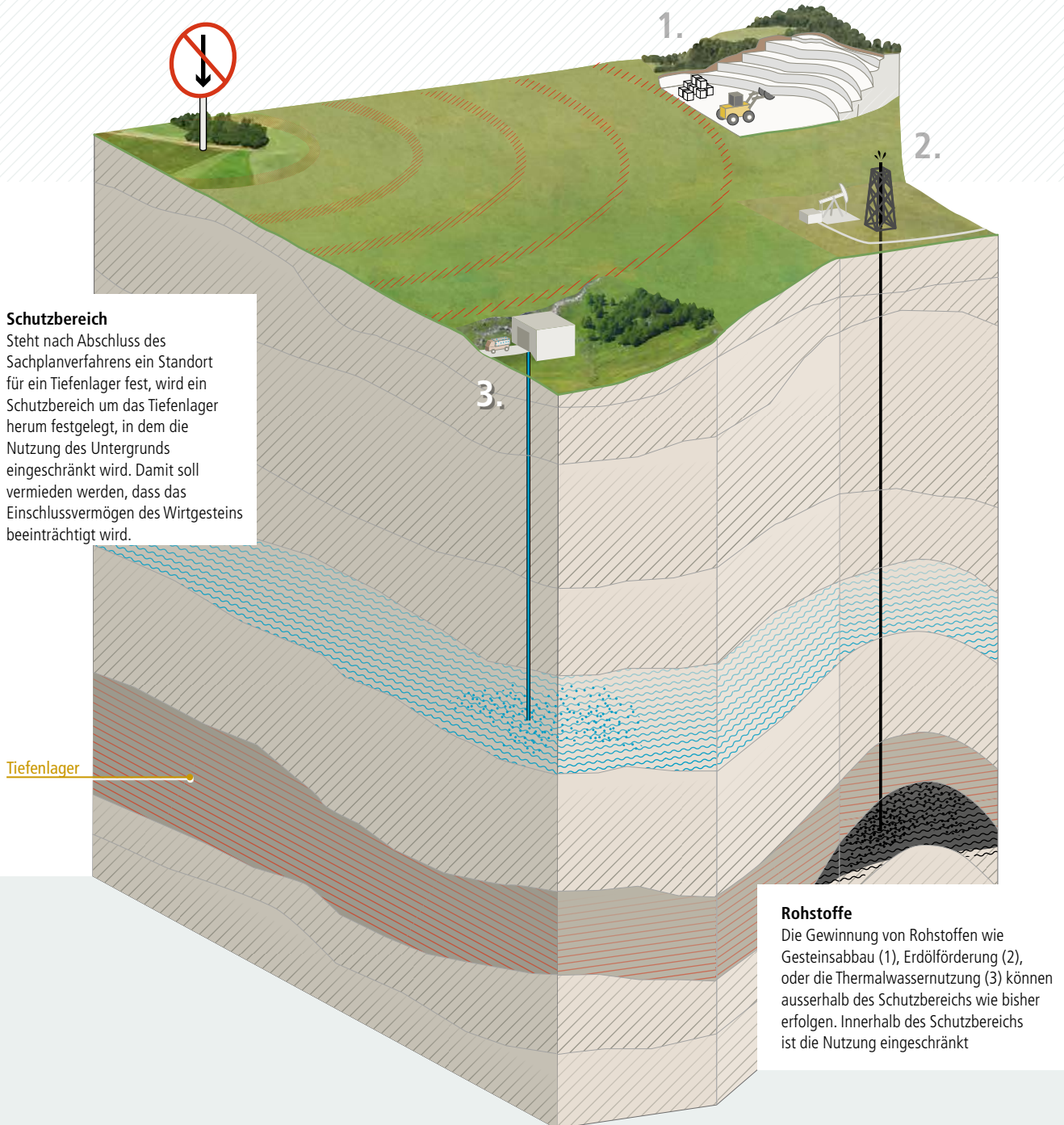


ENSI 33/540: Sicherheitstechnisches Gutachten zum Vorschlag der in Etappe 3 SGT weiter zu untersuchenden geologischen Standortgebiete, 2017.

NTB 14-01: Sicherheitstechnischer Vergleich und Vorschlag der in Etappe 3 weiter zu untersuchenden geologischen Standortgebiete, Nagra, 2014.

HSK 35/99: Gutachten zum Entsorgungsnachweis der Nagra für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive sowie langlebige mittelaktive Abfälle (Projekt Opalinuston), Kap. 4, HSK, 2005.

HSK-AN-5262: Entsorgungsnachweis: Etappe auf einem langen Weg, HSK, 2005.



Mögliche Nutzungskonflikte:

- Abbau von Bausteinen, Salzen und Erzen
- Gewinnung von Kohle, Erdgas und Erdöl
- Förderung von Mineral- und Thermalwasser
- Gewinnung von Erdwärme (z. B. Erdwärmesonden)
- Verpressung von Kohlendioxid in den geologischen Untergrund (sogenannte CO₂-Sequestrierung)

Mit Abstand sicher: Schutzbereich um Tiefenlager

Für die Sicherheit eines geologischen **Tiefenlagers** ist es wichtig, dass das Wirtgestein als geologische Barriere möglichst ungestört erhalten bleibt. Dies kann zu Konflikten mit zukünftigen Nutzungen des geologischen Untergrunds führen. Bereits bei der Standortsuche mit dem «Sachplan geologische Tiefenlager» werden deshalb Gebiete günstiger beurteilt, in denen solche Nutzungskonflikte auch langfristig weniger zu erwarten sind.

Den bereits heute bestehenden Nutzungen des geologischen Untergrunds, wie Mineral- und Thermalwasservorkommen, wurde bereits bei der Standortsuche ausgewichen. Um zukünftige Nutzungskonflikte zu minimieren, ist es für die Langzeitsicherheit zudem wichtig, dass möglichst keine Rohstoffe in der unmittelbaren Umgebung des Tiefenlagerstandorts vorkommen. Das soll verhindern, dass zukünftige Generationen auch nach langen Zeiträumen – nachdem also das Wissen über die geologischen Tiefenlager längst verloren gegangen sein kann – durch die Gewinnung von Rohstoffen gefährdet werden.

Durch den oberflächennahen grossflächigen Abbau von Rohstoffen oder den Bau von Verkehrstunneln kann das tieferliegende Gestein aufgelockert werden. Diese Auflockerung kann die Wasserdurchlässigkeit des Gesteins erhöhen, wodurch sich radioaktive Stoffe besser ausbreiten können. Ein negativer Einfluss auf die Langzeitsicherheit des Tiefenlagers ist die Folge.

Um das Tiefenlager zu schützen, wird zusammen mit der Festlegung des Standorts am Ende des Sachplanverfahrens (Rahmenbewilligung) ein Schutzbereich definiert, in dem die Nutzung des Untergrunds eingeschränkt wird. Der Schutzbereich umfasst alle Teile des Tiefenlagers, einschliesslich der Zugänge von der Oberfläche. In diesem Schutzbereich sind direkte Eingriffe in den tiefen Untergrund nicht erlaubt, da sie geologische Barrieren beeinträchtigen und Transportpfade für radioaktive Stoffe zwischen den verschiedenen geologischen Schichten öffnen könnten. Deshalb wurden bereits zu Beginn von Etappe 2 des Sachplans Eingriffe in den Untergrund der möglichen Standortregionen beschränkt. So sind etwa Bohrungen ab einer bestimmten Tiefe nicht mehr zulässig.



ENSI 33/649: Präzisierungen der sicherheitstechnischen Vorgaben für Etappe 3 des Sachplans geologische Tiefenlager, 2018.

BFE (2011): Sachplan geologische Tiefenlager – Konzeptteil, BFE, (Revision vom 30. November 2011).

Müssen in den vorgeschlagenen Standortgebieten für Tiefenlager schon heute Nutzungsbeschränkungen ausgesprochen werden?

Der Schutz der vorgeschlagenen geologischen Standortgebiete muss gewährleistet werden, bis sie aus der Standortsuche für ein geologisches Tiefenlager ausscheiden. Die Kantone sind für die Raumplanung zuständig und stellen daher entsprechende Bewilligungen zur Nutzung des Untergrunds aus. Um eine Beeinträchtigung der Sicherheit der geologischen Standortgebiete zu vermeiden, wurden die Kantone mit der Festschreibung der Standortgebiete am Ende von Etappe 1 durch den Bundesrat verpflichtet, bei den Bewilligungen entsprechende Schutzbereiche zu berücksichtigen. Das ENSI hat dazu den Kantonen Karten mit Tiefenbeschränkungen für Bohrungen und Aktivitäten im Untergrund zur Verfügung gestellt. Die Tiefenbeschränkungen wurden nach Ende von Etappe 2 angepasst.

Das langfristige Strahlenrisiko eines Tiefenlagers

Ein geologisches Tiefenlager wird über die Jahrtausende betrachtet nicht alle radioaktiven Stoffe zurückhalten können. Denn während die direkte Strahlung der radioaktiven Abfälle bereits durch wenige Meter Gesteinsüberdeckung abgeschirmt wird, können sich Teile der radioaktiven Stoffe derart ausbreiten, dass sie in sehr geringen Mengen auch in den Lebensraum des Menschen gelangen. Eine solche «Freisetzung» ist Teil des Tiefenlagerkonzepts, da ein kompletter Einschluss über lange Zeiträume nicht möglich, aber auch nicht nötig ist. Denn die Gesteinsschichten werden den grössten Teil der Stoffe zurückhalten, während ihre Radioaktivität mit der Zeit abklingt.

Zum Schutz von Mensch und Umwelt darf die durch ein Tiefenlager entstehende zusätzliche Strahlenbelastung an der Erdoberfläche einen bestimmten Wert nicht überschreiten. So hat das ENSI die maximal zulässige Strahlendosis pro Person, die durch radioaktive Stoffe aus einem Tiefenlager verursacht werden darf, auf 0,1 Millisievert pro Jahr festgelegt. Verglichen mit der Strahlenbelastung, der jede Schweizerin und jeder Schweizer jährlich ausgesetzt ist, sind 0,1 Millisievert ein kleiner Wert. Zum Vergleich führen zwei Transatlantikflüge zur gleichen Strahlenbelastung. Die aktuelle durchschnittliche Strahlendosis der Schweizer Bevölkerung beträgt etwa 6 Millisievert pro Jahr (Abbildung rechts).

Wie die bisherigen Berechnungen des ENSI zeigen, wird dieses Schutzkriterium in den vorgeschlagenen Standortgebieten eingehalten. Diese Berechnungen berücksichtigen eine Vielzahl von Fällen, wie etwa eine frühzeitige Leckage aus Tiefenlagerbehältern oder eine durch Erdbeben entstandene Kluft in den Gesteinen um das Tiefenlager.

Wie wirkt sich eine allfällige Strahlenbelastung von 0,1 Millisievert pro Jahr aber auf das Krebsrisiko aus? Die repräsentative Grösse für das Strahlenrisiko ist die effektive Dosis, die in Sievert (Sv) ausgewiesen wird. Dabei wird einerseits die biologische Wirksamkeit der beteiligten Strahlung und andererseits die relative Empfindlichkeit der Organe berücksichtigt. Bei dieser sehr niedrigen Dosis von 0,1 Millisievert ist die berechnete Erhöhung des Krebsrisikos im Vergleich zum spontanen Risiko in der Bevölkerung an Krebs zu erkranken so klein, dass sie nicht nachweisbar ist.



BAG (2018): Bericht zum Kenntnisstand betreffend Risiken ionisierender Strahlung im Niedrigdosisbereich.

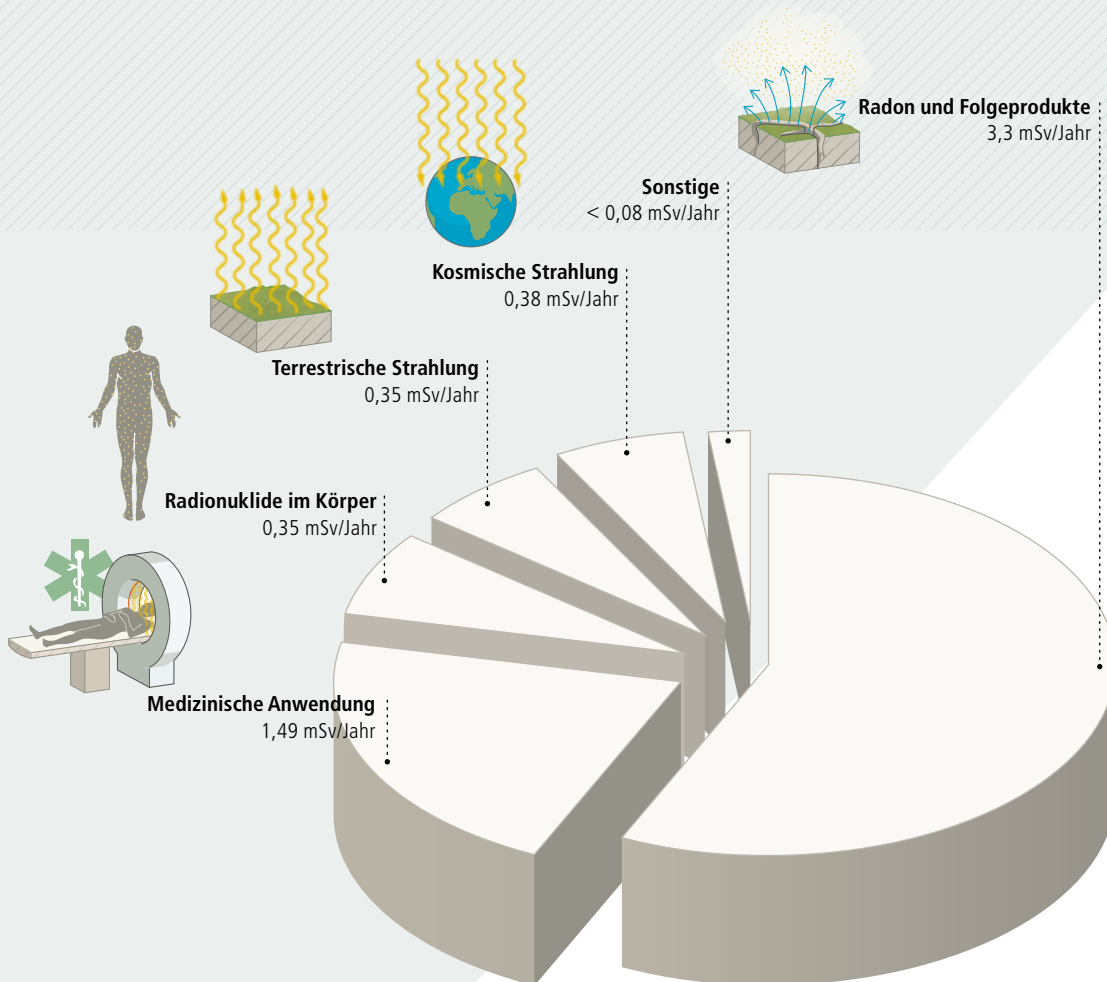
ENSI 33/540: Sicherheitstechnisches Gutachten zum Vorschlag der in Etappe 3 SGT weiter zu untersuchenden geologischen Standortgebiete, 2017.

Canupis (2011): Krebserkrankungen bei Kindern in der Nähe von Kernkraftwerken: Ergebnisse der CANUPIS-Studie, Universität Bern (www.canupis.ch).

United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation UNSCEAR 2012: Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation, Report to the General Assembly with Scientific Annexes, United Nations, New York (2015).

Wie wirkt sich eine allfällige Strahlenbelastung von 0,1 Millisievert pro Jahr aber auf das Krebsrisiko aus?

Die repräsentative Grösse für das Strahlenrisiko ist die effektive Dosis, die in Sievert (Sv) ausgewiesen wird. Dabei wird einerseits die biologische Wirksamkeit der beteiligten Strahlung und andererseits die relative Empfindlichkeit der Organe berücksichtigt. Bei dieser sehr niedrigen Dosis von 0,1 Millisievert ist die berechnete Erhöhung des Krebsrisikos im Vergleich zum spontanen Risiko in der Bevölkerung an Krebs zu erkranken so klein, dass sie nicht nachweisbar ist. *Technisches Forum Sicherheit, Frage Nr. 39*

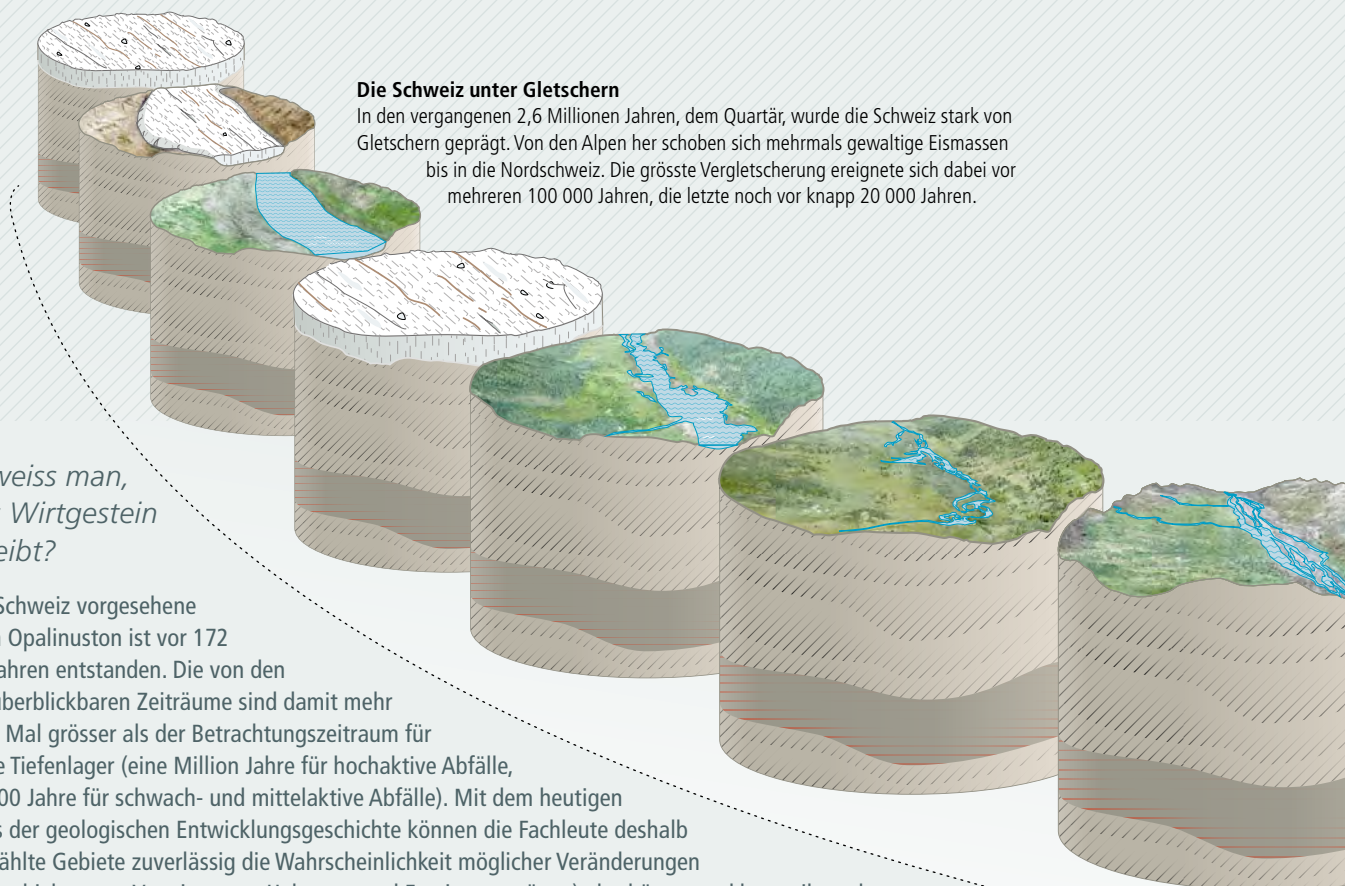


Unter Dauerbeschuss

Die Menschen sind ständig und überall ionisierender Strahlung ausgesetzt. So beträgt die durchschnittliche Jahresdosis der Schweizer Bevölkerung etwa 6 Millisievert (mSv). Den grössten Anteil davon macht das natürlich vorkommende radioaktive Edelgas Radon und seine Folgeprodukte aus (3,3 mSv). 1,49 mSv gehen auf medizinische Anwendungen (Röntgen, Tomographie etc.) zurück. Kosmische und terrestrische Strahlung tragen zusammen mit 0,73 mSv zur Jahresdosis in der Schweiz bei. Natürlich vorkommende Radionuklide im Körper verursachen eine Dosis von 0,35 mSv pro Jahr. Sonstige Strahlenexpositionen durch Forschung, Industrie, Kernanlagen, Medizin, Konsumgüter und Gegenstände des täglichen Lebens sowie künstliche Radioisotope in der Umwelt machen weniger als 0,08 mSv aus. Auch ein Tiefenlager darf nach dem Verschluss den Wert von 0,1 mSv pro Jahr nicht überschreiten.



BAG (2020): Umweltradioaktivität und Strahlendosen in der Schweiz.

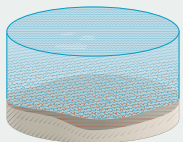


Die Schweiz unter Gletschern

In den vergangenen 2,6 Millionen Jahren, dem Quartär, wurde die Schweiz stark von Gletschern geprägt. Von den Alpen her schoben sich mehrmals gewaltige Eismassen bis in die Nordschweiz. Die grösste Vergletscherung ereignete sich dabei vor mehreren 100 000 Jahren, die letzte noch vor knapp 20 000 Jahren.

Woher weiss man, dass das Wirtgestein stabil bleibt?

Das in der Schweiz vorgesehene Wirtgestein Opalinuston ist vor 172 Millionen Jahren entstanden. Die von den Geologen überblickbaren Zeiträume sind damit mehr als hundert Mal grösser als der Betrachtungszeitraum für geologische Tiefenlager (eine Million Jahre für hochaktive Abfälle, resp. 100 000 Jahre für schwach- und mittelaktive Abfälle). Mit dem heutigen Verständnis der geologischen Entwicklungsgeschichte können die Fachleute deshalb für ausgewählte Gebiete zuverlässig die Wahrscheinlichkeit möglicher Veränderungen (z. B. Erdverschiebungen, Verwitterung, Hebungs- und Erosionsvorgänge) abschätzen und beurteilen, ob langfristig eine Beeinträchtigung des Einschlussvermögens des Wirtgesteins innerhalb des Betrachtungszeitraums zu erwarten ist oder nicht. *Technisches Forum Sicherheit, Fragen Nr. 10, 15, 45, 47, 70, 108, 122 und 137*



Entstehung des Wirtgesteins Opalinuston

Vor 172 Millionen Jahren war die Schweiz von einem tropischen Flachmeer bedeckt. In diesem Meer wurde Ton abgelagert, der sich im Verlauf der Zeit zum heutigen Gestein Opalinuston verfestigte. Der Name des Opalinustons stammt vom Ammonit *Leioceras opalinum*, der als Fossil bis heute erhalten blieb.

Schweiz unter Wasser

Archaeopteryx



200 Millionen Jahre vor heute

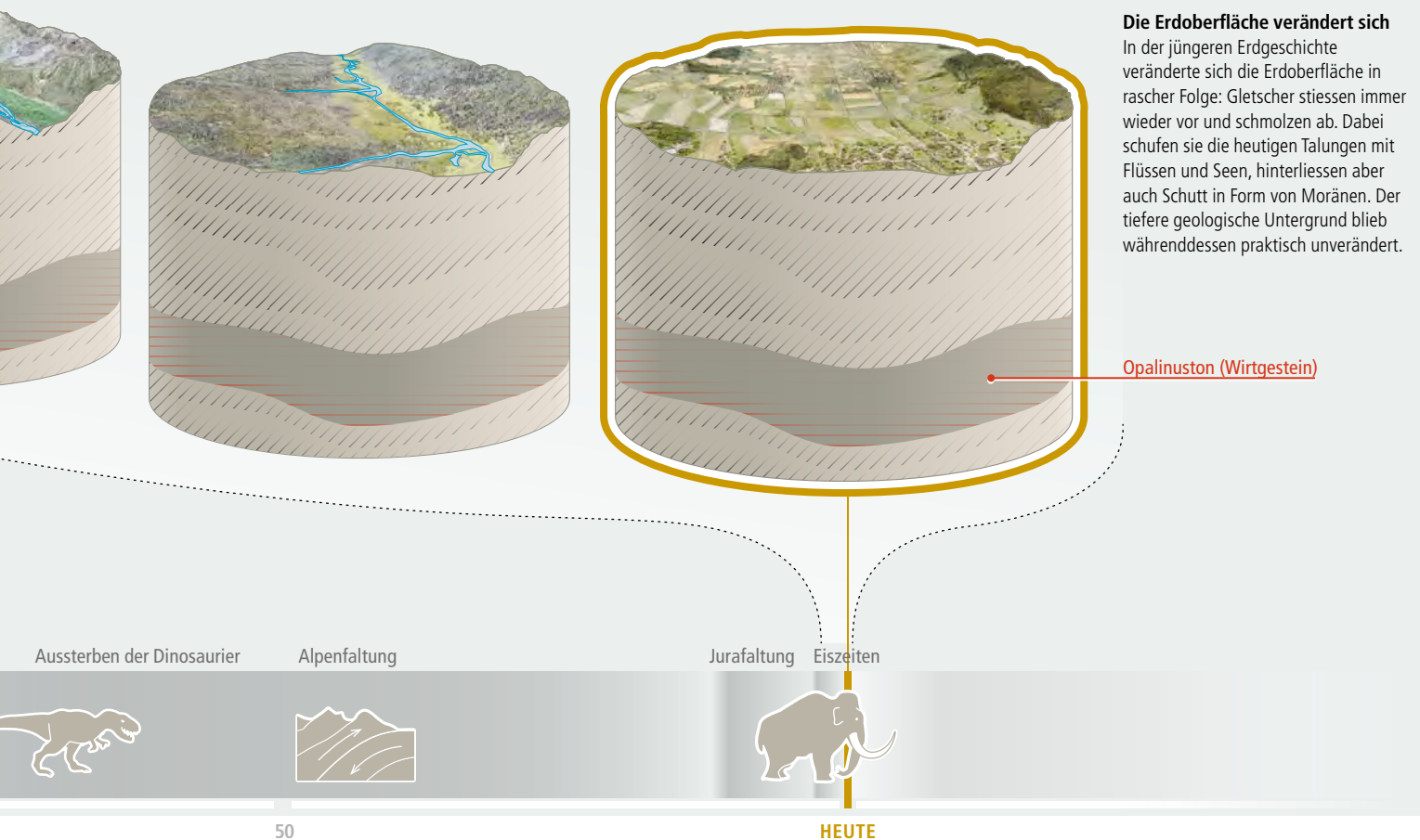
150

100

Die Geologie verändert sich in sehr langen Zeiträumen. Die Erde hat sich vor rund 4600 Millionen Jahren gebildet, die Schichten des Opalinustons wurden vor 172 Millionen Jahren abgelagert. Die Alpenfaltung, bei der ehemalige Tiefseesedimente zum heute mächtigen Gebirge aufgetürmt wurden, erfolgte im Laufe vieler Millionen Jahre, die nur im Zeitraffer zu begreifen sind. An der Erdoberfläche können sich die Verhältnisse durch Klimawechsel sehr schnell ändern. Die ältesten menschlichen Siedlungen in der Schweiz entstanden erst nach der letzten Eiszeit und sind gerade mal einige Tausend Jahre alt.

Weil die radioaktiven Abfälle über sehr lange Zeiträume gesundheitsschädliche Strahlung erzeugen, kann über lange Zeit nur der geologische Untergrund die erforderliche Sicherheit bei der Entsorgung radioaktiver Abfälle gewährleisten. Dies hatte die Expertengruppe Entsorgungskonzepte für radioaktive Abfälle (EKRA) beim Vergleich unterschiedlicher Entsorgungsmöglichkeiten im Auftrag des Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation im Jahr 2000 festgestellt: «Die geologische Endlagerung ist die einzige Methode zur Entsorgung der radioaktiven Abfälle, welche den Anforderungen an die Langzeitsicherheit (bis

Wie lange eine Million Jahre dauert



zu mehr als 100 000 Jahren) entspricht.» Niemand weiss genau, was in der nächsten Million Jahre passieren wird. Aber Geologen können einschätzen, was passieren kann. Das Konzept der geologischen Tiefenlagerung berücksichtigt mögliche künftige Entwicklungen.



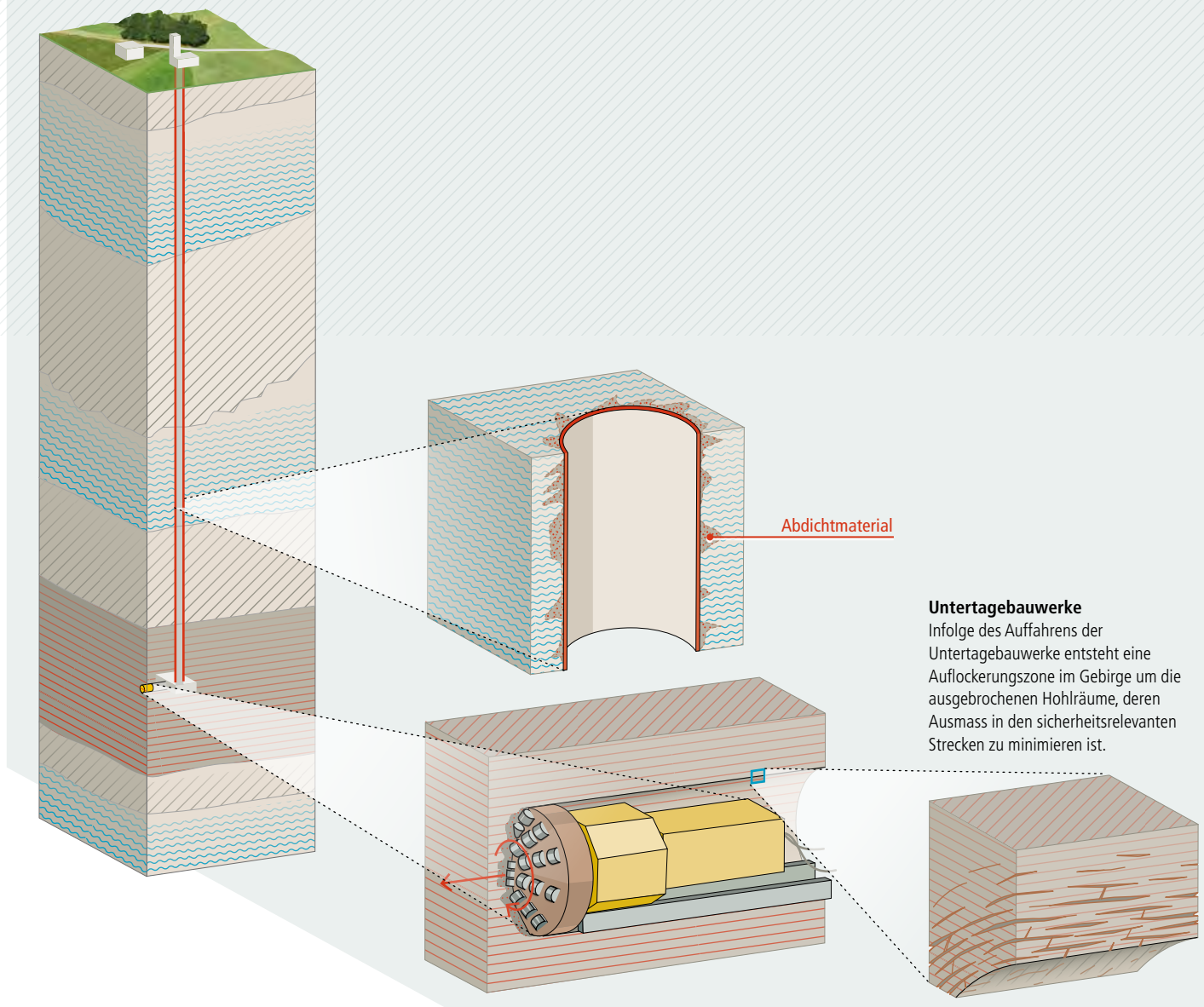
EKRA (2000): Entsorgungskonzepte für radioaktive Abfälle – Schlussbericht, UVEK.

Labhart, T. (2004): Geologie der Schweiz.

ENSI 33/540: Sicherheitstechnisches Gutachten zum Vorschlag der in Etappe 3 SGT weiter zu untersuchenden geologischen Standortgebiete, 2017.

Warum eine Million Jahre?

Das ENSI fordert für ein geologisches Tiefenlager, dass dessen Entwicklung über einen Zeitraum von einer Million Jahre abgeschätzt werden muss. Was ist der Hintergrund dieser Forderung? Die geologische Entwicklung in der Tiefe des Lagers wird hauptsächlich von den Veränderungen in den tektonischen Plattenbewegungen dominiert. Horizontale Plattenbewegungen verursachen vertikale Hebungen oder Senkungen. Eine Prognose über diese Entwicklung ist mit akzeptablen Ungewissheiten über einen Zeitraum von einer Million Jahre machbar. Die Radiotoxizität der eingelagerten radioaktiven Abfälle wird ausserdem weit vor einer Million Jahre wieder auf einem natürlich vorkommenden Strahlenniveau angekommen sein. *Technisches Forum Sicherheit, Fragen Nr. 27, 38, 45, 137*



Untertagebauwerke

Infolge des Auffahrens der Untertagebauwerke entsteht eine Auflockerungszone im Gebirge um die ausgebrochenen Hohlräume, deren Ausmass in den sicherheitsrelevanten Strecken zu minimieren ist.

Wichtige Aspekte für die Beurteilung der bautechnischen Machbarkeit der Untertagebauwerke:

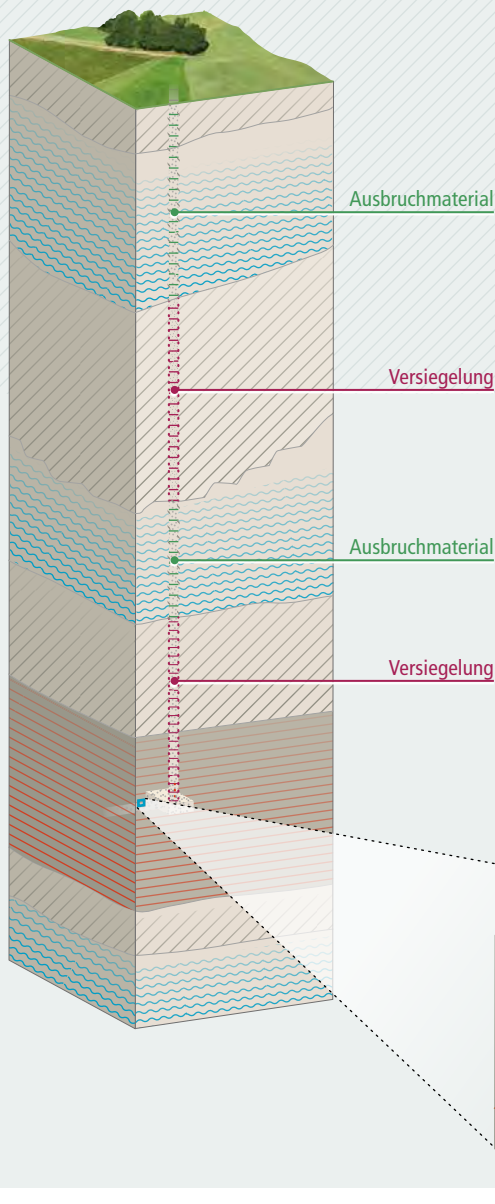
- Machbarkeit mit heute geeigneten Vortriebs- und Ausbaumethoden
- Minimierung der vortriebsbedingten Schädigungen in den Wirt- und Rahmengesteinen
- Verhinderung bzw. Beherrschung von Gefährdungen aus dem Gebirge während Bau und Betrieb
- Hohlraumstabilität und Dauerhaftigkeit der Bauwerke in der geplanten Nutzungsdauer

Bei der Projektierung und beim Bau eines geologischen Tiefenlagers in der Schweiz kann auf die langjährige Erfahrung aus Projekten des Untertagebaus zurückgegriffen werden. Die Gesteins- und Gebirgseigenschaften, mögliche wasserführende Schichten und geologische Störungszonen entlang der zu durchfahrenden Strecken spielen dabei eine wichtige Rolle. Um die Langzeitsicherheit eines Tiefenlagers (Langzeiteinschluss und Rückhaltung der radioaktiven Stoffe) zu gewährleisten, sind zusätzliche Aspekte zu berücksichtigen.

Der Lagerbereich liegt in Tiefen von ca. 500 bis 900 Metern im Wirtgestein Opalinuston, welches als natürliche Barriere

die radioaktiven Stoffe einschliesst und zurückhält. Die Untertagebauwerke auf Lagerebene müssen deshalb so gebaut werden, dass die infolge der Bauarbeiten entstehenden Schädigungen im Opalinuston minimiert werden und die Barrierenwirkung des Wirtgesteins möglichst umfassend erhalten bleibt. Dafür sind geeignete Verfahren für den Vortrieb und Ausbau der Bauwerke erforderlich.

Bei den Zugangsbauwerken, welche als Haupt- bzw. Nebenzugänge oder als Lüftungsbauwerk durch die überlagernden Gesteinsschichten hindurch erstellt werden und in den Opalinuston hinunter reichen, ist die Vermeidung bzw. Beherr-



Hohe Anforderungen an die Bautechnik

Verfüllung und Versiegelung – wesentlich für die Langzeitsicherheit

Die Vortriebsarbeiten für die Erstellung der Zugangsbauwerke durchqueren bis zum Wirtgestein verschiedene geologische Formationen. Für die Gewährleistung der Langzeitsicherheit ist es massgebend, dass die Lagerstollen und -kavernen, aber auch die Zugangsstrecken gut verfüllt und versiegelt werden. An der Schichtgrenze zum einschlusswirksamen Gebirgsbereich werden alle Zugangsstrecken nach ihrer Verfüllung jeweils mit einem speziellen Versiegelungsbauwerk als hydraulische Barrieren versehen. Anhand der Versiegelungen können auch die entstandenen Auflockerungszonen um die ausgebrochenen Hohlräume mit geeigneten Massnahmen verringert werden. Als Versiegelungsmaterial ist beispielsweise Bentonit vorgesehen, der beim Kontakt mit Wasser bzw. Bergfeuchtigkeit quillt und den Zugang abdichtet. Dieser Aufsättigungsprozess dauert vermutlich einige hundert Jahre. *Technisches Forum Sicherheit, Frage Nr. 28*

Verschluss der Lagerkammern

Die Lagerstollen und -kavernen werden im Zuge der Einlagerung der Abfälle verfüllt und mit einem Versiegelungsbauwerk verschlossen.

Quellendes Bentonitgranulat

schung von Wasserzutritten während Bau und Betrieb des Lagers wesentlich. Wasserzutritte in den überlagernden Schichten dürfen die Eigenschaften des Opalinustons und der darüberliegenden Rahmengesteine, die ebenfalls zum Einschluss von radioaktiven Stoffen beitragen, sowie den Betrieb nicht beeinträchtigen. Schädigungen infolge von Bauarbeiten sind ebenfalls zu minimieren. Entsprechende Anforderungen werden an die Projektierung und Bauausführung gestellt.

Die Lagerstollen und -kavernen werden nach der Einlagerung der Abfälle verfüllt und mit einem **Versiegelungsbauwerk** verschlossen. Die dafür verwendeten Materialien und Techniken müssen verschiedene Anforderungen, u. a. an ihre Dichtigkeit, erfüllen. Beim Verschluss des Gesamtlagers werden auch die Zugangsstrecken verfüllt und Versiegelungsbauwerke an der Schichtgrenze zu den

Rahmengesteinen bzw. zum Opalinuston erstellt. Die darüberliegenden Zugangsstrecken werden mit geeignetem Material so verfüllt, dass die ursprüngliche Trennung der verschiedenen Grundwasserstockwerke wiederhergestellt wird.



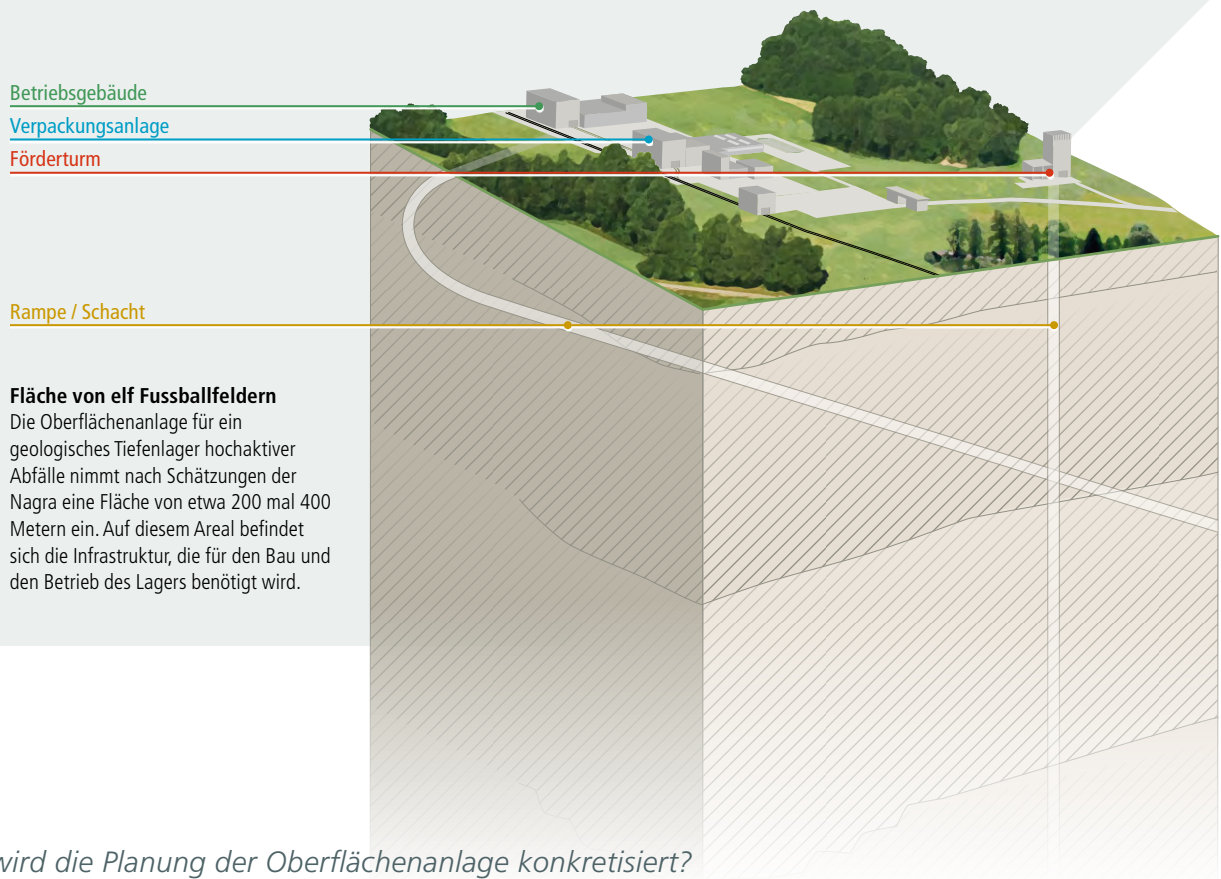
ENSI 33/540: Sicherheitstechnisches Gutachten zum Vorschlag der in Etappe 3 SGT weiter zu untersuchenden geologischen Standortgebiete, 2017.

NTB 16-01: Entsorgungsprogramm 2016 der Entsorgungspflichtigen, Nagra, 2016.

NTB 02-02: Projekt Opalinuston: Konzept für die Anlage und den Betrieb eines geologischen Tiefenlagers, Nagra, 2002.

HSK 35/99: Gutachten zum Entsorgungsnachweis der Nagra (Projekt Opalinuston), HSK, 2005.

Was man vom Tiefenlager an der Oberfläche sieht



Wann wird die Planung der Oberflächenanlage konkretisiert?

Im Rahmen des Sachplanverfahrens werden die Grundzüge der Oberflächenanlage (Lage des Standortareals, Grösse und Lage der wichtigsten Bauten) für die Rahmenbewilligung erarbeitet. Dies geschieht in den Etappen 2 (Lage des Standortareals) und 3 (Grösse und Lage der wichtigsten Bauten) in enger Zusammenarbeit mit den Regionen. Nachdem Ende 2018 die Räume für eine Oberflächenanlage in den drei Standortregionen festgelegt wurden, hat die Nagra im Mai 2019 standortspezifische Vorschläge für die Oberflächeninfrastruktur, inklusive der Oberflächenanlagen und möglicher Nebenzugangsanlagen, für die Diskussion mit den Standortregionen veröffentlicht. Die detaillierte Anordnung und die baureife Ausgestaltung der Bauten erfolgen mit der Ausarbeitung der Unterlagen für die Baubewilligung, die etwa 2040 (SMA-Lager) bzw. 2045 (HAA-Lager) eingereicht werden – also erst viele Jahre nach der erfolgten Standortwahl. *Technisches Forum Sicherheit, Frage Nr. 60*

Ein sichtbares Zeichen für ein geologisches Tiefenlager wird die Oberflächenanlage sein. Sie ist das Tor zum Tiefenlager. Hier beginnen die Zugangsbauwerke und liegen die Betriebsgebäude. Die radioaktiven Abfälle werden in Empfang genommen, kontrolliert und umgepackt. Als Kernanlage untersteht die Oberflächenanlage den strengen Sicherheitsanforderungen des Kernenergiegesetzes.

Während der Bauphase bietet das Gelände Platz für den Bau der Rampen- und Schachtanlagen. Der Platzbedarf für die Oberflächenanlage wird von der Nagra auf etwa 200 mal 400 Meter für ein HAA-Lager und auf etwa 150 mal 350 Meter für ein SMA-Lager geschätzt. Der Platzbedarf eines HAA-Lagers entspricht somit etwa der Fläche von elf Fussballfeldern. Wird eine Schachtanlage gebaut, so wird auch ein **Förderturm** auf dem Gelände oder in der Nähe errichtet. Der genaue Standort der Schachtanlage wird spätestens mit der Baubewilligung festgelegt.

In der Betriebsphase werden die Abfälle angenommen und in einer **Verpackungsanlage** umgeladen. Der Transport in das geologische Tiefenlager kann über **Rampen oder Schächte** mit Fahrzeugen oder Aufzügen erfolgen. Weiter sind **Betriebsgebäude** erforderlich, in denen Büros, Labore und Werkstätten sowie die Untertagebelüftungsanlage untergebracht sind. Für hochaktive Abfälle enthält die Verpackungsanlage eine sogenannte «heisse Zelle», in der die Abfälle aus den Transport- in Tiefenlagerbehälter umgeladen und auf ihre Einlagerung vorbereitet werden. Ähnliche Arbeiten werden heute im Zwischenlager in Würenlingen durchgeführt.

Das Gelände wird über Strassen und wenn möglich über Schienen erschlossen. Auf Strasse und Schiene werden die für den Bau und Betrieb erforderlichen Güter (Kies, Zement), der beim Bau des Tiefenlagers entstehende Ausbruch wie auch die einzulagernden Abfälle und das Verfüllmaterial transportiert.

Die Hauptbelastung für die lokale Bevölkerung wird während der Bauphase erwartet. Dabei kann es zu Lärm und Staubbelastung durch den Transport des ausgebrochenen Gesteins kommen. Der Abtransport des Ausbruchmaterials erfolgt wenn möglich per Bahn. Für die Bauphase rechnet die Nagra mit etwa 2 bis 3 Zügen pro Tag, die das Ausbruchmaterial ab- sowie Kies und Zement antransportieren. Nach der Bauphase wird mit einer geringeren Verkehrsbelastung durch den Transport der radioaktiven Abfälle gerechnet. Die Nagra geht von etwa 5 Zügen pro Jahr (entspricht etwa 20 Schwertransportfahrzeugen pro Jahr) mit hochaktiven Abfällen bzw. 25 Zügen pro Jahr (entspricht etwa 400 Lastwagen pro Jahr) mit schwach- und mittelaktiven Abfällen aus. Dazu kommen zwei bis drei Züge pro Woche mit Betriebsmaterialien (leere Tiefenlagerbehälter, Aushub, Verfüllmaterial etc.).

Das ENSI wird die Schutz- und Sicherheitsmassnahmen der Betreiber begutachten und sich unter anderem durch Inspektionen vergewissern, dass ihre Umsetzung den rechtlichen Anforderungen entsprechen.



NTB 19-08: Vorschläge zur Konkretisierung der Oberflächeninfrastruktur der geologischen Tiefenlager Teil 1: Einführung und Grundlagen Teil 2: Standortspezifische

Vorschläge, Nagra, 2019.

NTB 02-02: Projekt Opalinuston: Konzept für die Anlage und den Betrieb eines geologischen Tiefenlagers, Nagra, 2002.

Gefahren während des Lagerbetriebs

Das Auffahren und Betreiben untertägiger Anlagen ist mit möglichen Gefahren verbunden. Diese sind bei der Planung zu berücksichtigen und, wo sinnvoll und möglich, Massnahmen dagegen vorzusehen. Gefahren werden aufgrund ihres Schadensausmasses und ihrer Eintretenswahrscheinlichkeit bewertet. Hier werden mit dem Wassereintrich und dem Brand zwei mögliche Gefahren näher betrachtet.

Wassereintriche können bei vielen Untertagebauwerken eine Gefährdung darstellen. Deshalb ist diese Gefährdung bereits in der Planungsphase zu berücksichtigen. Das Risiko eines Wassereintrichs mit Überflutung der Anlage muss mit entsprechenden Massnahmen auf eine möglichst geringe Eintretenswahrscheinlichkeit reduziert werden.

Für die Erschliessung des geologischen Tiefenlagers werden Zugangsbauwerke (Tunnel und/oder Schächte) durch unterschiedliche, teilweise wasserführende, geologische Formationen gebaut. Ein Wassereintrich in den Zugangsbauwerken während der Bau- bzw. Betriebsphase mit Auswirkung auf die Lagerebene und unerwünschten Folgen im Wirtgestein (Opalinuston (z. B. Quellerscheinungen und Schlammabildung) muss verhindert bzw. mittels technischer und logistischer Massnahmen kontrolliert werden. Ein Wassereintrich von der Oberfläche her (Unwetter, Hochwasser) muss mit einer geeigneten Standortwahl der Oberflächenbauten sowie ggf. baulichen Massnahmen verhindert werden. Durch eine günstige Wahl der Linienführung der Zugangsbauwerke können die Risiken eines Wassereintrichs aus dem Gebirge reduziert werden. Erprobte Bauhilfsmassnahmen (z. B. temporäre Absenkung

des Grundwasserspiegels, temporäres Einfrieren eines Gebirgsabschnitts, Injektionsmassnahmen beim Vortrieb) können eingesetzt werden. Eine vollständige Abdichtung des Bauwerks wird jedoch kaum erreicht und anfallendes Grundwasser muss möglicherweise in Bau- und Betriebsphase hochgepumpt werden. Der Ausbau der Zugangsbauwerke sowie die Qualität der Baumaterialien und der Bauausführung spielen eine wichtige Rolle.

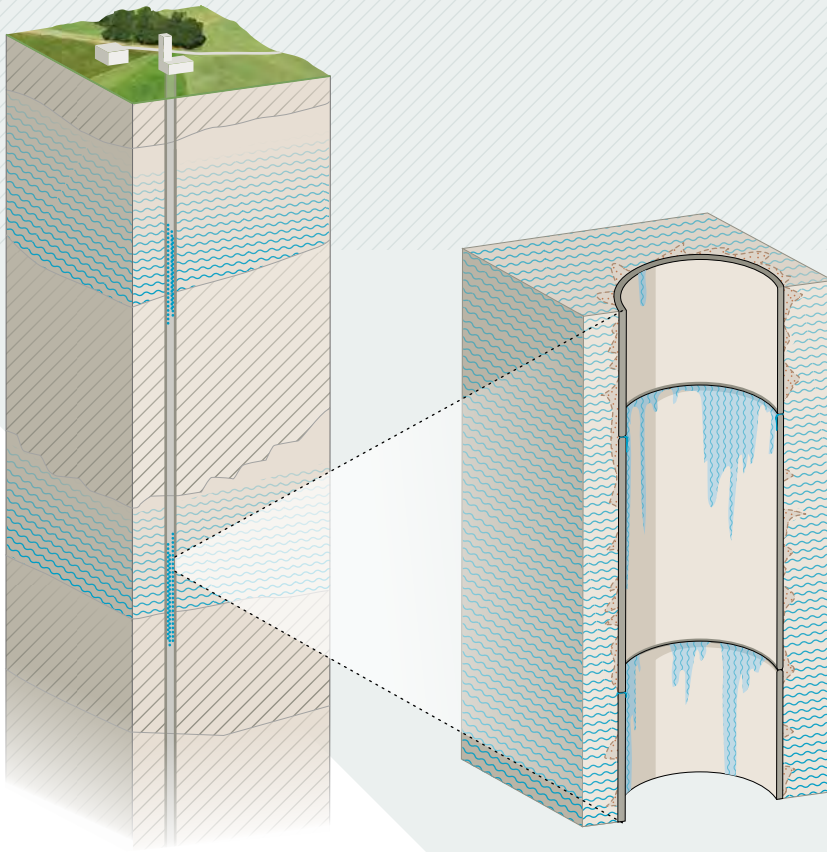
In seiner Richtlinie ENSI-G03 hat das ENSI entsprechende Vorgaben an die untertägigen Anlagen formuliert. So sind die Oberflächen- und die Nebenzugangsanlagen eines Tiefenlagers so auszulegen, dass ein Wassereintrich von der Oberfläche her in ein geologisches Tiefenlager verhindert wird.

Brände sind Störfälle, die gemäss KEV in einem Tiefenlager zu betrachten und entsprechende Schutzmassnahmen zu treffen sind. Brände in den untertägigen Anlagen werden durch Brandschutzmassnahmen verhindert bzw. das Ausmass des entstehenden Schadens verringert. Solche Massnahmen umfassen insbesondere die Reduktion der Brandlast (möglichst wenig brennbare Stoffe), die Unterteilung der untertägigen Anlagen in Brandabschnitte, getrennt durch Brandschutztüren, und das Einrichten von klar signalisierten Fluchtwegen.



Richtlinie ENSI-G03: Geologische Tiefenlager, Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat, 2020.

ENSI 33/170: Anforderungen an die bautechnischen Risikoanalysen und an ergänzende Sicherheitsbetrachtungen für die Zugangsbauwerke in Etappe 2 SGT, 2013.



Wassereinbruch

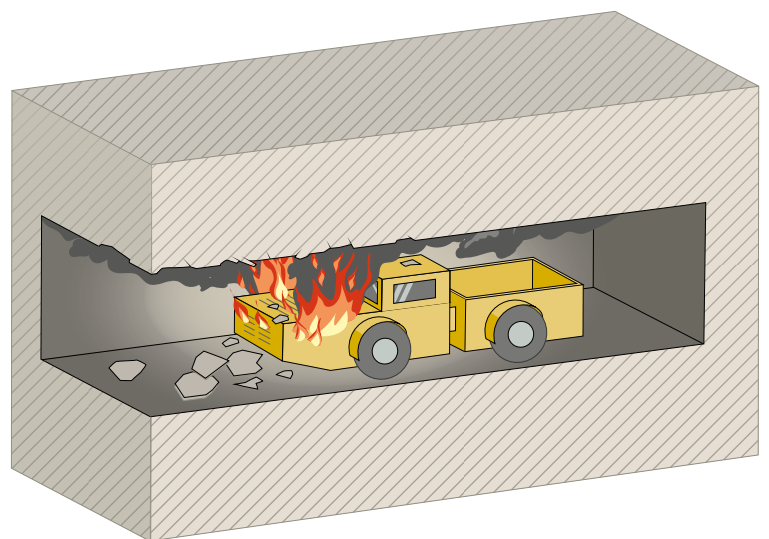
Die Zugangsbauwerke von der Oberfläche in die Tiefe führen durch wasserführende Schichten. Eine mögliche Gefahr während Bau und Betrieb der Anlage sind daher massive Wassereinträge auf Höhe der wasserführenden Schichten und in die Tiefe eindringendes Wasser.

Technisches Forum Sicherheit, Fragen Nr. 84, 90 und 150

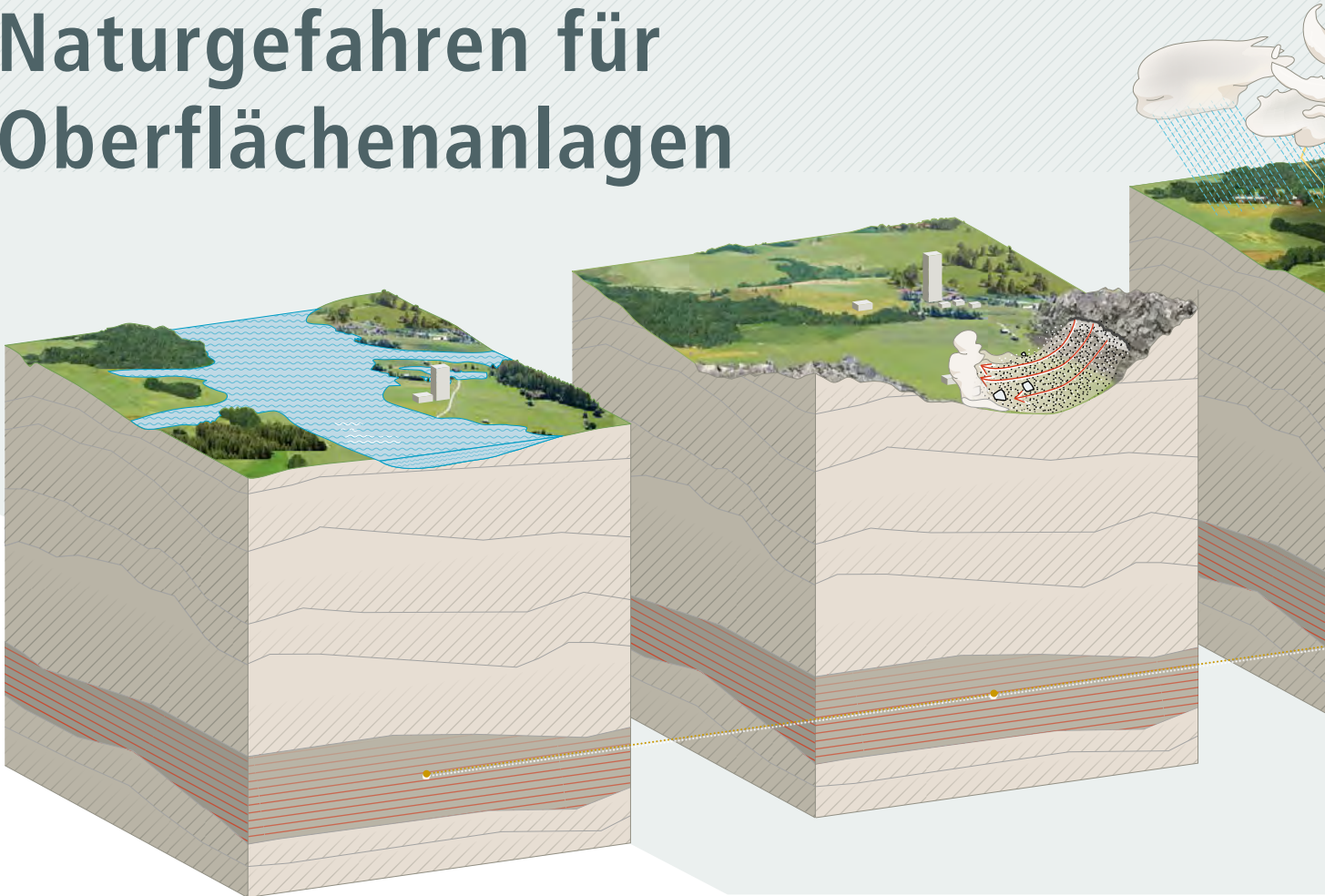
Brand im Tiefenlager

Im Februar 2014 kam es im US-Endlager WIPP zu einem Fahrzeugbrand. Dabei wurde das Stollenfahrzeug stark beschädigt und ein Teil der Salzdecke des Stollens brach ein. Aus solchen Vorkommnissen können Lehren für den zukünftigen Lagerbetrieb gewonnen werden.

Technisches Forum Sicherheit, Fragen Nr. 90, 112, 115 und 129



Naturgefahren für Oberflächenanlagen

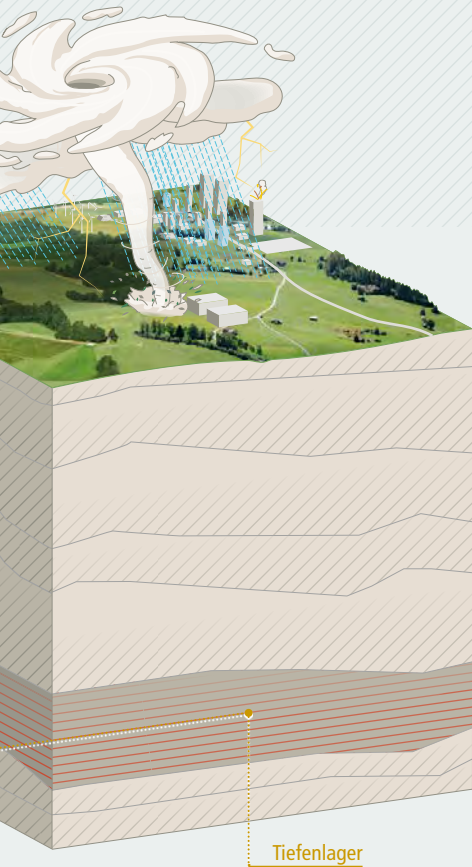


Ausweichen oder standhalten

Im Gegensatz zum geologischen Tiefenlager in mehreren hundert Metern Tiefe sind die Oberflächenanlagen den Naturgefahren direkt ausgesetzt. Naturgefahren an der Erdoberfläche können auf zwei Arten berücksichtigt werden: Entweder weicht man bei der Wahl des Standorts den Gefahren (z. B. Hochwasser, Bergstürze) aus oder die Oberflächenanlagen müssen so gebaut werden, dass sie den bestehenden Gefahren (z. B. Unwettern) standhalten.

Ein **Tiefenlager** besteht aus Bauten an der Oberfläche und Untertagebauten. Die Oberflächenanlagen sind während der Betriebsphase einem breiten Spektrum von Naturgefahren ausgesetzt. Es reicht von Hochwassern über Erdbeben, Bergstürze und Lawinen bis hin zu Stürmen und Erdbeben. Während des Betriebs eines geologischen Tiefenlagers müssen die Oberflächenanlagen deshalb gegen diese möglichen Gefahren geschützt werden.

Viele Naturgefahren wie Hochwasser, Lawinen, Bergstürze oder auch Erdbeben treten nur räumlich begrenzt auf: Überflutungsgebiete sind von der Topographie und den Wasserläufen abhängig, Lawinen und Bergstürze brauchen



Wie geht man mit den Auswirkungen von Naturereignissen wie Erdbeben, Überflutungen oder Erdrutschen auf ein geologisches Tiefenlager um?

Ein geologisches Tiefenlager ist eine Kernanlage. Gemäss der Kernenergieverordnung sind bei Kernanlagen Schutzmassnahmen gegen Störfälle mit Ursprung innerhalb oder ausserhalb der Anlage zu treffen. Störfälle mit Ursprung ausserhalb der Anlage können zum Beispiel durch Erdbeben oder Überflutung ausgelöst werden. Die heute bestehenden Kernanlagen in der Schweiz sind gegen Naturereignisse ausgelegt. Gemäss der Richtlinie ENSI-G03 ist für die Betriebsphase eine umfassende Sicherheitsanalyse durchzuführen, die besagt, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein Ereignis eintreffen kann. Die Nagra hat entsprechende Sicherheitsnachweise zur Beherrschung dieser Auswirkungen auf Oberflächenanlagen und Untertagebauten für die Betriebs- und Nachverschlussphase vorzulegen. Alle Auswirkungen müssen so begrenzt werden, dass die behördlichen Vorgaben eingehalten werden.

Technisches Forum Sicherheit, Fragen Nr. 19, 56, 70, 76, 79, 88, 99 und 127

eine minimale Hangneigung. Solche Gefahrenzonen sind weitgehend bekannt und auf den Naturgefahrenkarten der Kantone eingezeichnet. Bei der Wahl des Standorts für die Oberflächenanlagen kann diesen Zonen daher ausgewichen werden.

Ist ein Ausweichen nicht möglich – beispielsweise bei Wind, Blitzschlag oder Erdbeben – müssen die Oberflächenanlagen gegen die entsprechenden Gefahren mit baulichen Massnahmen geschützt werden. Insbesondere die Zugänge zu den Untertagebauten müssen so ausgelegt sein, dass ein Wassereintrich von der Oberfläche her in das geologische Tiefenlager verhindert wird.

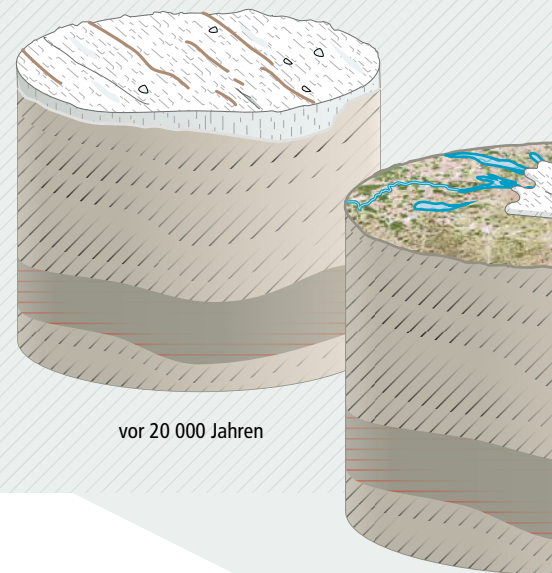
Nach dem Ende des Betriebs werden die Oberflächenanlagen rückgebaut und der Zugang zu den Untertagebauten wird sicher gegen Gefahren an der Oberfläche verschlossen.



Richtlinie ENSI-A05: Probabilistische Sicherheitsanalyse (PSA): Qualität und Umfang, ENSI, 2009.

Richtlinie ENSI-G03: Geologische Tiefenlager, Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat, 2020.

Die Erosion und die Langzeitperspektive



Wind, Wasser und Eis tragen Berge ab und schneiden Täler ein. Geologen bezeichnen die Abtragung der Oberfläche allgemein als Erosion. Die Prozesse der Erosion laufen für gewöhnlich sehr langsam ab, sodass wir sie nur selten wahrnehmen. Doch bei Ereignissen wie Bergstürzen, Murgängen oder Hochwassern wird sichtbar, dass es an der Erdoberfläche sehr dynamisch zugehen kann.

Erosion steht im engen Zusammenhang mit den vertikalen Bewegungen des Untergrundes. Der geologische Untergrund ist in Hebung oder Senkung begriffen. Sich hebende Gebiete werden langfristig erodiert, während sich senkende Gebiete tendenziell aufgefüllt werden. So wird beispielsweise gegenwärtig der gesamte Alpenraum gehoben (bis zu 1,5 Millimeter pro Jahr), während sich das Gebiet des Juras aktuell senkt. In der Nordschweiz liegen die Hebungsbeträge bei wenigen Zehntelmillimetern pro Jahr, was in einer Million Jahren einer Abtragung von wenigen hundert Metern entspricht. Die Erosion erfolgt hauptsächlich über das Gewässernetz, in Eiszeiten auch über die Gletscher.

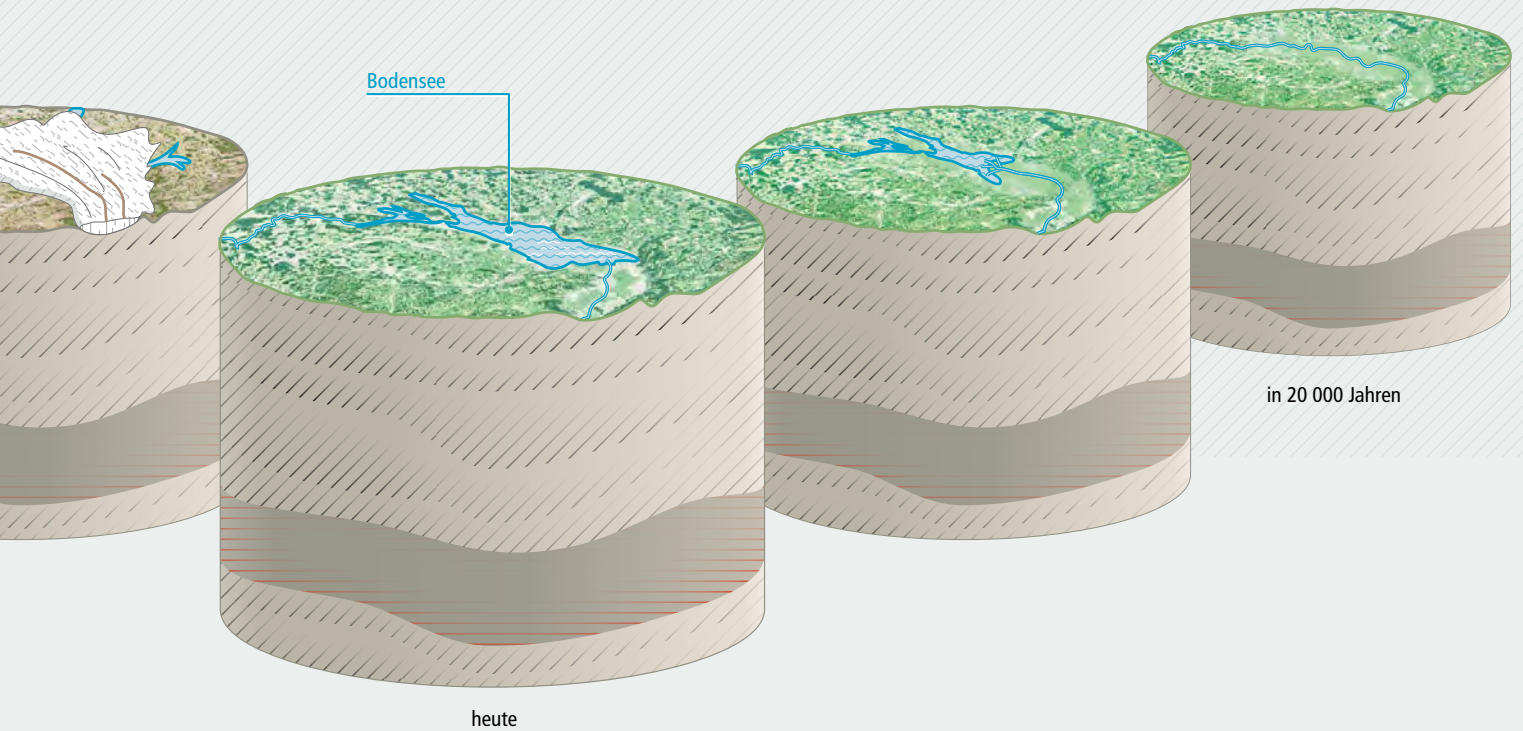
Auch wenn die Erosion in unserer Wahrnehmung sehr langsam verläuft, kann sie doch dazu führen, dass die das Tiefenlager überdeckenden Schichten sukzessive abgetragen werden. Bei stetig anhaltender Erosion würde so die schützende Gesteinshülle dünner, bis das Lager eines Tages freigelegt werden könnte. Ein geologisches Tiefenlager muss

deshalb langfristig vor Erosion geschützt sein und deshalb in Lagertiefen von mehreren hundert Metern unter der Erdoberfläche platziert werden.

Um den Effekten der Erosion im Rahmen der Standortuche für ein geologisches Tiefenlager Rechnung zu tragen, wurde im Sachplan geologische Tiefenlager das sicherheitstechnische Kriterium 2.2 «Erosion» verankert. Mit Hilfe dieses Kriteriums wird jeder Standortvorschlag hinsichtlich der Frage beurteilt, ob durch die Erosion innerhalb des Betrachtungszeitraums die Lagersicherheit beeinträchtigt werden wird. Je nach Standort und Tiefenlage ist ein zukünftiges Tiefenlager der Erosion unterschiedlich ausgesetzt. Haben die während der Eiszeiten aus den Alpen vorstossenden Gletscher den Standort erreicht? Wie haben sich die Flussverläufe im Laufe der Zeit entwickelt? Warum haben sie sich so entwickelt? Könnte sich das Flussnetz über lange Zeit verändern? Wie viel wurde vom Untergrund in der Vergangenheit bereits abgetragen? Wie leicht oder schwer lassen sich die unterschiedlichen Gesteinsarten langfristig abtragen? Diese und weitere Fragen müssen zur Beurteilung des Kriteriums 2.2 «Erosion» belastbar beantwortet werden. Sowohl seitens der Nagra als auch des ENSI werden dazu zahlreiche Forschungsarbeiten durchgeführt.

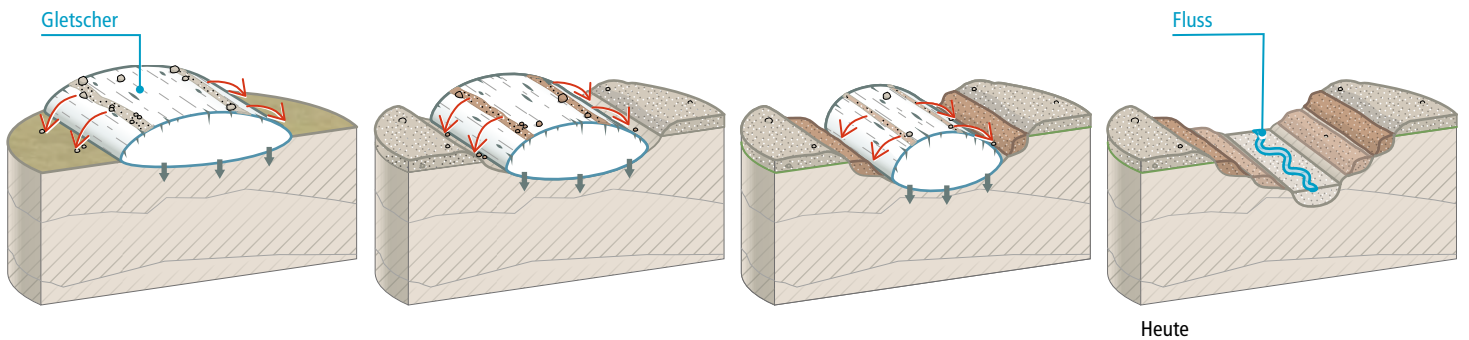


ENSI 33/453: Prüfung Langzeitstabilität und Quartärgeologie. Expertenbericht zuhanden des ENSI im Rahmen der Beurteilung des Vorschlags von mindestens zwei geologischen Standortgebieten pro Lagertyp, Etappe 2, Sachplan geologische Tiefenlager (H.-R. Graf, S. Frank, Dr. von Moos AG), September 2015.



Bildung und Auffüllung von Seen

Teile der Nordschweiz waren letztmalig vor 20'000 Jahren eisbedeckt. Der Vorstoss des Rheingletschers und das spätere Abtauen des Eises führten zur Bildung des Bodensees. Der heutige Bodensee wird jedoch langsam von der Rheinmündung her wieder aufgefüllt und es lässt sich abschätzen, dass der mit dem Rhein hergeführte Schutt der Alpen den See bis in 20'000 Jahren wieder aufgefüllt haben wird.



Talentwicklung

Um die Abtragung von Gesteinsschichten beurteilen zu können ist es wichtig, die Entwicklung von Tälern zu verstehen. An Beispielen aus der Nordschweiz lässt sich zeigen, welche Talformen wann und wie entstanden sind. Täler werden durch Gletscher und Flüsse in mehreren Stufen vertieft, gleichzeitig entstehen während solcher Erosionsphasen jeweils typische Sedimente, die sich zwischen den Tälern oder an Talhängen ablagern. Wenn das Alter dieser Sedimente bekannt ist, kann die Geschwindigkeit der Talvertiefung abgeleitet werden.

Wenn die Erde bebt

Mit enormen Kräften bewegt sich die afrikanische Kontinentalplatte jedes Jahr einige Millimeter gegen Europa. Sichtbares Zeichen dieser Kollision sind z. B. die Alpen. Die Erdbeben in der Schweiz stehen im Zusammenhang mit dieser Kollision: Über lange Zeiträume bauen sich Spannungen in der Erdkruste auf, welche sich in Form von Erdbeben abbauen. Dabei bewegen sich zwei Gesteinspartien plötzlich und ruckartig entlang einer lokalen Schwächezone, einer Störung, aneinander vorbei.

Diesen Spannungsabbau widerspiegelt die Erdbebenverteilung in der Schweiz. So gibt es in den geologisch aktiveren Regionen wie Basel, Wallis, Zentralschweiz, St. Galler Rheintal, Mittelbünden und Engadin mehr Erdbeben als in anderen Teilen des Landes.

Der Sachplan geologische Tiefenlager berücksichtigt bei der Standortsuche die Erdbebengefahr mit den Kriterien der Langzeitstabilität (Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften) und der Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen (Explorierbarkeit, Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderung). So werden bei der Standortwahl Störungszonen grundsätzlich gemieden und Gebiete mit möglichst ruhigen Lagerungsverhältnissen und guter Prognostizierbarkeit bevorzugt.

Aussagen über zukünftige Erdbeben basieren auf den Erfahrungen von instrumentell registrierten, historisch aufgezeichneten oder in Sedimentablagerungen archivierten Erdbebenereignissen sowie auf der Lage von bekannten aktiven und inaktiven Störungen. Die Fachleute gehen davon aus, dass auch künftig der grösste Teil der Seismizität dem bekannten Erdbeben- und Störungsmuster folgt. Trotzdem kann nicht ausgeschlossen werden, dass auch abseits der heutigen Störungszonen über die Dauer von einer Million Jahre ein geologisches Tiefenlager von einem schweren Erdbeben erschüttert wird.

Für diesen sehr unwahrscheinlichen Fall kann durch die Wahl eines geeigneten Wirtgesteins (beispielsweise eines Tongesteins mit Selbstabdichtungseigenschaften) und die Bauweise des Tiefenlagers (die Verwendung von abdichtenden Versiegelungs- und Verfüllmaterialien) das Austreten von radioaktiven Stoffen beschränkt werden. In verfüllten Untertagebauten sind aufgrund der Stützwirkung des Verfüllmaterials nur minimale Schäden zu erwarten.

Oberflächenanlagen eines geologischen Tiefenlagers müssen gemäss Richtlinien des ENSI (u. a. ENSI-G03 und Präzisierungen der sicherheitstechnischen Vorgaben für Etappe 3 des Sachplans geologische Tiefenlager) den Auswirkungen eines Erdbebens während der Betriebsphase standhalten können und sind entsprechend auszulegen. Als Kernanlagen unterstehen sie den gleichen strengen Anforderungen an die Erdbebensicherheit wie Kernkraftwerke: Sie müssen für ein starkes Erdbeben ausgelegt sein, wie es alle 10 000 Jahre einmal vorkommen kann.

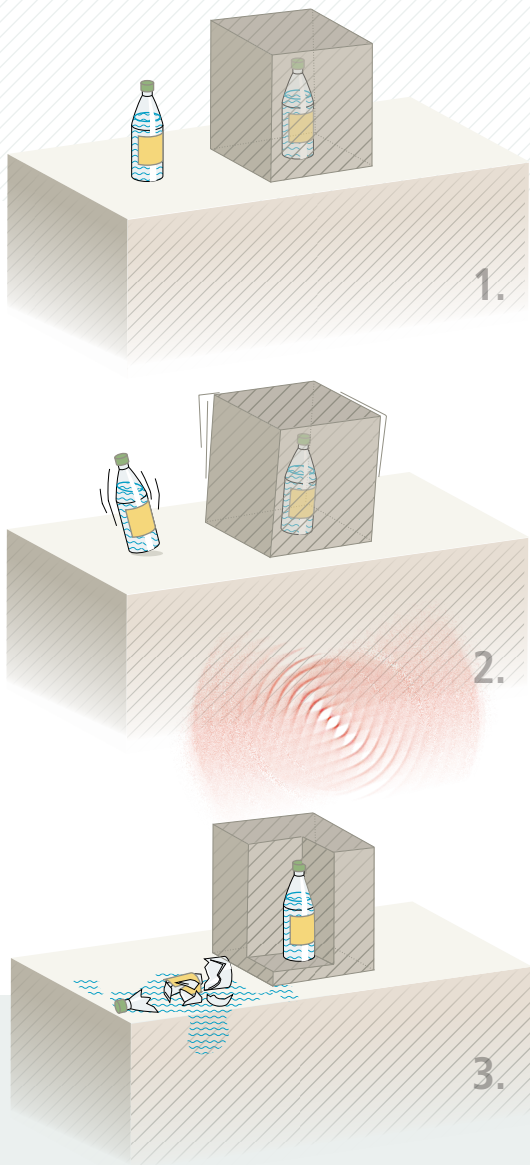


ENSI 33/540: Sicherheitstechnisches Gutachten zum Vorschlag der in Etappe 3 SGT weiter zu untersuchenden geologischen Standortgebiete, 2017.

ENSI 33/539: Qualitative Bewertung der optimierten Lagerperimeter in den geologischen Standortgebieten, 2017.

NTB 14-02: Dossier III Geologische Grundlagen: Dossier III Geologische Langzeitentwicklung, Nagra 2014.

Schweizerischer Erdbebendienst:
www.seismo.ethz.ch



Schüttelexperiment

Zwei Glasflaschen stehen einmal frei und einmal fest umschlossen auf einer Oberfläche. Nach einem Erdbeben in der Tiefe erreichen Erschütterungswellen die Oberfläche. Die freistehende Flasche fällt um und zerbricht. Die fest umschlossene Glasflasche hingegen kann nicht frei schwingen – die Erschütterungswellen durchqueren die Flasche, diese wird nicht beschädigt. Dasselbe Prinzip gilt für die fest im Untergrund eingeschlossenen radioaktiven Abfälle.

Magnitude und Intensität

Für die Auswirkungen eines Erdbebens ist nicht primär die Magnitude eines Erdbebens relevant, sondern die Intensität der Bodenerschütterung am Beobachtungsort. Die Magnitude gibt den Wert für die beim Erdbeben freigesetzte Energie wieder. Die Intensität hingegen ist ein Mass für die möglichen Schäden. Deshalb kann ein schwaches Erdbeben im nahen Untergrund eine grössere Auswirkung an der Oberfläche haben, als ein sehr starkes, weit entferntes Erdbeben.

Wie kann für geologische Tiefenlager sichergestellt werden, dass über extrem lange Zeiträume keine Veränderungen im Bereich von Störungszonen erfolgen?

Die im Gestein vorhandenen Störungszonen wurden in der geologischen Vergangenheit durch Erdbeben in der Erdkruste verursacht. Sie stellen Schwächezonen dar, die bei künftigen grossräumigen geologischen Veränderungen wieder reaktiviert werden können. Über sehr lange Zeiträume können Veränderungen in Störungszonen nicht ausgeschlossen werden. Bei der Einengung und Identifikation geeigneter geologischer Standortgebiete wurden solche Störungszonen deshalb grundsätzlich gemieden, da die Wasserdurchlässigkeit im Einflussbereich der Störungszonen stark erhöht sein kann. Zu solchen Störungszonen ist deshalb ein Sicherheitsabstand einzuhalten. *Frage Nr. 37 Technisches Forum Sicherheit*

Wasser im Untergrund

Wasser kommt in fast allen Gesteinsschichten im Untergrund vor. Auf dem Weg von der Oberfläche zum Tiefenlager werden die Zugangsbauwerke wasserdurchlässige Gesteine, sogenannte **Grundwasserleiter**, durchqueren. Solche Grundwasserleiter sind oberflächennah, das heisst am oberen Ende der Zugangsbauwerke, als Trinkwasserressourcen und in grösserer Tiefe als Thermal- und Mineralwasservorkommen besonders zu schützen. Der Schutz des Grundwassers vor dem Tiefenlager ergibt sich direkt aus dem Schutz des Tiefenlagers vor dem Wasser: Indem Wassereinträge verhindert und der Kontakt zum Grundwasser minimiert werden, wird bestehenden Quellen kein Wasser abgegraben und das Grundwasser nicht verschmutzt. Das Gewässerschutzgesetz ist einzuhalten. Darüber wacht das Bundesamt für Umwelt BAFU.

Kritisch für Wassereinträge ist dabei insbesondere die Bauphase, weil dann der Untergrund erstmals direkt aufgeschlossen wird. Während dieser Zeit sind aber noch keine radioaktiven Abfälle vor Ort. Während der Betriebsphase bleiben die radioaktiven Stoffe in den Tiefenlagerbehältern vollständig eingeschlossen. Langfristig werden alle Lager-

teile verfüllt und versiegelt und somit das Tiefenlager von den Grundwasservorkommen getrennt.

Auch in den Wirt- und Rahmengesteinen um das geologische Tiefenlager gibt es unterirdisches Wasser. Dies ist aber kein Grundwasser, sondern Porenwasser, denn diese Gesteine sind so dicht, dass das in Poren vorkommende Wasser nicht frei fließen kann. Dennoch können sich gelöste Stoffe durch die so genannte Diffusion sehr langsam im Porenwasser bewegen – aber nur wenige Zentimeter in 1000 Jahren – und die radioaktiven Stoffe bis in die Grundwasserleiter und damit in den Lebensraum des Menschen transportieren. Viele im Wasser gelöste radioaktive Stoffe können zudem an Tonmineralen haften bleiben. Die tonreichen **Wirt-** und **Rahmengesteine** können so die Radionuklide zurückhalten. Wenn das Wirtgestein aber durch geologische Vorgänge nach langer Zeit näher zur Oberfläche gehoben, verwittert und aufgelockert wird, verliert es nach und nach seine guten Rückhalteeigenschaften. Deshalb muss es tief genug unter der Erdoberfläche liegen und die tonigen Gesteinsschichten müssen ausreichend dick sein. Die tonreichen Wirt- und Rahmengesteine haben ausserdem

Was man über Wasserbewegungen in der Tiefe weiss

Die geologische Tiefenlagerung radioaktiver Abfälle ist seit Jahrzehnten Gegenstand der internationalen Forschung. Kenntnisse über Tiefengrundwasser werden aus der Exploration von Erdöl und Erdgas schon seit Beginn der Industrialisierung gewonnen. Dazu liefern Thermalwasserbohrungen und -quellen, Geothermiebohrungen und die Untersuchungen der Nagra (z. B. Sondierbohrungen mit Durchlässigkeitstests, seismische Messungen, Analysen von Wasserproben) weitere Erkenntnisse über den Aufbau des Untergrunds und das Grundwasser. Die Nagra hat diese Ergebnisse zum Beispiel in ihrem Bericht NTB 14-02, Dossier V zusammengestellt. Mit diesen Kenntnissen lassen sich die Wasserbewegungen im Untergrund heute verstehen und gut beschreiben. *Technisches Forum Sicherheit, Fragen Nr. 10, 18-21, 25, 34, 49, 53, 61, 84, 86, 92, 102, 120, 124, 127*

die Fähigkeit, undichte Stellen im Laufe der Zeit wieder von selbst zu verschliessen: So wurden im Felslabor Mont Terri in St-Ursanne (JU) und in Tunnelbauwerken nach dem Öffnen von Stollen im Opalinuston einzelne, durch das Porenwasser verursachte feuchte Stellen beobachtet, die sich meist nach einigen Monaten wieder selbst abdichteten.

Der langfristige Schutz des Grundwassers vor den radioaktiven Stoffen wird über die Schutzziele und Schutzkriterien des Kernenergierechts sichergestellt, wonach die Radioaktivität nicht zu einer relevanten Erhöhung der natürlichen Strahlenbelastung von Mensch und Umwelt führen darf. Darüber wacht das ENSI als Leitbehörde, weil geologische Tiefenlager dem Kernenergierecht unterstehen.

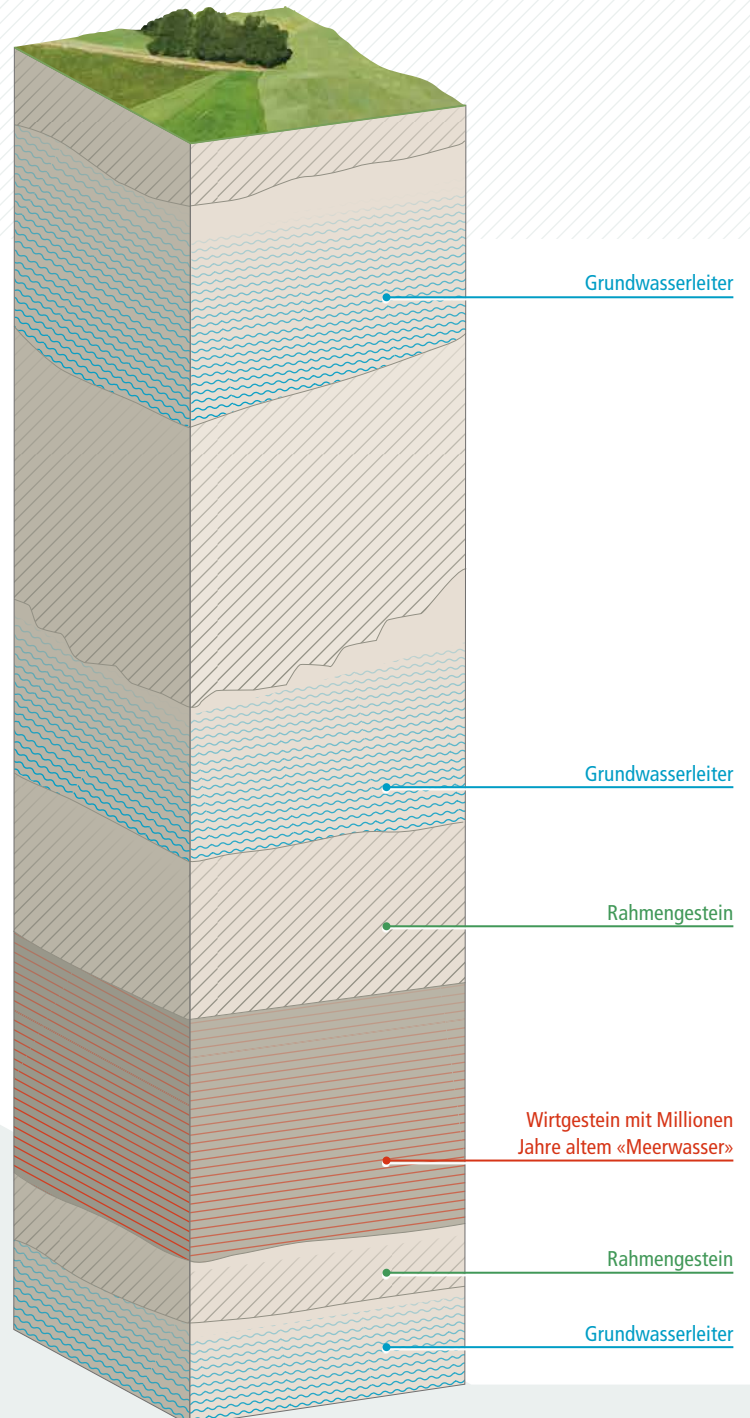


ENSI 33/540: Sicherheitstechnisches Gutachten zum Vorschlag der in Etappe 3 SGT weiter zu untersuchenden geologischen Standortgebiete, 2017.

Richtlinie ENSI-G03: Geologische Tiefenlager, Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat, 2020.

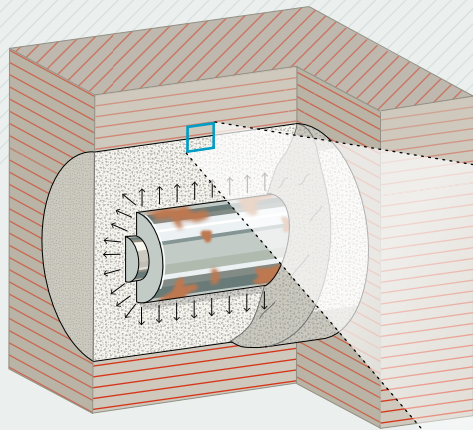
Was man aus Untersuchungen des Wassers in Tongesteinen weiss

- Das Porenwasser ist Millionen Jahre alt und besitzt eine für Meerwasser typische Zusammensetzung.
 - ⇨ Meerwasser blieb daher im Opalinuston erhalten und zeigt, dass das Wasser lange eingeschlossen und nicht Teil eines Wasserkreislaufs im Untergrund war.
- Wasser ober- und unterhalb dichter Tongesteine unterscheidet sich stark in Bezug auf sein Alter, seine chemische Zusammensetzung und die dort herrschenden Druckverhältnisse.
 - ⇨ Dies zeigt, wie dicht die dazwischenliegenden Tongesteine über lange Zeiträume gewesen sind.
- Die natürlichen gelösten Stoffe sind in den dichten Tongesteinen nicht gleichmässig durchmischt.
 - ⇨ Das Porenwasser konnte lange Zeit nicht fließen.



Grundwasserstockwerke

Im Untergrund gibt es wasserdurchlässige Gesteinsschichten, in denen das Wasser fließen kann. Diese Grundwasserleiter dienen als Reservoirs für Trinkwasser, Mineralwasser und Thermalwasser und sind beim Bau eines Tiefenlagers besonders zu schützen. Aber auch in den wasserundurchlässigen Schichten (Wirtgestein und Rahmengestein) kommt Wasser vor, nur kann es dort nicht fließen. Das eingeschlossene Porenwasser ist viele Millionen Jahre alt.

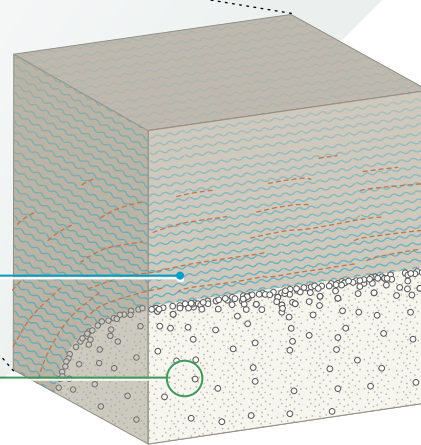


Die Lebensdauer des Tiefenlagerbehälters ist begrenzt

Das Tiefenlagerbehältermaterial (z. B. Stahl) korrodiert langsam im Kontakt mit dem Porenwasser. Dabei entsteht das nicht radioaktive Gas Wasserstoff. Die Tiefenlagerbehälter für hochaktive Abfälle müssen so ausgelegt werden, dass sie trotz der Korrosion 1000 Jahre dicht sind.

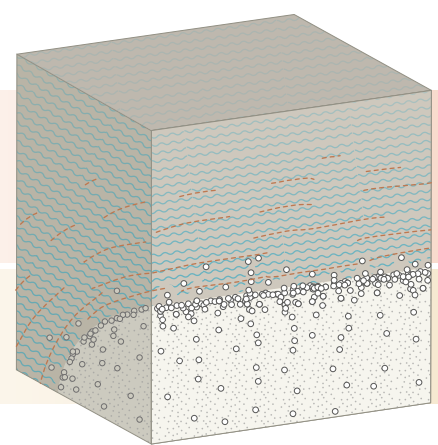
Porenwasser

Gas



Der Gasdruck um den Tiefenlagerbehälter steigt

Das bei der Korrosion des Tiefenlagerbehälters gebildete Gas durchdringt ab einem gewissen Druck den Bentonitmantel und sammelt sich an der Grenze zum Wirtgestein.



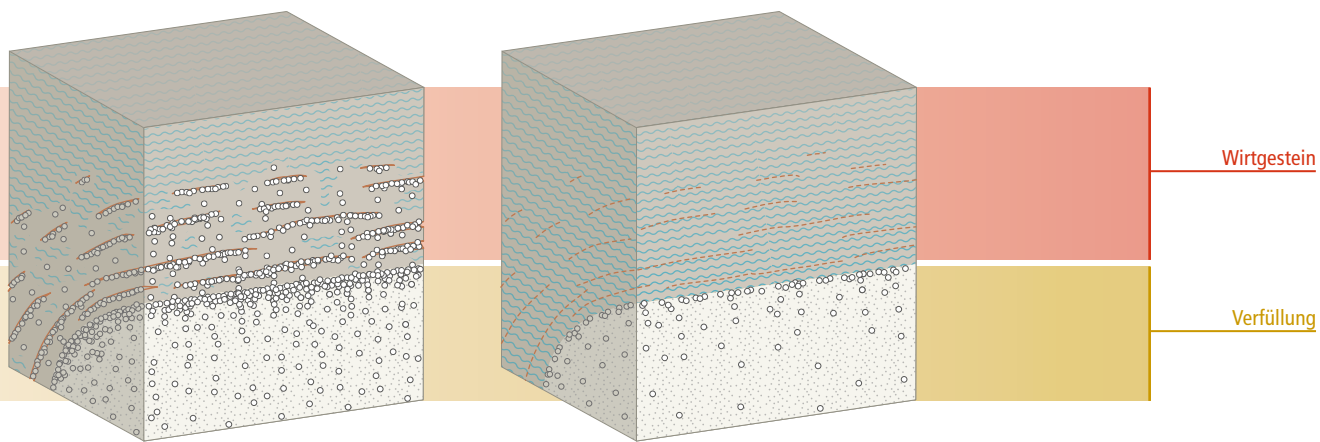
Das Gas löst sich im Porenwasser

Das angesammelte Gas beginnt sich im Porenwasser des Wirtgesteins zu lösen. Durch Diffusion wird das im Porenwasser gelöste Gas weg transportiert.

Aus den eingelagerten Abfällen entstehen durch die Korrosion von Metallen und durch den Abbau organischer Stoffe über die Zeit **Gas**. Mit etwa 95 Prozent nimmt Wasserstoff den grössten Anteil am Gasgemisch ein. Er wird durch die Reaktion von Eisen mit dem **Porenwasser** gebildet und ist nicht radioaktiv. Weiter können Mikroorganismen organische Abfälle (z. B. Harze aus Betriebsabfällen oder Bitumen als Abfallmatrix) abbauen, wobei die Gase Kohlendioxid und Methan entstehen. Da Kohlendioxid durch die Reaktion mit Zement chemisch gebunden wird, ist Methan die zweite wesentliche Komponente des Gasgemisches. Ein sehr kleiner Teil der Gase wie Tritium, Radon und Kohlenstoff-14 ist radioaktiv. Allerdings zerfallen Tritium und Radon relativ rasch. Damit spielt nur das langsam zerfallende Kohlenstoff-14 eine Rolle in der Sicherheitsbetrachtung.

Die in einem HAA- und einem SMA-Lager gebildeten Gas Mengen sind ähnlich. Grössere Unterschiede gibt es dagegen im zeitlichen Verlauf der Gasbildung: Für hochaktiven Abfall geht die Nagra von einer annähernd konstanten Gasbildung über 200 000 Jahre aus, bei schwach- und mittelaktiven Abfällen hingegen findet die Gasbildung vor allem in den ersten 10 000 Jahren statt. Bildet sich Gas, so steigt der Druck innerhalb des Tiefenlagers. Teilweise wird dieser Druckanstieg durch die Verdrängung des Porenwassers sowie durch den Gastransport durch bestehende oder neugebildete Mikrorisse aufgefangen. Das Tiefenlager muss so ausgelegt werden, dass die Gasbildung die Eigenschaften des Wirtgesteins nicht beeinträchtigt, d.h. keine grossen Risse im Gestein verursacht.

Gasbildung und mikrobielle Aktivität



Das Gas verdrängt Porenwasser und entweicht entlang von Mikrorissen

Kann das nachströmende Gas nicht mehr im Porenwasser gelöst werden (Sättigung ist erreicht), wird das Porenwasser durch Gas verdrängt. In einem schmalen Bereich um das Tiefenlager kann es ausserdem zur Öffnung oder zur Neubildung feinsten Mikrorisse kommen, durch die sich das Gas bewegt.

Die Tonminerale quellen, die Mikrorisse verschliessen sich

Wenn die Gasbildung abnimmt, sinkt der Gasdruck und die Poren füllen sich allmählich wieder mit Wasser. Die quellfähigen Tonminerale verschliessen die entstandenen Mikrorisse.

Es gibt mehrere Massnahmen, die Gasbildung zu beherrschen: Vermeidung oder Reduktion gasbildender Materialien sowie eine optimale Lagerauslegung, die dem Gas mehr Raum zur Verfügung stellt. Ausserdem können geeignete Verschlussmaterialien eingesetzt werden, die Gase durchlassen, aber Wasser zurückhalten.

Wie gross ist der maximal zulässige Gasdruck in den Stollen eines Tiefenlagers und wie wird der Druck «reguliert»?

Der maximal zulässige Gasdruck, bei dem die Barriereigenschaften des Wirtgesteins nicht beeinträchtigt werden, hängt von der Tiefenlage, der Festigkeit und der Durchlässigkeit des Wirtgesteins ab und ist damit standortabhängig. Der Druckaufbau in einem Tiefenlager wird begrenzt, indem die Menge der gasproduzierenden Materialien reduziert oder minimiert wird. Eine wichtige Rolle spielt auch die Lagerauslegung, indem der Gasdruck z. B. durch eine entsprechende Gestaltung des Tiefenlagers oder durch die Verwendung von gasdurchlässigen Sand/Bentonit-Gemischen als Verfüllung an ausgewählten Stellen begrenzt wird – ähnlich einem Überdruckventil. Mit Experimenten und Sicherheitsanalysen muss gezeigt werden, dass die Barriereigenschaften des Wirtgesteins nicht beeinträchtigt werden.



ENSI 33/540: Sicherheitstechnisches Gutachten zum Vorschlag der in Etappe 3 SGT weiter zu untersuchenden geologischen Standortgebiete, 2017.

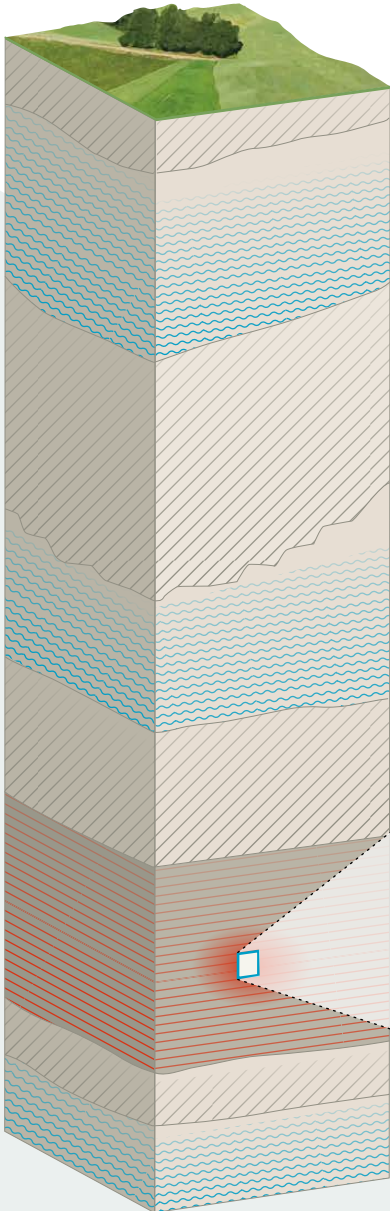
NTB 16-03: Production, consumption and transport of gases in deep geological repositories according to the Swiss disposal concept, Nagra, 2016.

NTB 16-04: Modelling of Gas Generation in Deep Geological Repositories after Closure, Nagra, 2016.

NTB 16-05: An assessment of the possible fate of gas generated in a repository for low- and intermediate-level waste, Nagra, 2016.

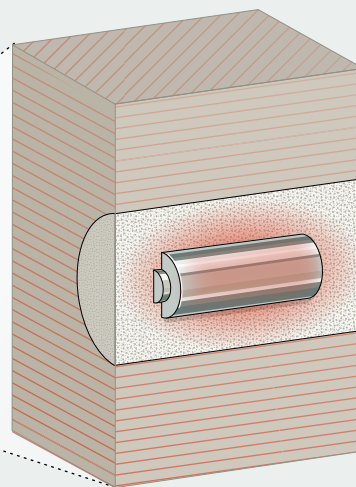
Technisches Forum Sicherheit, Frage Nr. 29

Ein Tiefenlager setzt Wärme frei



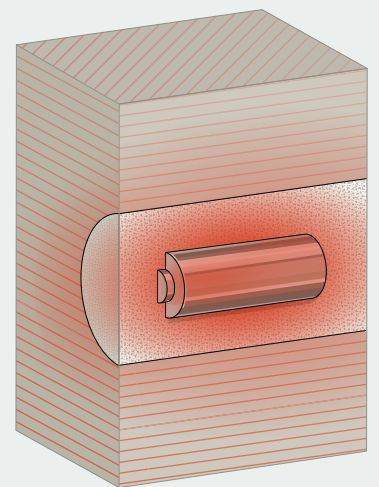
Beim Zerfall wird neben der radioaktiven Strahlung auch Wärmestrahlung abgegeben. Die Wärmeentwicklung ist umso grösser, je mehr radioaktive Stoffe in den Abfällen enthalten sind und je schneller diese zerfallen. Anhand der Wärmeentwicklung wird zwischen hoch-, mittel- und schwachaktiven Abfällen unterschieden. Im Gegensatz zu hochaktiven Abfällen weisen schwach- und mittelaktive Abfälle nur eine geringe Wärmeentwicklung auf. Mit fortschreitendem Zerfall der radioaktiven Stoffe sinkt die Wärmeentwicklung der Abfälle.

Die hochaktiven Abfälle umfassen abgebrannte Brennelemente sowie verglaste Abfälle aus der Wiederaufarbeitung von abgebrannten Brennelementen. Auch wenn diese Abfälle erst nach mehreren Jahrzehnten der Zwischenlagerung und Abkühlung in ein Tiefenlager eingelagert werden, führt die Wärmefreisetzung zu einem Temperaturanstieg im Umfeld der Tiefenlagerbehälter. Die Maximaltemperatur des Tiefenlagerbehälters wird im Verlauf der ersten hundert



Radioaktiver Abfall setzt Wärme frei

Der radioaktive Abfall in den Tiefenlagerbehältern für hochaktive Abfälle gibt Wärme ab. Dadurch erhöht sich die Temperatur des Tiefenlagerbehälters an seiner Oberfläche auf über 100 °C. Die Wärmeabgabe sinkt mit der abklingenden Aktivität der Abfälle über die Zeit.



Die Wärme breitet sich in die Umgebung aus

Der heisse Tiefenlagerbehälter gibt die Wärme an den ihn umhüllenden trockenen Bentonit ab. Dieser leitet die Wärme nur langsam weiter. Die Wärmeleitfähigkeit verbessert sich mit der Zeit durch die langsame Aufsättigung des Bentonits mit Wasser.

Jahre erreicht und die Temperatur sinkt anschliessend wieder. Da sich die Wärme in die Umgebung der Lagerstollen ausbreitet, treten dort über einige tausend Jahre nach der Einlagerung noch erhöhte Temperaturen auf. Durch die erhöhten Temperaturen kann es zu einer Veränderung des tonhaltigen Verfüllmaterials Bentonit sowie des Wirtgesteins Opalinuston kommen, was zu einer eingeschränkten Quelfähigkeit führen kann. Die Quelfähigkeit ist für die Selbstabdichtung des Opalinustons und für den dichten Einschluss des Tiefenlagerbehälters durch den Bentonit wichtig. Die erhöhten Temperaturen führen ausserdem zu einem steigenden Porenwasserdruck im Umfeld des Tiefenlagerbehälters, weil sich das Porenwasser bei höheren Temperaturen ausdehnt. Die erhöhten Temperaturen können darüber hinaus chemische Reaktionen, insbesondere am Materialübergang Zement-Ton, beschleunigen.

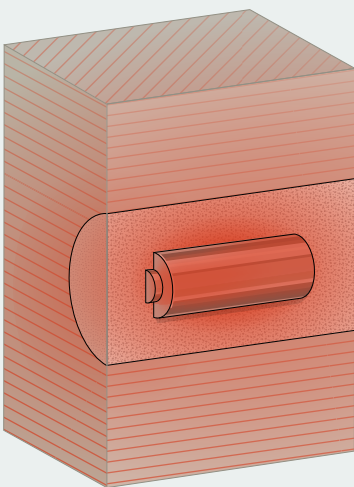
Das Tiefenlager muss deswegen so ausgelegt sein, dass die Temperaturveränderung und die erläuterten möglichen

Folgen die Barriereigenschaften des Wirtgesteins nicht beeinträchtigen. Es gibt mehrere Massnahmen, um die Auswirkungen der Wärmefreisetzung zu beherrschen. So könnten die abgebrannten Brennelemente länger zwischengelagert werden, um deren Wärmeabgabe im Tiefenlager zu reduzieren. So können auch die Tiefenlagerbehälter so beladen werden, dass die resultierende Temperatur im Opalinuston unter 100 °C bleibt. Ausserdem können die Abstände zwischen den eingelagerten Tiefenlagerbehältern in den Lagerstollen oder die Abstände zwischen den Lagerstollen vergrössert werden. Mit diesen Massnahmen werden die möglichen Auswirkungen auf die Eigenschaften des Mehrfachbarrierensystems reduziert.



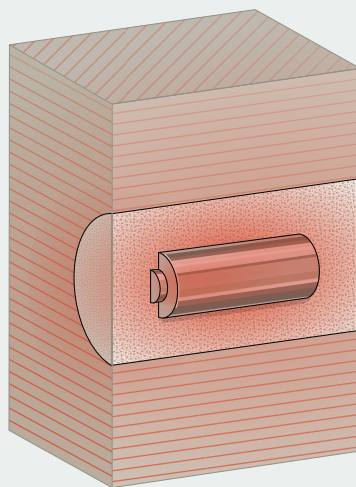
ENSI 33/540: Sicherheitstechnisches Gutachten zum Vorschlag der in Etappe 3 SGT weiter zu untersuchenden geologischen Standortgebiete, 2017.

Emch+Berger (2005): Beurteilung der bautechnischen Machbarkeit eines geologischen Tiefenlagers für BE/HAA und LMA und der durch das Lager induzierten Prozesse. Expertenbericht, HSK 35/97, Emch+Berger AG Ingenieure und Planer.



Die erhöhten Temperaturen führen zu einem steigenden Porenwasserdruck

Die Wärme breitet sich immer weiter in die Umgebung aus. Dadurch dehnt sich das Porenwasser und das Gestein aus und es kommt zu einem Anstieg des Porenwasserdrucks. Die Maximaltemperatur im Opalinuston wird erreicht.



Mit zunehmender Zeit kühlt das Gebirge langsam wieder aus

Nach dem Erreichen der Maximaltemperatur des Tiefenlagerbehälters innerhalb der ersten hundert Jahre sinkt dessen Wärmeabgabe an die Umgebung. Auch die Umgebung erreicht mit zunehmender Entfernung zeitlich verzögert die Maximaltemperatur. Mit anschliessender Abkühlung sinkt auch der Porenwasserdruck wieder.

Sicherheit geht vor

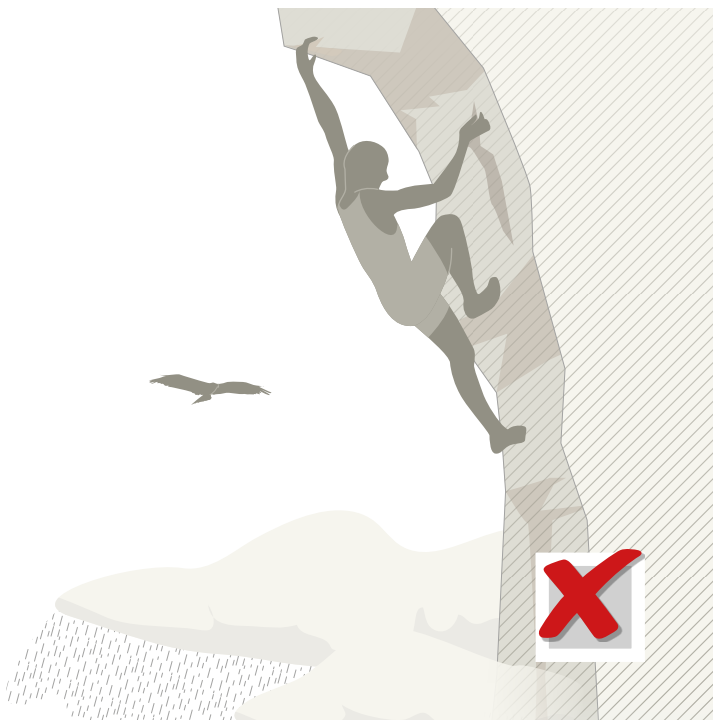
Unterschiedliche Menschen haben unterschiedlich grosse Bedürfnisse nach Sicherheit. Den Gewinn und das Risiko seiner Handlungen beurteilt jeder Mensch für sich: Der eine nimmt für den Genuss einer Zigarette ein erhöhtes Krebsrisiko in Kauf oder fährt Fahrrad ohne Helm, der andere handelt vorsichtig und meidet Risiken. Die Gesellschaft bestimmt in einem demokratischen Prozess ihre Handlungen. Obwohl es nie möglich sein wird, alle Interessen unter einen Hut zu bringen, wird man stets versuchen, das Restrisiko auf ein von der Mehrheit toleriertes Mass zu senken. So wird zum Beispiel die Zigarette mit Filter geraucht und das Passivrauchen durch Regelungen eingeschränkt.

Bei der Standortsuche und der Realisierung eines Tiefenlagers hat die Sicherheit von Mensch und Umwelt oberste Priorität. Gesellschaftliche, politische oder wirtschaftliche Überlegungen werden den sicherheitstechnischen Anforderungen untergeordnet. Für die Sicherheit eines geologischen Tiefenlagers ist der Betreiber verantwortlich. Das ENSI definiert in Richtlinien, wie die geforderte Sicherheit erreicht

werden kann. Es überwacht und überprüft, ob die gesetzlichen Vorschriften eingehalten werden und die Sicherheit gewährleistet ist. Für den Sachplan geologische Tiefenlager wurden sicherheitstechnische Kriterien erarbeitet, an denen die Standortvorschläge gemessen werden. Auch für Etappe 3 des Sachplanverfahrens hat das ENSI im Voraus dargelegt, wie der sicherheitstechnische Vergleich der Standorte durchgeführt werden soll.

Die grundsätzlichen Anforderungen an ein Tiefenlager sind im Kernenergiegesetz und in der Kernenergieverordnung vorgegeben. Demnach müssen für das Tiefenlager hintereinander gestaffelte, natürliche und technische Barrieren verwendet werden, um den notwendigen Schutz passiv zu bewirken. Denn künftige Generationen sollen sich nicht mehr um das Tiefenlager kümmern müssen.

Das Kernenergiegesetz sieht vor, dass das Tiefenlager vor schädlichen Einwirkungen geschützt werden muss, denn auch so werden Mensch und Umwelt vor schädlichen



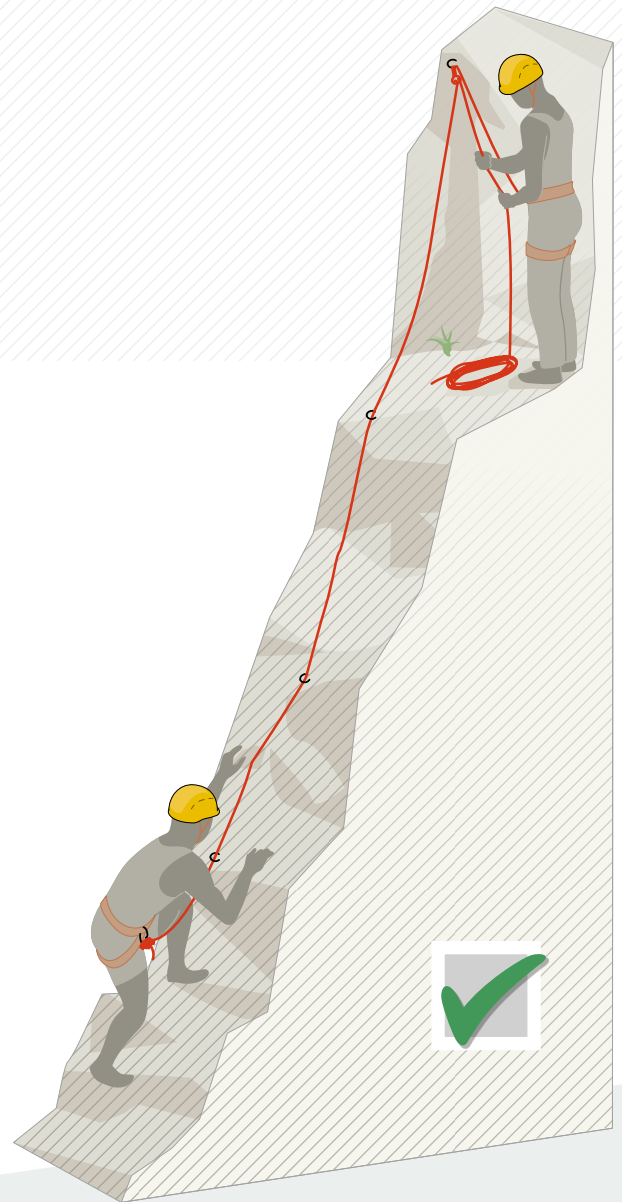
Auswirkungen eines Tiefenlagers geschützt. Sicherheit ist ein Prozess, bei dem laufend neue Erkenntnisse aus Wissenschaft und Technik berücksichtigt werden. Der in viele Zwischenschritte aufgeteilte lange Weg bei der Realisierung eines Tiefenlagers setzt dies durch wiederholte Prüfung der Sicherheit bei der Rahmen-, Bau-, Betriebsbewilligung um.



ENSI 33/649: Präzisierungen der sicherheitstechnischen Vorgaben für Etappe 3 des Sachplans geologische Tiefenlager, 2018.

ENSI 33/540: Sicherheitstechnisches Gutachten zum Vorschlag der in Etappe 3 SGT weiter zu untersuchenden geologischen Standortgebiete, 2017.

BFE (2011): Sachplan geologische Tiefenlager – Konzeptteil, BFE, (Revision vom 30. November 2011).



Wie wird die Sicherheit der Oberflächenanlage geprüft?

Die Identifizierung von Standortgebieten für die Tiefenlagerung erfolgte in den Etappen 1 und 2 ausschliesslich aufgrund sicherheitstechnischer und geologischer Kriterien zum Untergrund und Fokus auf der Langzeitstabilität des geologischen Untergrunds.

Die Sicherheit der Oberflächenanlagen wird vom ENSI in Etappe 3 bei der Erstellung des Gutachtens zu den eingereichten Rahmenbewilligungsgesuchen in Etappe 3 geprüft, wenn die Nagra konkrete Projekte zu den Oberflächenanlagen einreichen wird.

Technisches Forum Sicherheit, Frage Nr. 9

ENSI 33/879

ENSI, Industriestrasse 19, CH-5201 Brugg, Telefon +41 56 460 84 00, info@ensi.ch, www.ensi.ch