

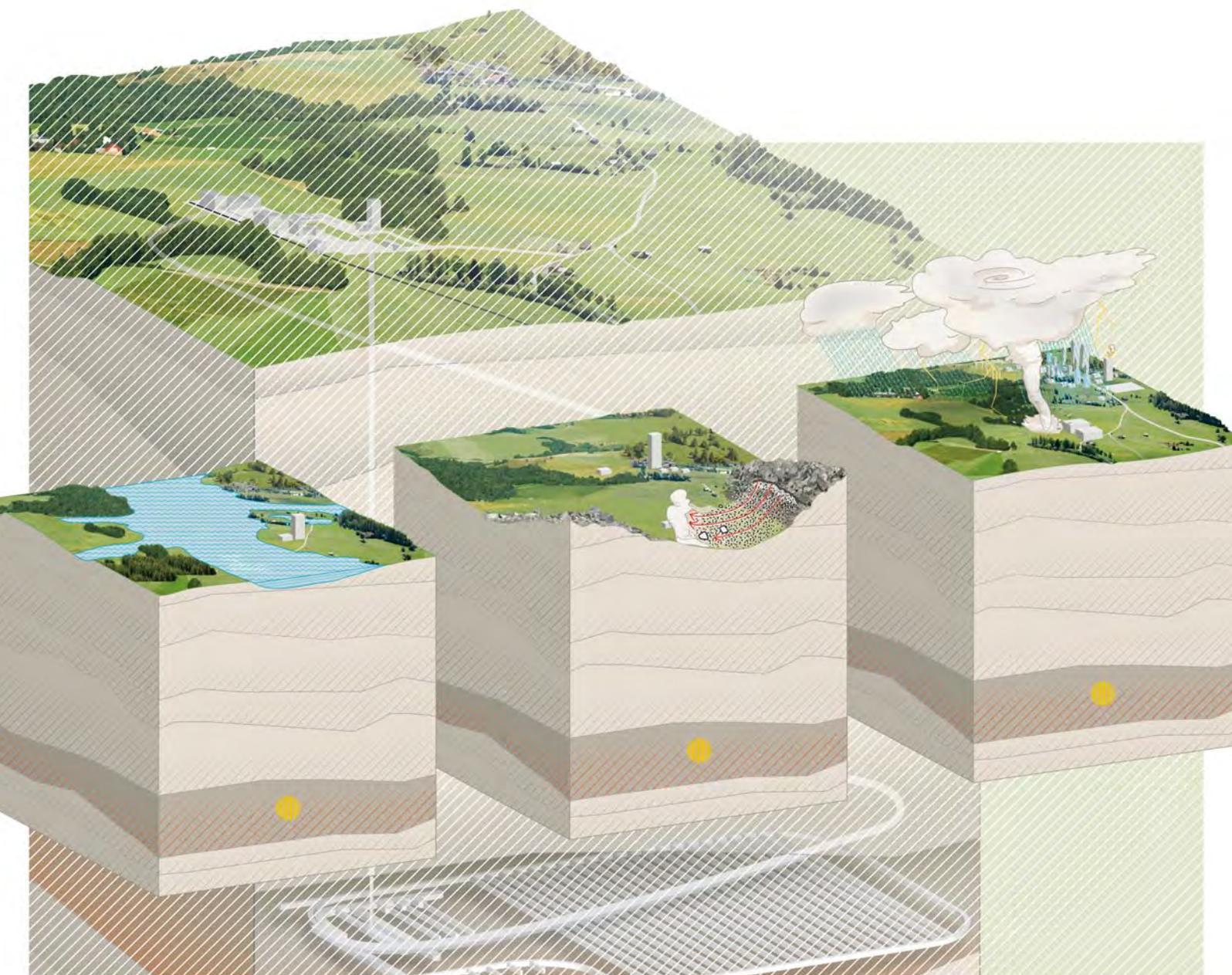


Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

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

Vorwort	3
Langer Weg bis zum Tiefenlager	4
Woher radioaktive Abfälle stammen	6
Wie lange eine Million Jahre dauert	8
Zwei Lager für die radioaktiven Abfälle	10
So sucht die Schweiz ein Lager: Sachplan geologische Tiefenlager	12
Der Untergrund wird durchleuchtet	14
Was man vom Tiefenlager an der Oberfläche sieht	16
Hohe Anforderungen an die Bautechnik	18
Barrieren halten radioaktive Stoffe zurück	20
Wasser im Untergrund	22
Gasbildung und die Folgen	24
Naturgefahren für Oberflächenanlagen	26
Wenn die Erde bebt	28
Mit Abstand sicher: Schutzbereich um Tiefenlager	30
Das langfristige Strahlenrisiko eines Tiefenlagers	32
Sicherheit geht vor	34

IMPRESSUM

Informationsbroschüre — Geologische Tiefenlager

© 2012 Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI

Herausgeber

Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI

Industriestrasse 19, CH-5200 Brugg

Telefon: +41(0)56 460 84 00

Fax: +41(0)56 460 84 99

E-Mail: info@ensi.ch

Internet: www.ensi.ch

Grafik und Illustration

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

Seiten 8/9: Landschaften unter Verwendung von Illustrationen des Mammutmuseums Niederweningen.

Vorwort

Seit mehr als 40 Jahren wird in der Schweiz in Kernkraftwerken Strom produziert. Bis 1984 gingen insgesamt fünf Kernkraftwerke ans Netz. Aber auch in anderen Bereichen wurden vermehrt radioaktive Stoffe eingesetzt (in Medizin, Industrie und Forschung). Entsprechend fallen seit über vier Jahrzehnten radioaktive Abfälle an. Für deren sichere Entsorgung sind die Verursacher per Gesetz verpflichtet. Der international anerkannt sicherste Weg zur Entsorgung radioaktiver Abfälle ist die geologische Tiefenlagerung. Deshalb schreibt das Gesetz vor, dass die radioaktiven Abfälle in geologischen Tiefenlagern zu entsorgen sind. Die 1972 gegründete Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra) hat den Auftrag, entsprechende Lösungen zu erarbeiten. Das Eidgenössische Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI prüft die Vorschläge der Nagra.

Bundesrat und Parlament haben nach dem Reaktorunglück in Fukushima beschlossen, die bestehenden Kernkraftwerke nicht mehr zu ersetzen und aus der Kernenergie auszusteigen. Unabhängig vom Ausstiegsbeschluss müssen die radioaktiven Abfälle so entsorgt werden, dass in Zukunft Mensch und Umwelt nicht gefährdet werden. Es liegt in der Verantwortung der Generationen, die von der Kernenergie profitiert haben, eine über Jahrtausende sichere Lösung zur Entsorgung der Abfälle zu erarbeiten.

Die derzeit laufende Suche nach einem geeigneten Standort für ein Tiefenlager erfolgt unter Einbezug der Bevölkerung. Um Fragen zu Geologie und Sicherheit zu beantworten, wurde das «Technische Forum Sicherheit» gegründet (www.technischesforum.ch). Die Bevölkerung, Gemeinden, Kantone, Organisationen aber auch Nachbarstaaten können dem Technischen Forum Fragen im Zusammenhang mit der Tiefenlagerung radioaktiver Abfälle einreichen.

Geleitet wird das Technische Forum vom ENSI. Das Technische Forum Sicherheit besteht aus Fachpersonen der verfahrensleitenden Behörde (Bundesamt für Energie), der überprüfenden bzw. unterstützenden Behörden (ENSI, swisstopo), der Kommission für nukleare Sicherheit, der Expertengruppe Geologische Tiefenlagerung, der Nagra, der Kantone sowie Vertretungen aus Standortregionen und Nachbarstaaten. Dadurch können verschiedene Meinungen in die Diskussion einfließen.

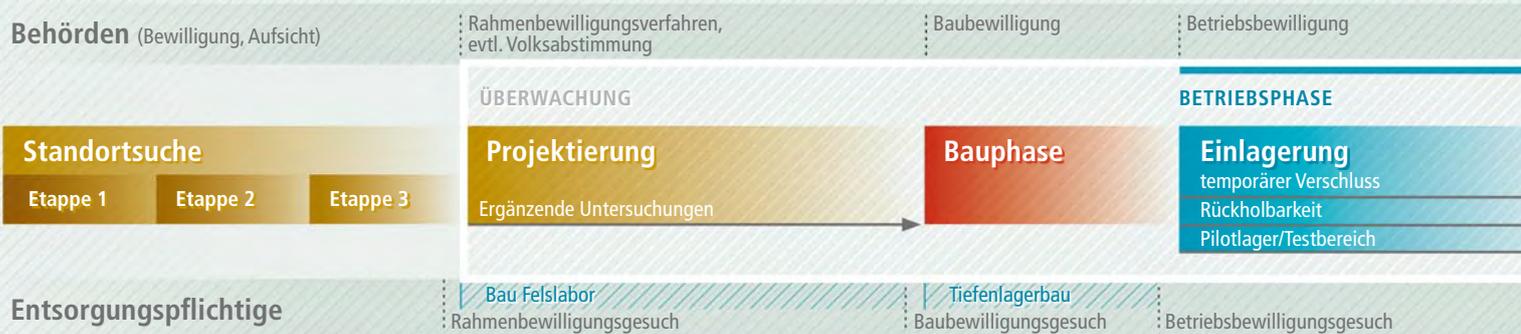
Einzelne Fragen aus dem Forum wurden für diese Broschüre ausgewählt, um die geologische Tiefenlagerung zu erläutern. Sie finden die Fragen jeweils kursiv gedruckt auf den folgenden Doppelseiten.

NOCH FRAGEN? – BITTE UMBLÄTTERN!



Dr. Felix Altorfer

Mitglied ENSI-Geschäftsleitung,
Leiter Technisches Forum Sicherheit



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. Bis ihre Radioaktivität abgeklungen ist, werden lange Zeiträume vergehen. Als nutzniessende Generation sind wir bereits heute 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.

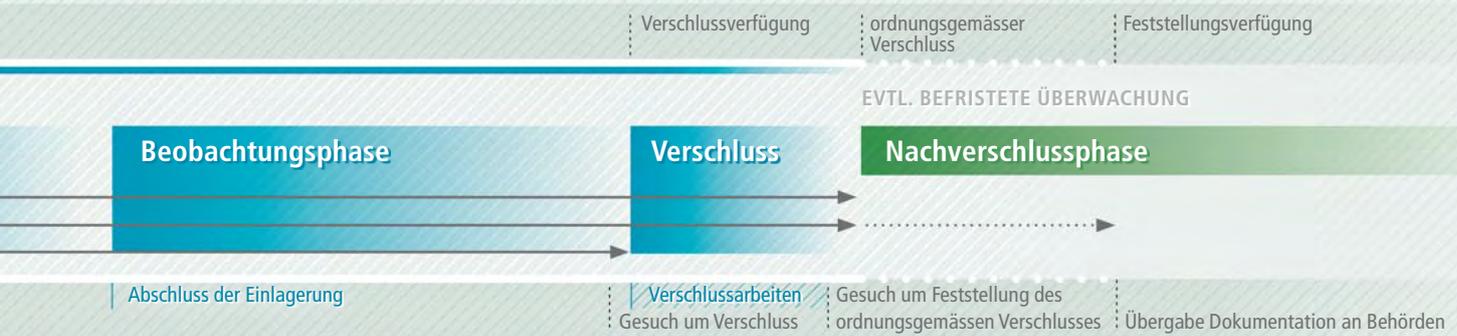
Gemäss Gesetz ist die sichere Entsorgung Aufgabe der Abfallproduzenten. Diese tragen auch die Kosten der Entsorgung. Für die Entsorgung der radioaktiven Abfälle aus Medizin, Industrie und Forschung ist der Bund zuständig, für die Entsorgung der radioaktiven Abfälle aus der Stromproduktion die Betreiber der Kernkraftwerke. Zur Entsor-

gung 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

Wie werden offene Fragen geklärt?

Der Bundesrat hat in seinem Entscheid über den Entsorgungsnachweis vom 28. Juni 2006 verfügt, dass die Kernkraftwerksgesellschaften gleichzeitig mit dem Entsorgungsprogramm dem Bundesrat einen Bericht zu unterbreiten haben, der alle in den Gutachten und Stellungnahmen des ENSI, der Kommission Nukleare Entsorgung, der Kommission für nukleare Sicherheit und der Experten der OECD/NEA enthaltenen offenen Fragen, Hinweise und Empfehlungen systematisch erfasst. Die Betreiber müssen aufzeigen, wie die offenen Fragen im weiteren Verfahren zeit- und sachgerecht beantwortet werden. Die Nagra ist diesem Auftrag mit dem Einreichen des Berichts NTB 08-02 im Oktober 2008 nachgekommen. Dieser Bericht wurde vom ENSI beurteilt (ENSI 33/114). Fragen Nr. 13 und 40 Technisches Forum Sicherheit



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 dauert etwa 14 Jahre.

Ist ein geeignetes Standortgebiet gefunden, ist es aber noch ein langer Weg, bis ein Tiefenlager gebaut, die radioaktiven Abfälle eingelagert und schliesslich alle Zugänge wieder vollständig verschlossen sein werden. Meilensteine auf diesem Weg sind verschiedene Bewilligungsschritte, die den Bau, den Betrieb, die Beobachtungsphase und

den Verschluss umfassen. Nach ordnungsgemässigem 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 werden die Einlagerung von SMA nicht vor 2035 und die Einlagerung von HAA nicht vor 2045 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.



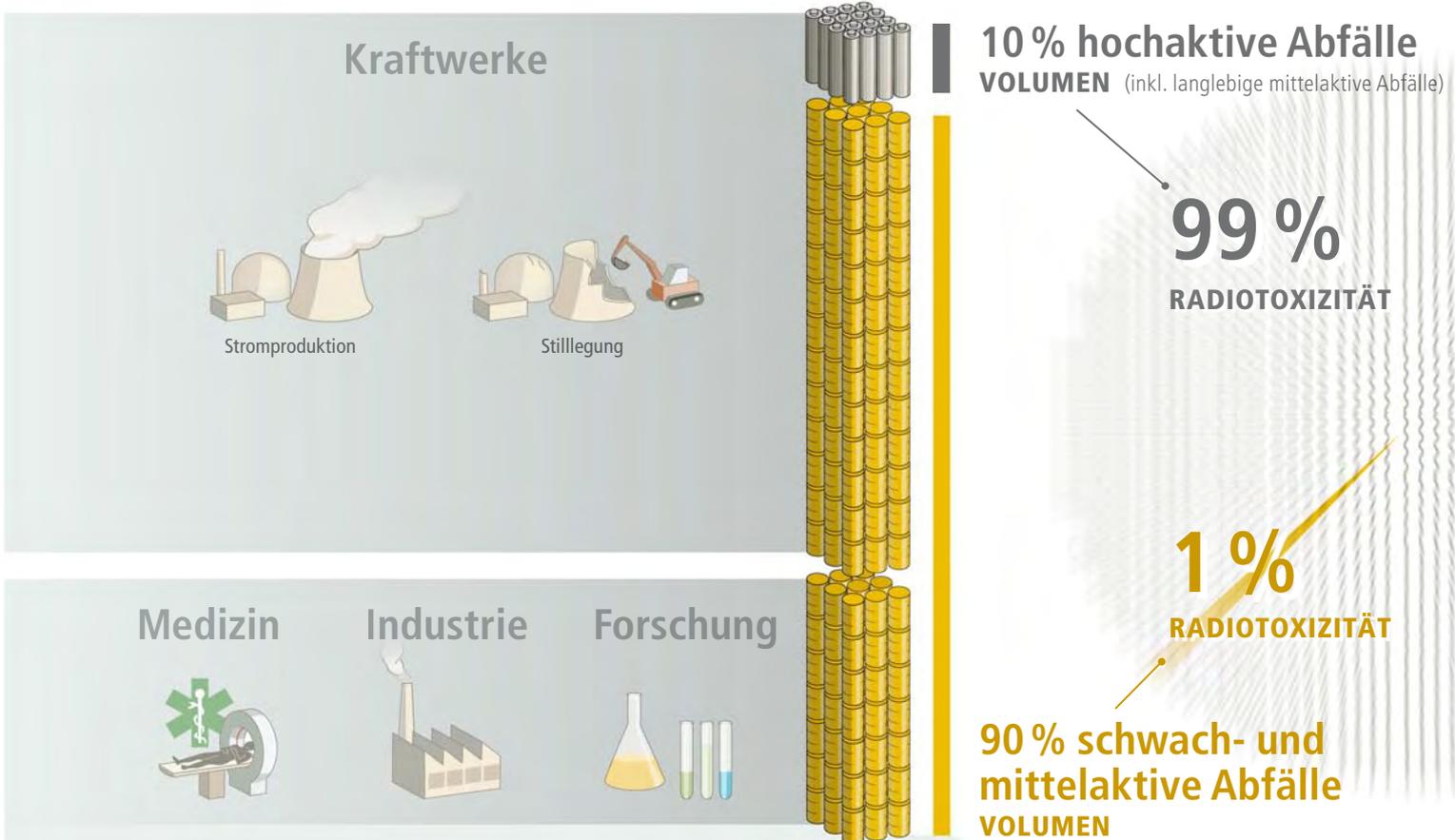
ENSI 33/110: Stellungnahme zum Entsorgungsprogramm 2008 der Entsorgungspflichtigen, ENSI, Brugg, 2012.

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

Leitfragen in der Diskussion um geologische Tiefenlager

- *SMA oder HAA?* Die Lagerkonzepte für SMA und für HAA sind unterschiedlich. Die weniger stark strahlenden SMA produzieren keine Wärme und können deshalb dichter gestapelt werden. HAA hingegen strahlen stark und produzieren viel Wärme. Für HAA gelten darum besonders hohe Sicherheitsanforderungen.
- *Einwirkungen oder Auswirkungen?* Das Tiefenlager ist vor Einwirkungen von aussen zu schützen, wie z. B. vor einem Wassereintrich. Andererseits dürfen die im Tiefenlager eingelagerten radioaktiven Abfälle keine schädlichen Auswirkungen auf die Umgebung haben.
- *Betriebssicherheit oder Langzeitsicherheit?* Das Lager muss sicher sein, während es mit radioaktiven Abfällen befüllt wird. Es muss aber auch nach dem Betrieb für bis zu einer Million Jahre sicher bleiben.
- *Oberflächenanlagen oder Lagerbereich?* Bei einem Lager gibt es sowohl an der Erdoberfläche Anlagen als auch tief im Untergrund. Mit dem Verschluss werden die untertägigen Bauwerke verfüllt und die Oberflächenanlagen abgebaut.
- *Sofort oder später entscheiden?* Viele Entscheide auf dem langen Weg zum geologischen Tiefenlager sind noch nicht gefallen. So können Planung und Bau des Lagers schrittweise den neuesten Erkenntnissen aus Technik und Wissenschaft angepasst werden.

Woher radioaktive Abfälle stammen



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.

Wird Schweizer Atommüll 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 verbrauchte Brennelemente zur Wiederaufarbeitung nach Frankreich (La Hague) und England (Sellafield) geschickt. Die Rückführung der entsprechenden Abfälle wird voraussichtlich bis zum Jahr 2020 abgeschlossen sein. Seit 2006 ist die Ausfuhr zur Wiederaufarbeitung durch ein zehnjähriges Moratorium verboten. *Frage Nr. 23 Technisches Forum Sicherheit*

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

Zur Kategorie der hochaktiven Abfälle gehören verbrauchte Brennelemente aus Kernkraftwerken sowie verglaste Rückstände aus der Wiederaufarbeitung der Brennelemente. Das Volumen der HAA wird etwa 7500 m³ betragen und schliesst die Tiefenlagerbehälter ein. Langlebige mittelaktive Abfälle umfassen Abfälle aus der Wiederaufarbeitung (z. B. Hülsen und Endstücke der Brennelemente) und mittelaktive Betriebsabfälle aus Kernkraftwerken und Forschungsanlagen. Das Volumen der LMA wird etwa 2300 m³ betragen. HAA und LMA 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 90 000 m³ betragen, was rund 90 Prozent des gesamten Abfallvolumens entspricht. Gleichzeitig enthalten sie aber nur etwa 1 Prozent

der gesamten Radiotoxizität. Die Abfallmengen basieren auf der Annahme einer 50-jährigen Betriebszeit der bestehenden Kernkraftwerke einschliesslich ihrer Stilllegung.

Bis zur Einlagerung in ein geologisches Tiefenlager werden die Abfälle in Zwischenlagern aufbewahrt. Für jeden Abfallbehälter 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 verbracht 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 allfällige Transport- und Handhabungsstörfälle ausgelegt. Diese Transportbehälter (z. B. «Castorbehälter») sind u. a. wegen ihrer Grösse nicht für die Tiefenlagerung geeignet. Verbrauchte Brennelemente und verglaste Abfälle aus der Wiederaufarbeitung werden deshalb vor der Tiefenlagerung in der «heissen Zelle» der Verpackungsanlage in endlagerfähige Behälter verpackt. Fässer mit schwach- und mittelaktiven Abfällen werden in dickwandige Betoncontainer umgeladen.



NTB 08-01: Entsorgungsprogramm 2008 der Entsorgungspflichtigen, Nagra, Wettingen.

UVEK (2011): Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management – Fourth National Report of Switzerland, Brugg, 2011.

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.



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?

Mögliche Wirtgesteine wie der Opalinuston sind vor vielen Millionen Jahren entstanden. Die von der Geologie überblickbaren Zeiträume sind 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 Verständnis der geologischen Entwicklungsgeschichte können die Fachleute deshalb für ausgewählte Gebiete zuverlässig mögliche 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. *Fragen Nr. 10, 15 und 45 Technisches Forum Sicherheit*



Entstehung eines Wirtgesteins: Beispiel Opalinuston

Vor rund 180 Millionen Jahren war die Schweiz von einem tropischen Flachmeer bedeckt. Im 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

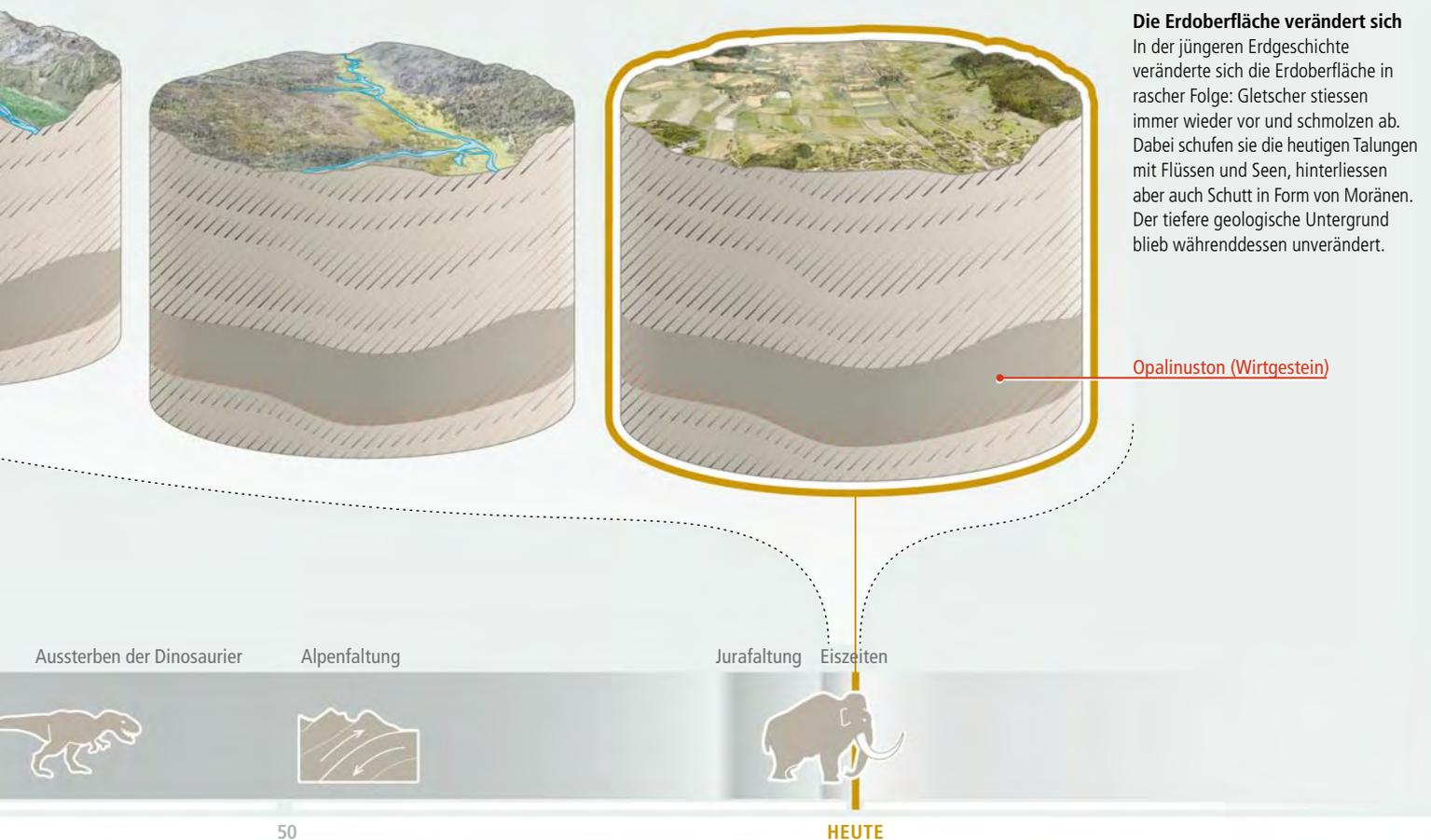
100

Fünf Minuten am Strand sind flugs vorbei, fünf Minuten beim Zahnarzt hingegen können ewig dauern. Zeit lässt sich nur messen, wenn man einen Vergleich heranzieht. Aus menschlicher Sicht tickt die Erdzeituhr sehr langsam – so langsam, dass wir die geologischen Geschehnisse kaum erfassen können. Die Erde hat sich vor über 4600 Millionen Jahren gebildet. Die Alpenfaltung, bei der ehemalige Tiefseesedimente zum heutigen mächtigen Gebirge aufgetürmt wurden, erfolgte im Lauf vieler Millionen Jahre, die nur im Zeitraffer der Erdgeschichte zu begreifen sind. An der Erdoberfläche können sich die Verhältnisse

dagegen sehr schnell ändern. Die ältesten menschlichen Siedlungen sind gerade mal einige Tausend Jahre alt.

Gerade wegen dieser sehr langen Zeiträume kann 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

Wie lange eine Million Jahre dauert



Die Erdoberfläche verändert sich

In der jüngeren Erdgeschichte veränderte sich die Erdoberfläche in rascher Folge: Gletscher stiessen immer wieder vor und schmolzen ab. Dabei schufen sie die heutigen Talungen mit Flüssen und Seen, hinterliessen aber auch Schutt in Form von Moränen. Der tiefere geologische Untergrund blieb währenddessen unverändert.

Opalinuston (Wirtgestein)

ist die einzige Methode zur Entsorgung der radioaktiven Abfälle, welche den Anforderungen an die Langzeitsicherheit (bis 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, Bern.

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

ENSI 33/070: Sicherheitstechnisches Gutachten zum Vorschlag geologischer Standortgebiete, Kap. 4, ENSI, Brugg, 2010.

Wie gut ist ein Lager vor der Abtragung darüber liegender Gesteinsschichten geschützt?

Um die Abtragung von Gesteinsschichten beurteilen zu können ist es wichtig, die Entwicklung von Tälern zu verstehen. An mehreren Beispielen aus dem Klettgau, dem Thurtal und dem Rheintal lässt sich zeigen, welche Talformen wann und wie entstanden sind. Die Abtragungsprozesse werden aber noch nicht vollständig verstanden und sind daher Gegenstand der aktuellen Forschung. Wichtig ist, dass ein Lager für radioaktive Abfälle so tief gebaut wird, dass alle denkbaren Entwicklungen berücksichtigt werden. Dadurch kann ein Lager für 1 Million Jahre vor der Abtragung geschützt werden. Fragen Nr. 27 Technisches Forum Sicherheit

Zwei Lager für die radioaktiven Abfälle

Die heute produzierten radioaktiven Abfälle stellen für Jahrtausende eine Gefahr dar. Deshalb müssen die Abfälle so entsorgt werden, dass der langfristige Schutz von Mensch und Umwelt sichergestellt ist. Einen solchen langfristigen 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 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. Dabei ist auch ein kombiniertes Lager mit einer gemeinsamen Oberflächenanlage möglich.

Ein geologisches Tiefenlager besteht aus einem **Felslabor**, einem **Pilotlager** und dem **Hauptlager**. Vor Baubeginn wird am Ort des zukünftigen Tiefenlagers ein Felslabor eingerichtet. In diesem Labor können Experimente unmittelbar am Wirtgestein durchgeführt und die Eigenschaften des Standortgebiets überprüft werden. Erst wenn die gewonnenen Daten die hohen Sicherheitsanforderungen bestätigen, beginnt der Bau der weiteren Lagerteile (zuerst Pilotlager, dann Hauptlager). Im Pilotlager werden die für das Tiefenlager repräsentativen 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 wurde, beginnt die Einlagerung der radioaktiven Abfälle im Hauptlager.

Die Einlagerung schwach- und mittelaktiver Abfälle beginnt frühestens ab 2035. Hochaktive Abfälle müssen etwa 40 Jahre zwischengelagert werden, bis sie genügend abgekühlt sind. Deren Einlagerung beginnt etwa ab 2045. Rund 20 Jahre später ist die Einlagerung beendet. Danach folgt eine Beobachtungsphase, deren Dauer von den zukünftigen Behörden festgelegt wird. Während der Beobachtungsphase muss eine Rückholung der Abfälle ohne grossen Aufwand 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 nicht gewartet oder überwacht werden. Eine Überwachung kann aber, wie bereits heute üblich, im Rahmen der nationalen Umweltüberwachung weitergeführt werden.

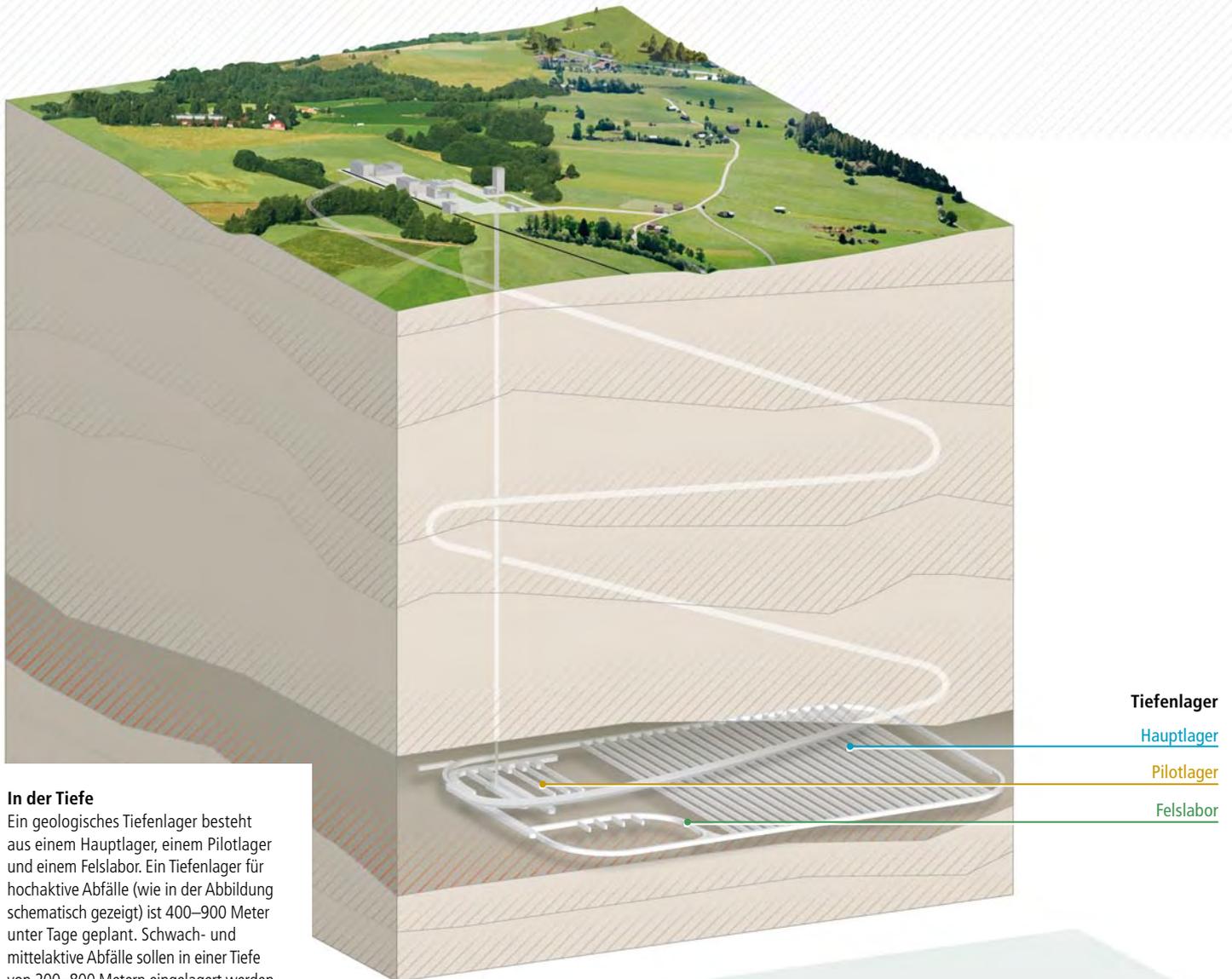


BFE (2008): Sachplan geologische Tiefenlager – Konzeptteil, Bundesamt für Energie, Bern.

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

Welche Vor- und Nachteile hätte ein Kombilager?

Bei einem Kombilager handelt es sich um zwei räumlich getrennte Lagerbereiche für hochaktive sowie schwach- und mittelaktive Abfälle, die eine gemeinsame Anlage an der Oberfläche nutzen. Ein Vorteil läge in der gemeinsamen Nutzung von Gebäuden und Zugangswegen. Für ein Kombilager gelten die gleichen Sicherheitsanforderungen wie für einzelne Tiefenlager. Die beiden Lager im Untergrund dürfen sich gegenseitig nicht beeinflussen. Der Bau eines Kombilagers setzt daher voraus, dass im Untergrund genügend Platz vorhanden ist und dass keine sicherheitstechnischen Nachteile verursacht werden. Dies ist standortspezifisch zu überprüfen. *Frage Nr. 41 Technisches Forum Sicherheit*



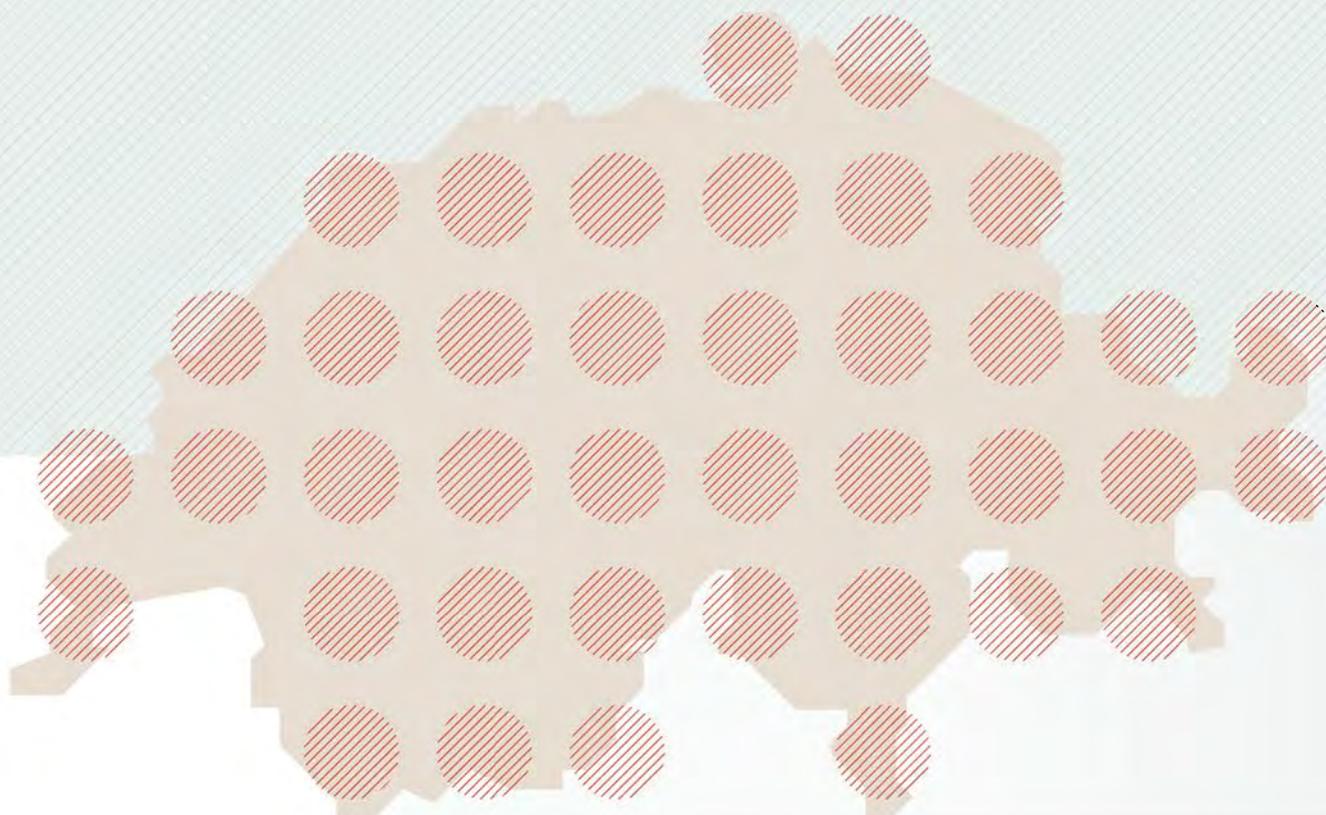
In der Tiefe

Ein geologisches Tiefenlager besteht aus einem Hauptlager, einem Pilotlager und einem Felslabor. Ein Tiefenlager für hochaktive Abfälle (wie in der Abbildung schematisch gezeigt) ist 400–900 Meter unter Tage geplant. Schwach- und mittellaktive Abfälle sollen in einer Tiefe von 200–800 Metern eingelagert werden.

Welche Forschungsarbeiten sind noch erforderlich, um das bestehende Lagerkonzept, wie z. B. zum Pilotlager und zur Beobachtungsphase, weiter zu entwickeln?

Alle fünf Jahre muss die Nagra in einem Entsorgungsprogramm darlegen, welche Abfälle vorliegen, wie das bestehende Lagerkonzept weiterentwickelt und umgesetzt werden soll sowie welche Forschungs- und Entwicklungsarbeiten in den nächsten Jahrzehnten vorgesehen sind. Dieses Entsorgungsprogramm wird vom ENSI überprüft. Um die Anforderungen an das Lagerkonzept z. B. hinsichtlich des Pilotlagers und der Beobachtungsphase zu präzisieren, betreibt das ENSI eigene Forschung. So startete die Aufsichtsbehörde drei Forschungsprojekte mit den Themen «Auslegung und Inventar des Pilotlagers», «Monitoringkonzept und -einrichtung» sowie «Lagerauslegung».

Fragen Nr. 40 und 54 Technisches Forum Sicherheit

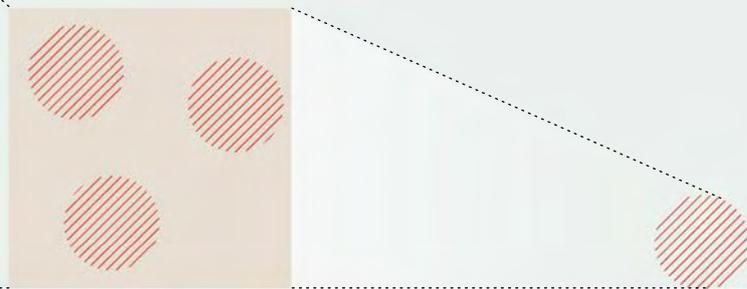


Der «Sachplan geologische Tiefenlager» legt das Verfahren fest, wie in der Schweiz Standorte für geologische Tiefenlager radioaktiver Abfälle ausgewählt werden. Sachpläne sind ein Mittel der Raumplanung und organisieren die Zusammenarbeit zwischen Bund und Kantonen. Das Konzept zum Sachplan geologische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

Das schrittweise 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 so genannten 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



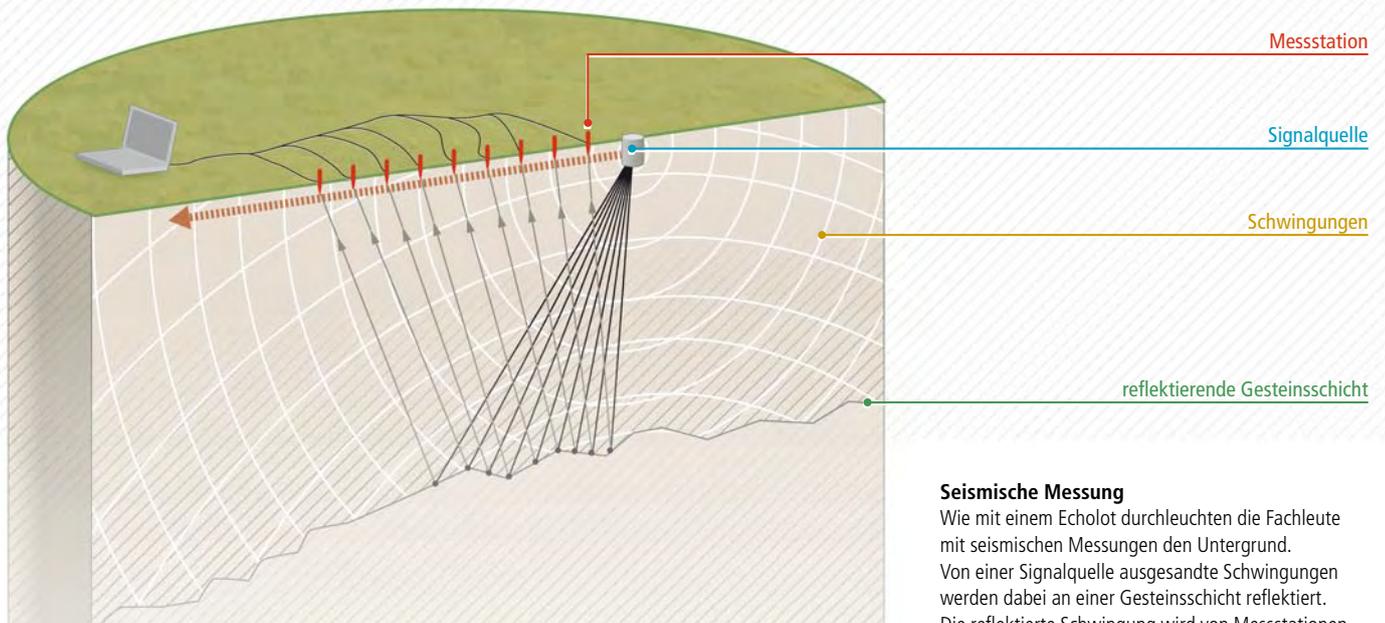
In **ETAPPE 2** werden die Standortgebiete sicherheitstechnisch miteinander verglichen. Basierend auf diesem Vergleich schlägt die Nagra jene Standortgebiete vor, die in Etappe 3 vertieft untersucht werden sollen. Zusätzlich erarbeitet die Nagra gemeinsam mit den Regionalkonferenzen in den einzelnen Standortregionen Vorschläge zur Anordnung und Ausgestaltung der Oberflächenanlagen. Sie muss mindestens zwei Standortgebiete und dazugehörige Standortareale für die Oberflächenanlagen je für ein SMA- und ein HAA-Lager vorschlagen. Neben der sicherheitstechnischen Bewertung, die weiterhin oberste Priorität hat, erfolgt die Beurteilung nun auch nach sozialen, wirtschaftlichen und raumplanerischen Gesichtspunkten. Die Vorschläge werden vom ENSI und weiteren Fachstellen des Bundes geprüft und dem Bundesrat zur Genehmigung vorgelegt.

In **ETAPPE 3** folgt eine vertiefte Untersuchung der verbliebenen Standortgebiete. Unter Einbezug der Standortregionen wird das Lagerprojekt konkretisiert. Die Standortregionen schlagen Projekte zur Förderung der regionalen Entwicklung vor und entwickeln Grundlagen für Kompensationsmassnahmen. Auf der Basis der Untersuchungen wird die Nagra einen Standort für ein SMA-Lager und einen Standort für ein HAA-Lager vorschlagen. Schliesslich reicht die Nagra Rahmenbewilligungsgesuche für die ausgewählten Standorte ein. Die Gesuche werden erneut vom ENSI und weiteren Fachstellen des Bundes geprüft. Der Bundesrat erteilt die Rahmenbewilligungen, welche vom Parlament genehmigt werden müssen. Diese Standortentscheide unterliegen dem nationalen fakultativen Referendum. Das Schweizer Volk hat also das letzte Wort zur Standortwahl.



BFE (2008): Sachplan geologische Tiefenlager – Konzeptteil, BFE, Bern, 2008.

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



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. Grundsätzlich gibt es Untersuchungen, die das zu untersuchende Gestein verletzen (z. B. Bohrungen) und Methoden, die das Gestein nicht verletzen (z. B. geophysikalische Untersuchungsmethoden). 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 des Wirt- und des umgebenden Rahmengesteins. 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** (Sprengrung, 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, oder 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. Die notwendige Auflösung in der Größenordnung von zehn Metern im Tiefenbereich eines geologischen Tiefenlagers kann mit den heutigen seismischen Methoden erreicht werden.

Weitere Methoden, die in der Geophysik zum Einsatz kommen, sind gravimetrische, elektrische, elektromagnetische oder magnetische Messverfahren. Um ein

Der Untergrund wird durchleuchtet

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 vollständige räumliche Erfassung des zu untersuchenden Untergrunds, wobei jedoch wegen des indirekten Messverfahrens eine gewisse Unschärfe bestehen bleibt. Die gewonnenen Messdaten müssen deshalb mit Laboruntersuchungen und Bohrungen verglichen werden. Verfahren wie Bohrungen,

Baggerschlitze oder Rammsondierungen liefern punktuell präzise Informationen, können aber nicht flächendeckend zum Einsatz kommen. Welche Messverfahren schliesslich eingesetzt werden, hängt vom Untersuchungsziel ab.



HSK 35/99: Gutachten zum Entsorgungsnachweis der Nagra für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive sowie langlebige mittelaktive Abfälle (Projekt Opalinuston), Kap. 2.3.

Nagra: <http://www.seismik-news.ch>

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 oft nicht erkennbar. Die Wahrscheinlichkeit, dass grosse Störungen unterhalb des Opalinustons, welche diesen nicht erreichen – und demzufolge seit mindestens etwa 180 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. *Frage Nr. 32 Technisches Forum Sicherheit*

Was man vom Tiefenlager an der Oberfläche sieht

Betriebsgebäude

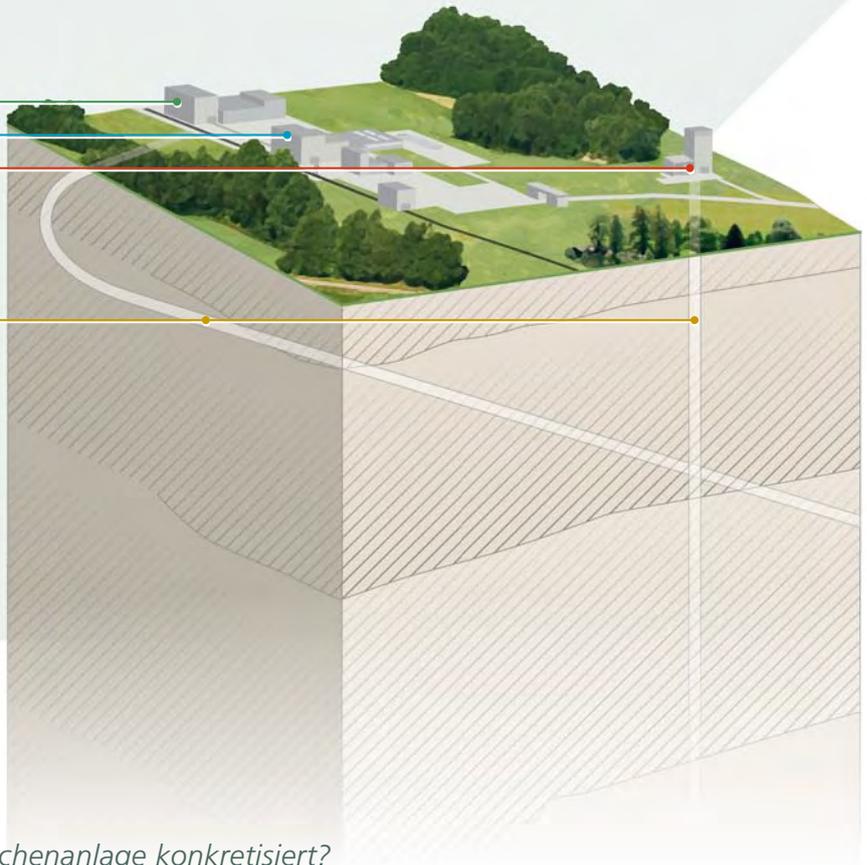
Verpackungsanlage

Förderturm

Rampe / Schacht

Fläche von elf Fussballfeldern

Die Oberflächenanlage für ein geologisches Tiefenlager hochaktiver Abfälle nimmt nach Schätzungen der Nagra eine Fläche von etwa 200 mal 400 Metern ein. Auf diesem Areal befindet sich die Infrastruktur, die für den Bau und den Betrieb des Lagers benötigt wird.



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. Im Januar 2012 hat die Nagra mögliche Standortareale für die Oberflächenanlage in die Diskussion mit den Standortregionen eingebracht. Im weiteren Verlauf des Verfahrens schlägt die Nagra mindestens ein Areal für eine Oberflächenanlage je Region vor. Die detaillierte Anordnung und die baureife Ausgestaltung der Bauten erfolgen mit der Ausarbeitung der Unterlagen für die Baubewilligung erst etwa ab 2026 (SMA-Lager) bzw. 2040 (HAA-Lager) – mehrere Jahre also nach der erfolgten Standortwahl.

Frage Nr. 60 Technisches Forum Sicherheit

Sichtbares Zeichen für ein geologisches Tiefenlager wird die Oberflächenanlage sein. Sie ist das Tor zum Tiefenlager. Hier befinden sich Zugangsbauwerke und Betriebsgebäude. Die radioaktiven Abfälle werden in Empfang genommen 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 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 Lagerbehälter 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.

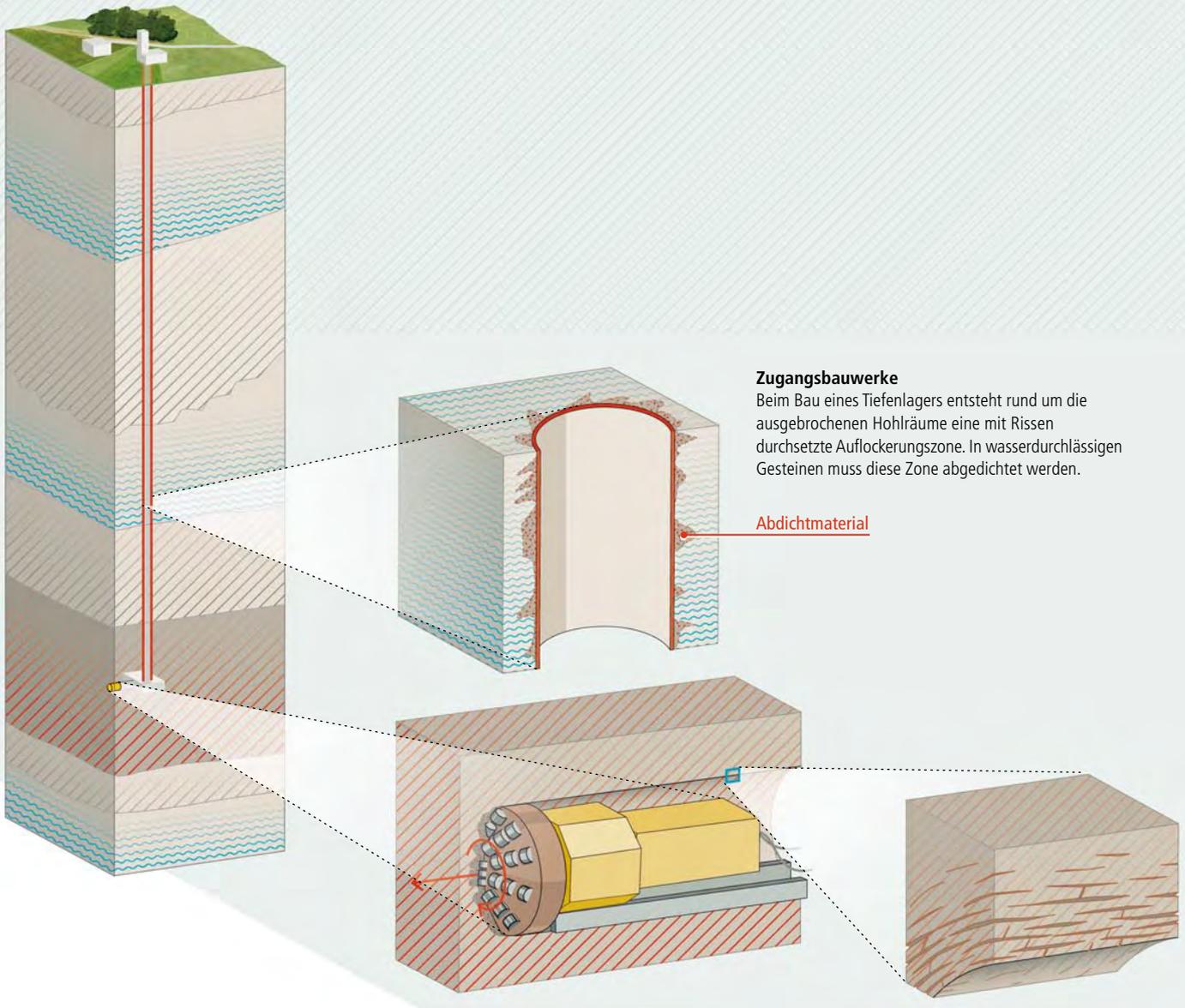
Die Hauptbelastung für die lokale Bevölkerung wird während der Bauphase erwartet. Dabei kann es zu Lärm- und Staubbelästigung durch den Transport des ausgebrochenen Gesteins kommen. Der Abtransport des Ausbruchmaterials erfolgt wenn möglich per Bahn. Für die ersten Jahre der Bauphase rechnet die Nagra mit etwa 5 bis 10 Zügen pro Woche (dies entspricht ungefähr 30 bis 60 Lastwagen pro Tag), die den Ausbruch abtransportieren sowie Kies und Zement antransportieren. Nach der Bauphase wird mit einer geringeren Verkehrsbelastung durch den Transport der radioaktiven Abfälle gerechnet. Die Nagra geht von einem Bahntransport alle ein bis zwei Monate mit hochaktiven Abfällen bzw. einem bis zwei Bahntransporten pro Woche mit schwach- und mittelaktiven Abfällen aus. Dazu kommen zwei bis drei Züge pro Woche mit Betriebsmaterialien (leere Tiefenlagerbehälter, Aushub, Verfüllmaterial etc.).

Das ENSI wacht darüber, dass mit Schutz- und Sicherungsmassnahmen während der Betriebsphase das Risiko durch Unfälle während des Transports und der Einlagerung auf ein Minimum reduziert wird.



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

NTB 11-01: Vorschläge zur Platzierung der Standortareale für die Oberflächenanlage der geologischen Tiefenlager sowie zu deren Erschliessung, Nagra, Wettingen, 2011.



Zugangsbauwerke

Beim Bau eines Tiefenlagers entsteht rund um die ausgebrochenen Hohlräume eine mit Rissen durchsetzte Auflockerungszone. In wasserdurchlässigen Gesteinen muss diese Zone abdichtet werden.

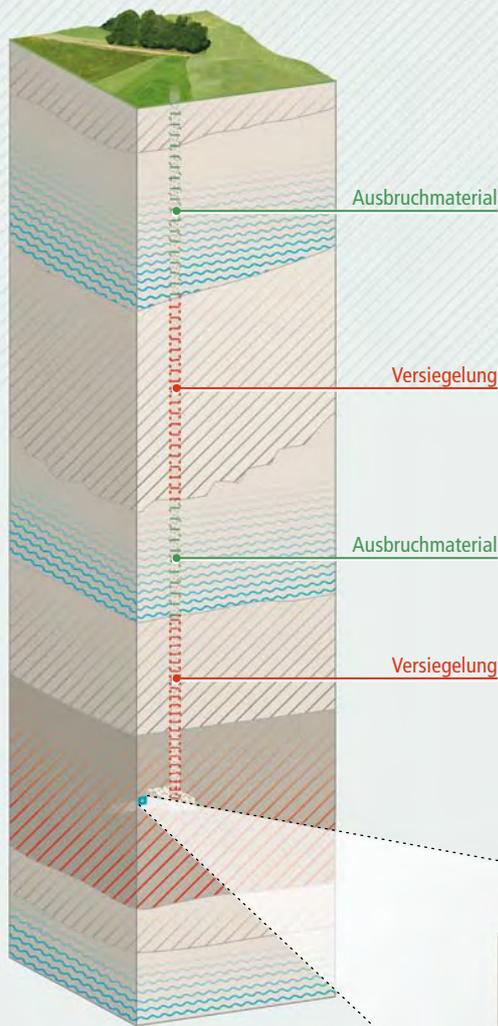
Abdichtmaterial

Schwerpunkte bei der Beurteilung der bautechnischen Machbarkeit eines Tiefenlagers:

- Machbarkeit mit heutigen Vortriebs- und Sicherungstechnologien
- Minimierung der Auflockerungszone um den Hohlraum
- Gewährleistung der Hohlraumstabilität während Bau und Nutzungsdauer
- Beherrschung von Wassereintritten
- Sicherungsmittel kompatibel mit dem Barrieren- und Sicherheitskonzept

Für ein geologisches Tiefenlager in der Schweiz sind Lagertiefen von 200 bis 900 Metern vorgesehen. Beim Bau können die Fachleute auf grosse Erfahrungen aus dem konventionellen Untertagebau zurückgreifen. Besonders Augenmerk richten sie auf die Gebirgs- und Gesteinsfestigkeiten sowie auf Wassereintritte. Die Langzeitsicherheit eines Tiefenlagers (Langzeiteinschluss und Rückhaltung der radioaktiven Stoffe) erfordert aber die Berücksichtigung zusätzlicher Aspekte. Dabei ist zwischen dem Lagerbereich und den Zugangsbauwerken zu unterscheiden.

Der Lagerbereich liegt im Wirtgestein, welches als natürliche Barriere die radioaktiven Stoffe einschliesst und zurückhält. Das Tiefenlager muss deshalb so gebaut werden, dass die Barrierenwirkung des Wirtgesteins erhalten bleibt. Der Wahl der Bautechnik (Ausbruchme-

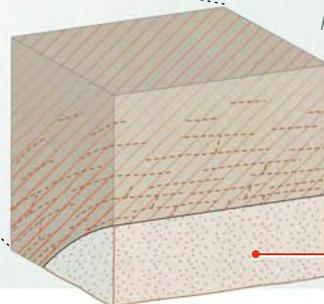


Hohe Anforderungen an die Bautechnik

Rund um die Zugangsbauwerke entsteht eine Auflockerungszone. Wie wirkt sich diese auf die Langzeitsicherheit des Tiefenlagers aus?

Zugangsbauwerke durchqueren Wirt- und Rahmengesteine sowie die darüber liegenden Deckschichten. Für die Langzeitsicherheit sind nur das Wirtgestein und das Rahmengestein massgebend für die Radionuklidrückhaltung. Die Versiegelung der Auflockerungszonen von Rampe und Schacht ist deshalb dort prioritär zu beachten. Diese Bereiche werden zum Beispiel mit Bentonit verschlossen. Beim Kontakt mit Wasser bzw. Feuchtigkeit quillt der Bentonit und dichtet den Zugang ab. Das zum Aufquellen benötigte Wasser stammt dabei aus dem Porenwasser des umgebenden Gesteins. Experimente im Felslabor Mont Terri zeigen, dass die vollständige Aufsättigung des Bentonits erst nach mehreren hundert Jahren abgeschlossen ist. Die Zugangsstrecken oberhalb des Wirtgesteins werden zusätzlich an verschiedenen Stellen mit quellbarem Material versiegelt. Damit wird die ursprüngliche Trennung der verschiedenen Grundwasserstockwerke wieder hergestellt.

Frage Nr. 28 Technisches Forum Sicherheit



Nach dem Verschluss

Sind die hochradioaktiven Abfälle eingelagert, wird der Lagerstollen mit quellendem Bentonit verfüllt. Dadurch schliessen sich auch die Risse in der Auflockerungszone wieder.

Quellendes Bentonitgranulat

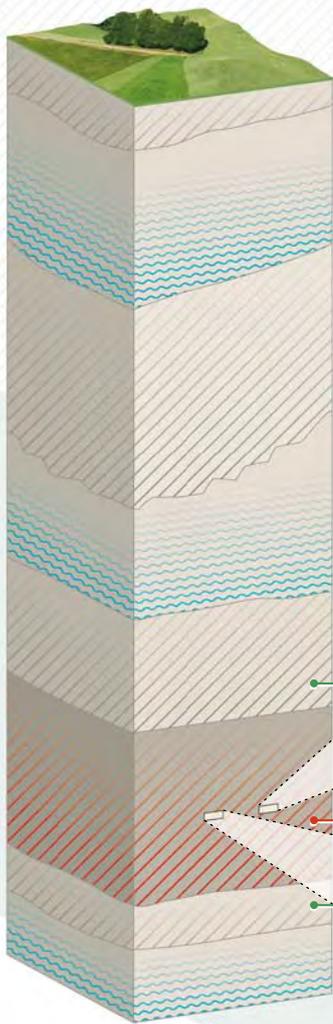
thode, Sicherung, Stützmittel) und der späteren Verfüllmaterialien kommt daher eine grosse Bedeutung zu. Damit soll die so genannte Auflockerungszone im Gestein um die Stollen herum minimiert werden. Für Gesteine oberhalb des Wirtgesteins, die ebenfalls zum Einschluss beitragen (Rahmengesteine), gelten ähnliche bautechnische Anforderungen, um deren Barrierenwirkung sicherzustellen.

Bei den Zugangsbauwerken durch die überlagernden Gesteinsschichten (Rampe oder Schacht) liegt der Hauptaspekt in der bautechnischen Machbarkeit und der Beherrschung von Wassereintritten während Bau und Betrieb. Zusätzlich muss verhindert werden, dass Wasser entlang der Zugangsbauwerke bis in den einschlusswirksamen Gebirgsbereich (Wirt- und Rahmengestein) vordringt.

Für den Verschluss des Tiefenlagers werden die Zugangsbauwerke verfüllt und versiegelt. Die Dichtheit dieser **Versiegelungen** hat einen direkten Einfluss auf die Langzeitsicherheit des Tiefenlagers. Für den Lagerbereich und die Zugangsbauwerke ist eine Verfüllung im einschlusswirksamen Gebirgsbereich zum Beispiel mit quellendem und somit abdichtendem Bentonit vorgesehen. Bentonit ist ein Material, das aus verschiedenen Tonmineralen besteht und wie viele tonreiche Gesteine gute Eigenschaften für den Rückhalt von radioaktiven Stoffen aufweist. Die Zugangsbauwerke oberhalb des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs werden so verfüllt, dass die ursprüngliche Trennung der verschiedenen Grundwasserstockwerke wieder hergestellt wird.



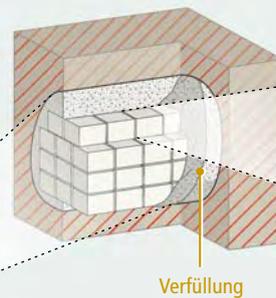
HSK 35/99: Gutachten zum Entsorgungsnachweis der Nagra (Projekt Opalinuston), Kap. 3.2, HSK, Würenlingen, 2005.



Ineinander verschachtelt

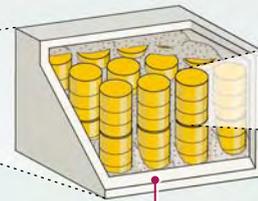
Eine Kette technischer und natürlicher Barrieren soll möglichst viele Radionuklide zurückhalten. Bei den hochaktiven Abfällen (HAA) sind technisch aufwändigere Barrieren nötig als bei den schwach- und mittelaktiven Abfällen (SMA).

Tiefenlager SMA

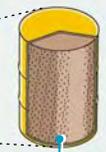


Rahmengestein

Verfüllung



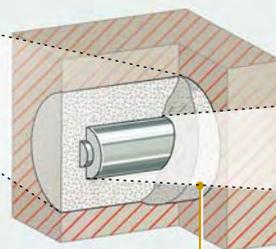
Tiefenlagerbehälter



Abfallmatrix

Wirtgestein Tiefenlager HAA

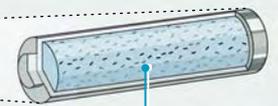
Rahmengestein



Verfüllung



Tiefenlagerbehälter



Abfallmatrix

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 verbrauchte 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 Abfälle. Ferner vermögen die bei der Korrosion der Stahlbehälter entstehenden Stoffe die Radionuklide durch chemische Reaktionen zu binden. Die Fässer der schwach- und mittelaktiven Abfälle werden für die Tiefenlagerung in dickwandige Betoncontainer verpackt und die verbleibenden Hohlräume mit Mörtel vergossen.

Verfüllung

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

Barrieren halten radioaktive Stoffe zurück

Weshalb will die Schweiz den radioaktiven Abfall in einem Tongestein entsorgen, während z. B. Deutschland Salz wählt?

Weltweit verfolgen viele Länder Projekte für den Bau geologischer Tiefenlager. Die Länder wählen dabei unterschiedliche Wirtgesteine wie zum Beispiel Salz (Deutschland), 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 Tonvorkommen für die Tiefenlagerung. Die Projekte in den verschiedenen Ländern werden abhängig vom Wirtgestein so ausgelegt, dass sie die vorgegebenen Schutzziele erreichen. *Frage Nr. 30 Technisches Forum Sicherheit*

Zerfallen die Behälter nicht früher als die Abfälle?

In den einzulagernden Abfällen können Radionuklide mit deutlich grösseren Zerfallszeiten (Halbwertszeiten) enthalten sein als die zu erwartende Lebensdauer eines Lagerbehälters. 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. Der Zerfall der Lagerbehälter ist im Lagerkonzept bereits berücksichtigt.

Frage Nr. 11 Technisches Forum Sicherheit

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



ENSI 33/070: Sicherheitstechnisches Gutachten zum Vorschlag geologischer Standortgebiete, Kap. 4, ENSI, Brugg, 2010.

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

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

NTB 08-03: Vorschlag geologischer Standortgebiete für das SMA und das HAA-Lager – Darlegung der Anforderungen, des Vorgehens und der Ergebnisse, Kap. 2, Nagra, Wettingen, 2008.

NTB 08-04: Vorschlag geologischer Standortgebiete für das SMA- und das HAA-Lager – Geologische Grundlagen, Textband, Kap. 4, Nagra, Wettingen, 2008.

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

- ausreichende Mächtigkeit und 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 Deformation
- Schutz vor Erosion

Wasser im Untergrund

Radioaktive Stoffe aus einem Tiefenlager breiten sich in Wasser gelöst aus. Deshalb ist es wichtig zu verstehen, wo **Wasser im Untergrund** vorkommt und wie es fließen kann.

Wasser kommt in fast allen Gesteinsschichten im Untergrund vor – auch in den Wirtgesteinen für geologische Tiefenlager und in den darüber liegenden Deckschichten. Die Wirtgesteine sind aber so dicht, dass das in Poren vorkommende Wasser nicht frei fließen kann. Dennoch können sich die gelösten Stoffe durch die so genannte Diffusion sehr langsam im Porenwasser bewegen – aber nur wenige Zentimeter in 1000 Jahren.

Viele im Wasser gelöste radioaktive Stoffe können zudem an Tonmineralen haften bleiben. Die **tonreichen Wirtgesteine** besitzen ausserdem sehr feine Poren und können so die Radionuklide zurückhalten. Wenn das Wirtgestein aber in der Nähe der Oberfläche verwittert und aufgelockert wird, verliert es die positiven Rückhal-

teeigenschaften. Deshalb muss es tief genug unter der Erdoberfläche liegen und die Gesteinsschichten müssen ausreichend dick sein. Die tonreichen Wirtgesteine haben ausserdem die Fähigkeit, undichte Stellen im Laufe der Zeit wieder von selbst zu verschliessen: So wurden im Felslabor Mont Terri in St-Ursanne (JU) nach dem Öffnen von Stollen im Opalinuston einzelne feuchte Stellen beobachtet, die sich nach einigen Monaten wieder selbst abdichteten.

Beim Bau des Tiefenlagers, noch bevor radioaktive Abfälle eingelagert werden, müssen mit den Zugangsbauwerken (Schächte, Rampen) wasserdurchlässige Gesteine, so genannte Grundwasserleiter, durchquert werden. Solche Grundwasserleiter sind als Trink- oder Mineralwasserreservoirs besonders zu schützen. Dafür können die im Tunnelbau üblichen Verfahren zu Abdichtung und Drainage eingesetzt werden. Eine vollständige Abdichtung kann allerdings meist nicht erreicht werden: Das anfallende

Was weiss man über die Dichtigkeit der Gesteine und über Wasserbewegungen in der Tiefe?

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 die Grundwasservorkommen. Die Nagra hat diese Ergebnisse in ihrem Bericht NTB 08-04 zusammengestellt. Mit diesen Kenntnissen lassen sich die Wasserbewegungen im Untergrund heute verstehen und gut beschreiben. *Frage Nr. 10 Technisches Forum Sicherheit*

Wasser muss abgeleitet oder abgepumpt werden. Durch eine günstige Wahl der Linienführung für die Zugangsbauwerke sollen deshalb Wasserzutritte und andere bautechnische Schwierigkeiten minimiert werden.

Während des Betriebs des Tiefenlagers ist zu vermeiden, dass Wasser von der Oberfläche her entlang der Zugänge hinunter bis in den Lagerbereich gelangen kann. Denn die tonreichen Wirtgesteine reagieren auf zusätzliches Wasser und können ihre günstigen Eigenschaften teilweise verlieren. Das ENSI hat deshalb in seiner Richtlinie ENSI-G03 festgehalten, dass ein Wassereintrich von der Oberfläche und den Zugangsbauwerken her verhindert oder beherrscht werden muss.

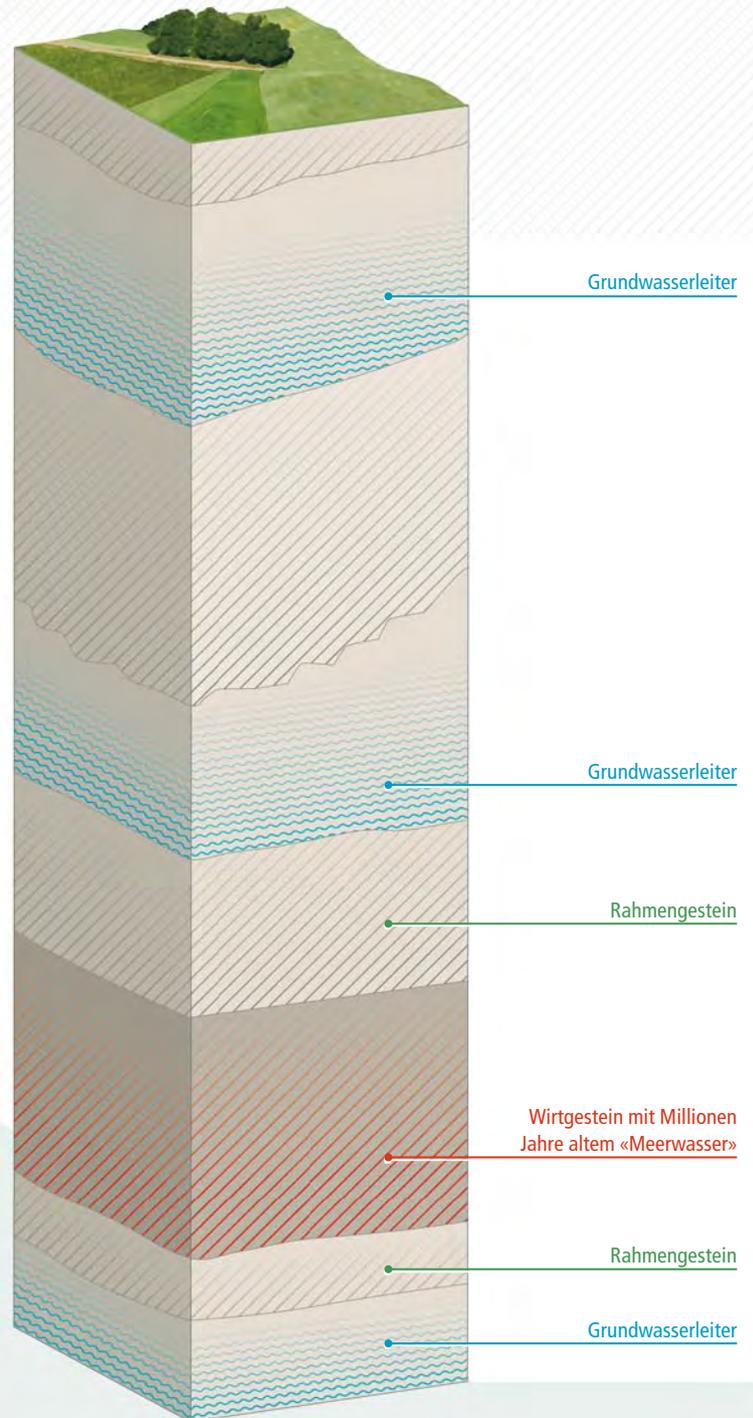


ENSI 33/115: Stellungnahme zu NTB 10-01 «Beurteilung der geologischen Unterlagen für die provisorischen Sicherheitsanalysen in SGT Etappe 2», ENSI, Brugg, 2011.

ENSI-G03: Spezifische Auslegungsgrundsätze für geologische Tiefenlager und Anforderungen an den Sicherheitsnachweis, ENSI, Würenlingen, 2009.

Was man aus Untersuchungen des Wassers in Tongesteinen weiss

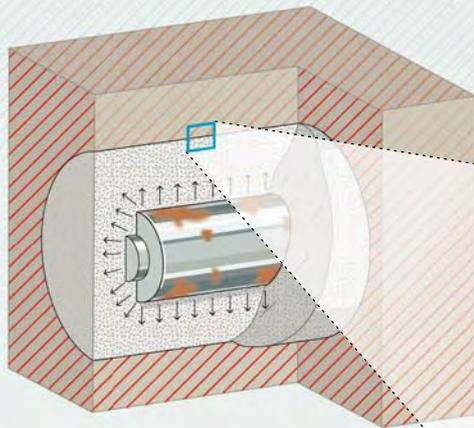
- Das Porenwasser ist Millionen Jahre alt und besitzt eine für Meerwasser typische Zusammensetzung.
⇨ Meerwasser blieb z. B. im Opalinuston erhalten. Dies zeigt, dass das Wasser lange eingeschlossen und nicht Teil des Wasserkreislaufs war.
- Wasser ober- und unterhalb dichter Tongesteine unterscheidet sich stark im Bezug auf sein Alter, seine chemische Zusammensetzung und die dort herrschenden Druckverhältnisse.
⇨ Dies zeigt, wie dicht die dazwischen liegenden Tongesteine 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 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 Millionen Jahre alt.

Gasbildung und die Folgen

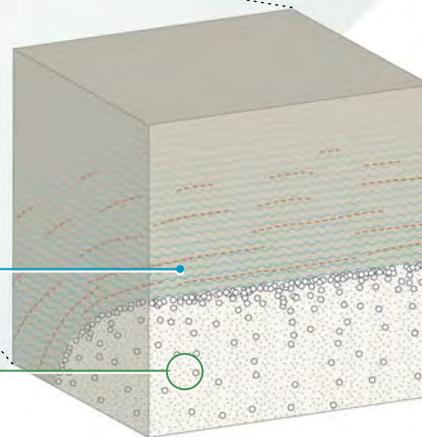


Die Lebensdauer des Lagerbehälters ist begrenzt

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

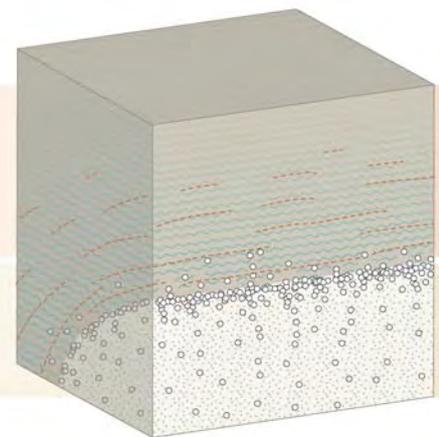
Porenwasser

Gas



Der Gasdruck um den Lagerbehälter steigt

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



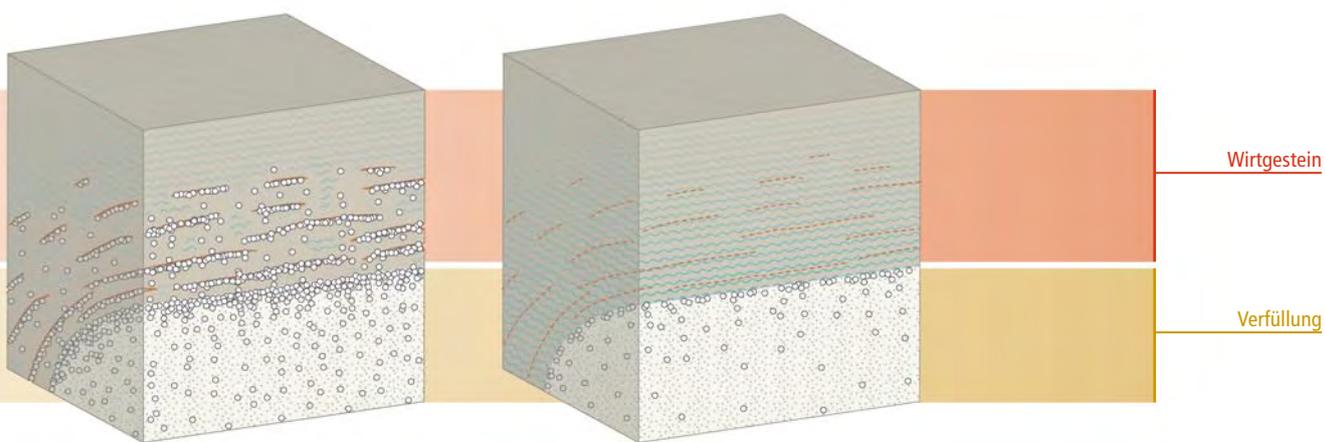
Das Gas löst sich im Porenwasser

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 **Gase**. 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 Füllmaterial) 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 sind Tritium und Radon kurzlebig.

Damit spielt nur Kohlenstoff-14 eine Rolle in der Sicherheitsbetrachtung.

Die in einem HAA- und einem SMA-Lager gebildeten Gasmengen 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



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.

muss so ausgelegt werden, dass die Gasbildung die Barriereneigenschaften des Wirtgesteins nicht beeinträchtigt.

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.



NTB 04-06: Effects of Post-disposal Gas Generation in a Repository for Spent Fuel, High-level Waste and Long-lived Intermediate Level Waste Sited in Opalinus Clay, Nagra, Wettingen, 2004.

NTB 08-07: Effects of post-disposal gas generation in a repository for low- and intermediate-level waste sited in the Opalinus Clay of Northern Switzerland, Nagra, Wettingen, 2008.

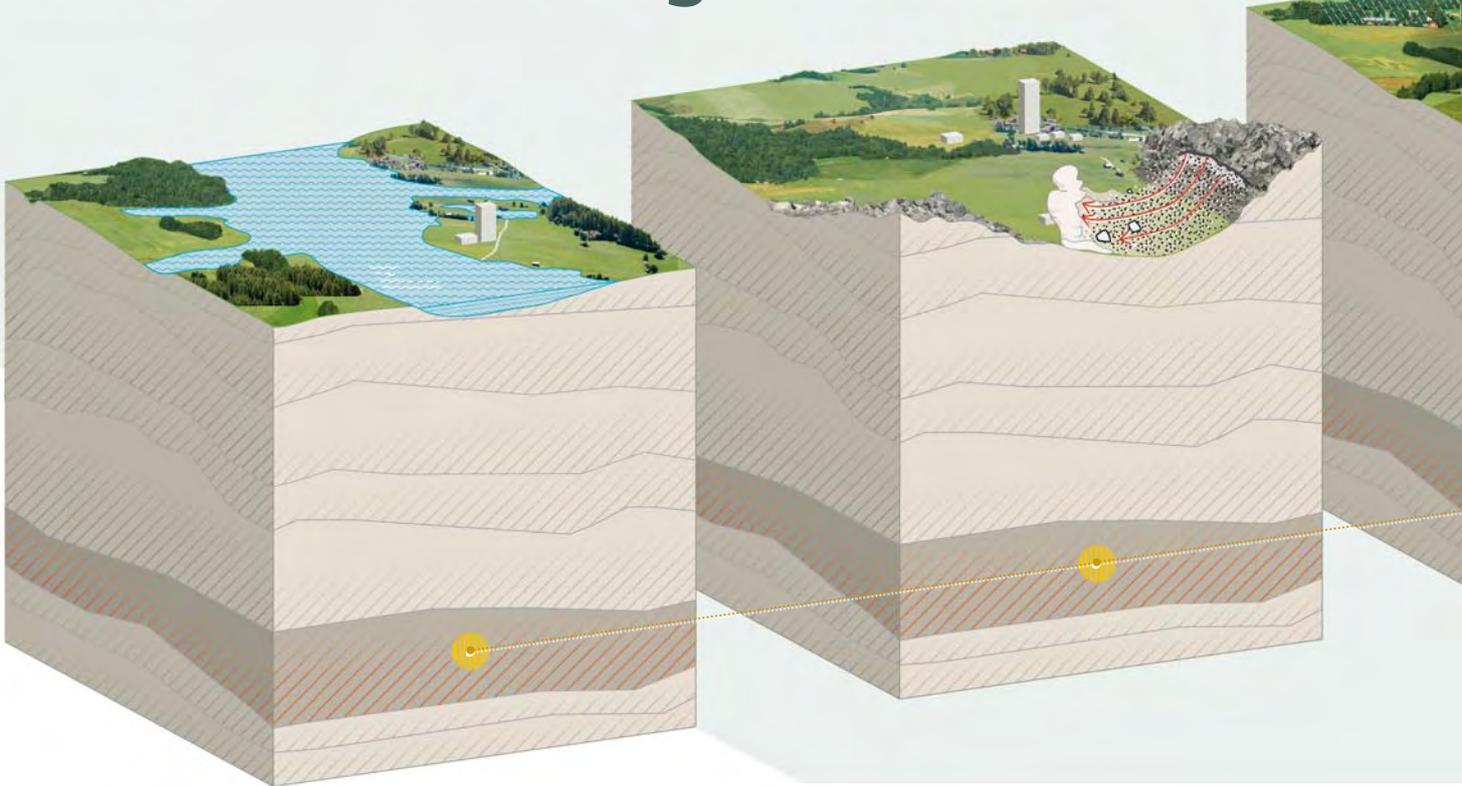
ENSI 33/070: Sicherheitstechnisches Gutachten zum Vorschlag geologischer Standortgebiete, ENSI, Brugg, 2010.

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

Der maximal zulässige Gasdruck, bei dem die Barriereneigenschaften 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 Barriereneigenschaften des Wirtgesteins nicht beeinträchtigt werden.

Frage Nr. 29 Technisches Forum Sicherheit

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 Gefahren wie Hochwasser oder Bergstürzen aus oder die Oberflächenanlagen müssen so gebaut werden, dass sie den bestehenden Gefahren wie Unwettern standhalten.

Das **Tiefenlager** besteht aus Oberflächenanlagen 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 gewappnet sein.

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



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. Gemäss der Richtlinie ENSI-G03 ist für die Betriebsphase eine 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 zu erbringen. Alle Auswirkungen müssen so begrenzt werden, dass die behördlichen Vorgaben eingehalten werden. *Frage Nr. 56 Technisches Forum Sicherheit*

abhängig, Lawinen und Bergstürze brauchen eine minimale Hangneigung. Diese Gefahrenzonen sind aber weitgehend bekannt und auf den Naturgefahrenkarten der Kantone eingezeichnet. Bei der Wahl des Standorts für die Oberflächenanlagen kann diesen Zonen 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 Wassereinbruch 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.



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

ENSI-G03: Spezifische Auslegungsgrundsätze für geologische Tiefenlager und Anforderungen an den Sicherheitsnachweis, ENSI, Würenlingen, 2009.

Wenn die Erde bebt

Mit enormen Kräften bewegt sich die afrikanische Kontinentalplatte einige Millimeter jedes Jahr 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 archivierte 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 darf nicht ausgeschlossen werden, dass während einer 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 verhindert 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) den Auswirkungen eines Erdbebens während der Betriebsphase standhalten können und sind entsprechend auszugestalten. Als Kernanlagen unterstehen sie den gleichen strengen Anforderungen an die Erdbebensicherheit wie Kernkraftwerke. Sie müssen auch für ein starkes Erdbeben ausgelegt sein, wie es alle 10 000 Jahre einmal vorkommen kann.

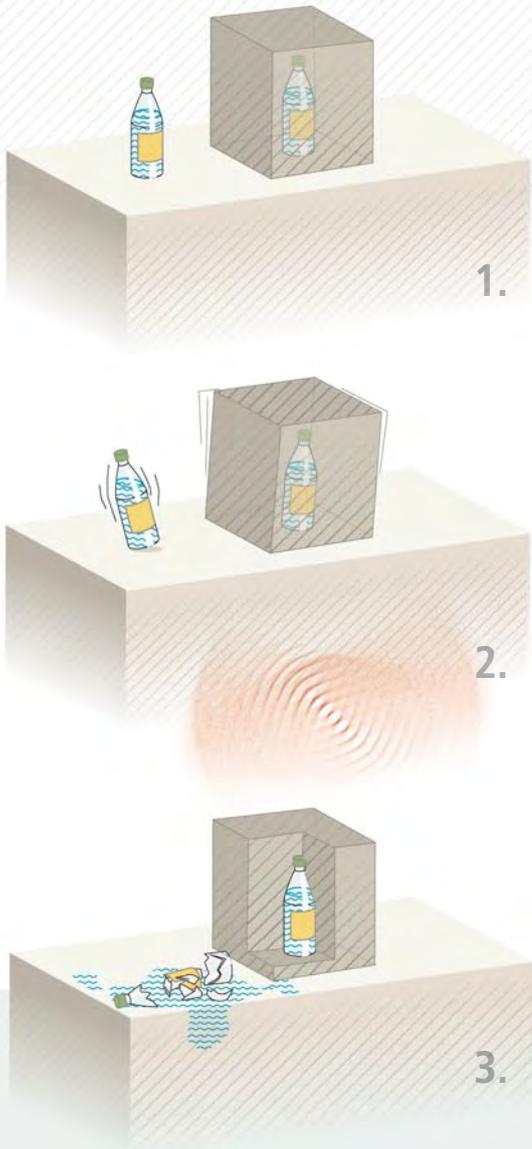


HSK 35/99: Gutachten zum Entsorgungsnachweis der Nagra für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive sowie langlebige mittelaktive Abfälle (Projekt Opalinuston), Kap. 2.5.5., HSK, Würenlingen, 2005.

NTB 08-04: Vorschlag geologischer Standortgebiete für das SMA- und das HAA-Lager – Geologische Grundlagen, Textband, Kap. 2.7.4., Nagra, Wettingen, 2008.

NTB 99-08: Geologische Entwicklung der Nordschweiz, Nagra, Wettingen, 2002.

Schweizerischer Erdbebendienst:
www.seismo.ethz.ch



Schüttelversuch

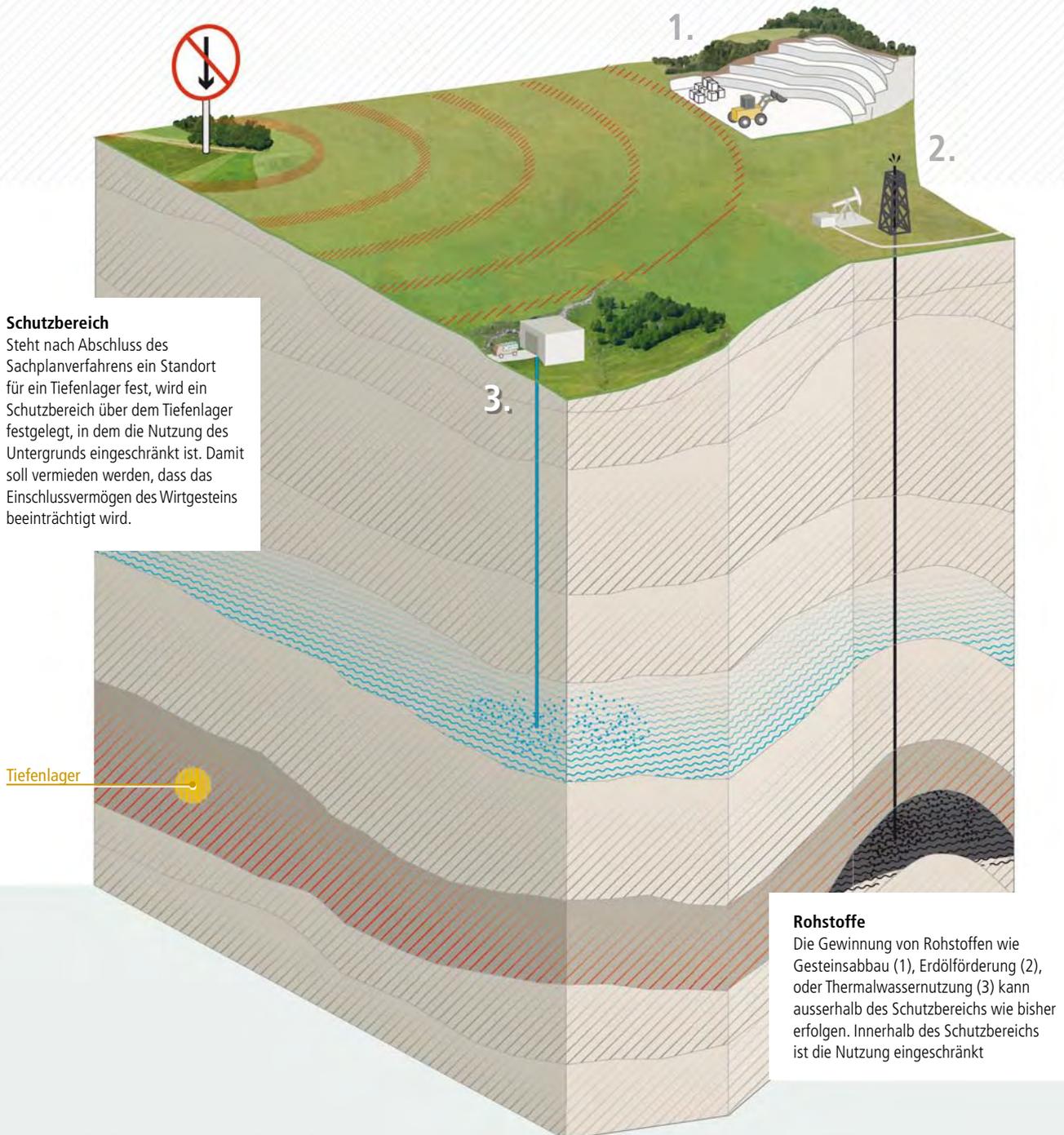
Zwei Glasflaschen stehen einmal frei und einmal fest umschlossen auf einer Oberfläche. Nach einem Erdbeben in der Tiefe erreichen Erschütterungswellen die Oberfläche. Die freistehende Flasche fällt um und zerbricht. Die fest umschlossene Glasflasche hingegen kann nicht frei schwingen – die Erschütterungswellen 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. Denn 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 starkes Erdbeben (hohe Magnitude) in grösserer Distanz weniger Auswirkungen haben als ein schwächeres Erdbeben in der Nähe.

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



Schutzbereich

Steht nach Abschluss des Sachplanverfahrens ein Standort für ein Tiefenlager fest, wird ein Schutzbereich über dem Tiefenlager festgelegt, in dem die Nutzung des Untergrunds eingeschränkt ist. Damit soll vermieden werden, dass das Einschussvermögen des Wirtgesteins beeinträchtigt wird.

Tiefenlager

Rohstoffe

Die Gewinnung von Rohstoffen wie Gesteinsabbau (1), Erdölförderung (2), oder Thermalwassernutzung (3) kann ausserhalb des Schutzbereichs wie bisher erfolgen. Innerhalb des Schutzbereichs ist die Nutzung eingeschränkt

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 (siehe links). 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, wird 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 radioaktive Stoffe leichter ausgebreitet

werden. Ein negativer Einfluss auf die Langzeitsicherheit des Tiefenlagers ist die Folge.

Um die Sicherheit eines Tiefenlagers zu gewährleisten, werden zusammen mit der Festlegung des Standorts am Ende des Sachplanverfahrens (Rahmenbewilligung) die notwendigen Schutzbereiche definiert und damit die mögliche Nutzung des Untergrunds eingeschränkt. Die Schutzbereiche umfassen alle Teile des Tiefenlagers, einschliesslich der Zugänge von der Oberfläche. In diesen Schutzbereichen 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 werden bereits mit dem 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.



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

NTB 08-04: Vorschlag geologischer Standortgebiete für das SMA- und HAA-Lager, Geologische Grundlagen, Nagra, Wettingen, 2008.

ENSI 33/070: Sicherheitstechnisches Gutachten zum Vorschlag geologischer Standortgebiete, Sachplan geologische Tiefenlager, Etappe 1, ENSI, Brugg, 2010.

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. *Frage Nr. 36 Technisches Forum Sicherheit*

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 einzelne Radionuklide langsam freigesetzt und in sehr geringen Mengen in den Lebensraum des Menschen transportiert werden. Diese Freisetzung radioaktiver Stoffe ist im Konzept des Tiefenlagers berücksichtigt. Ein kompletter Einschluss über lange Zeiträume ist zwar nicht möglich, aber auch nicht nötig. 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. Die aktuelle durchschnittliche Strahlendosis der Schweizer Bevölkerung beträgt etwa 5,5 Millisievert pro Jahr (Abbildung rechts).

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

Wie wirkt sich die zusätzliche Strahlenbelastung von 0,1 Millisievert pro Jahr aber auf das Krebsrisiko aus? – Die Wahrscheinlichkeit in der Schweiz im Lauf des Lebens an Krebs zu erkranken, liegt zurzeit bei etwa 25 Prozent. Fachleute gehen davon aus, dass sich dieses Risiko bei einer zusätzlichen Dosis von 0,1 Millisievert um 0,0006 Prozent pro Jahr erhöht. Angenommen, ein Mensch nimmt über einen Zeitraum von 100 Jahren die maximal zulässige Dosis von 0,1 Millisievert pro Jahr auf, so ist er in seinem Leben einer zusätzlichen Strahlenbelastung von 10 Millisievert ausgesetzt. Entsprechend erhöht sich sein Risiko an Krebs zu erkranken gemäss den Schätzungen rein rechnerisch um 0,06 Prozent.



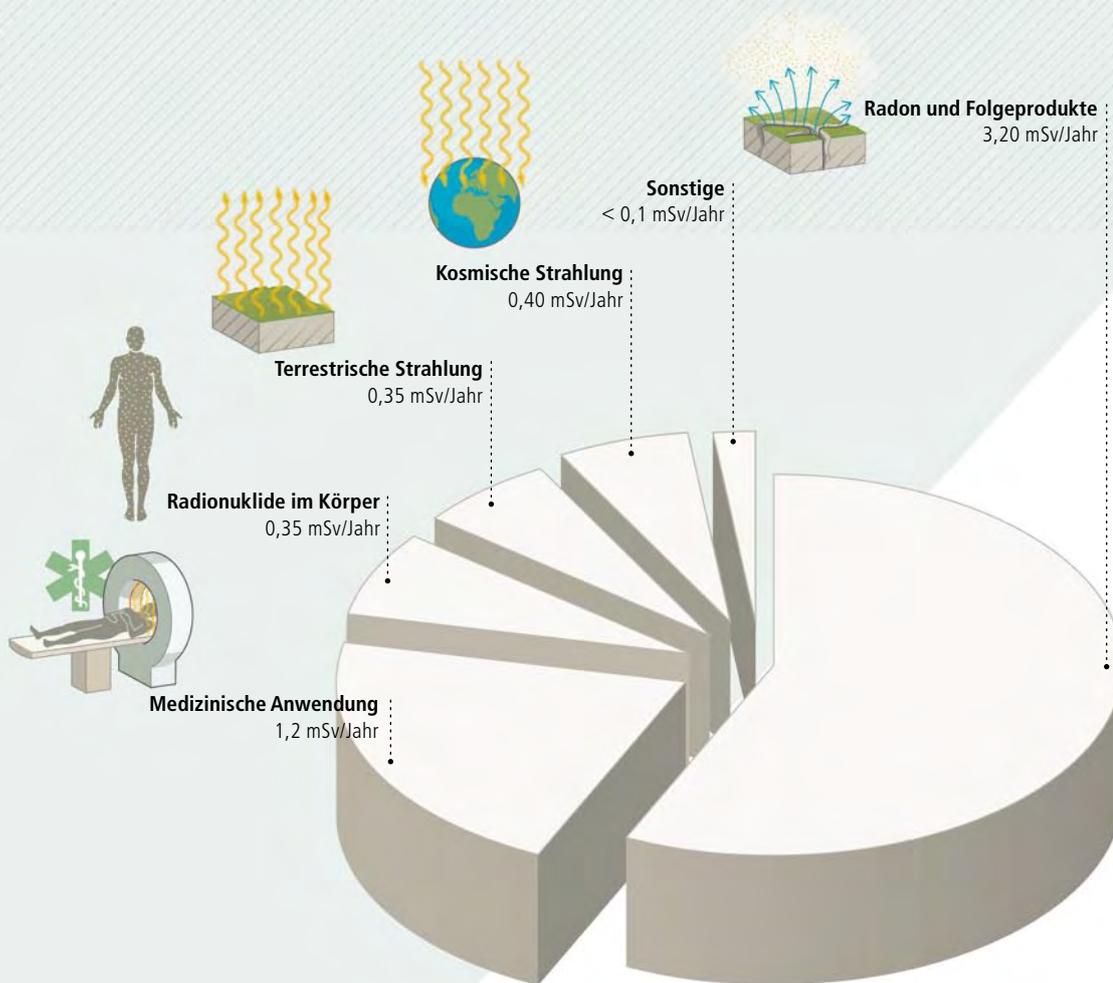
BAG (2010): Jahresberichte Umweltradioaktivität und Strahlendosen, Bundesamt für Gesundheit, Bern.

NTB 10-01: Beurteilung der geologischen Unterlagen für die provisorischen Sicherheitsanalysen in SGT Etappe 2, Nagra, Wettingen, 2010

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

Bewirkt ein Endlager ein erhöhtes Leukämie-Risiko für Kinder?

Die Direktstrahlung eines Tiefenlagers wird durch die darüber liegenden Gesteinsschichten abgeschirmt. Eine Strahlenbelastung kann daher nur durch Radionuklide entstehen, die langsam freigesetzt werden und über das Wasser an die Erdoberfläche gelangen. Die gesetzlichen Auflagen bestimmen, dass diese zusätzliche Strahlenbelastung nur einen Bruchteil der jährlichen natürlichen Strahlendosis ausmachen darf. In einer breit abgestützten Studie, der Canupis-Studie, wurde das Kinderkrebsrisiko in der Umgebung der bestehenden Schweizer Kernkraftwerke untersucht. Dabei wurden keine belastbaren Hinweise auf ein erhöhtes Risiko für strahlenverursachte Leukämie gefunden. Aufgrund der maximal zulässigen Strahlendosis ist auch für ein geologisches Tiefenlager kein signifikant erhöhtes Leukämie-Risiko zu erwarten. *Frage Nr. 39 Technisches Forum Sicherheit*



Unter Dauerbeschuss

Die Menschen sind ständig und überall ionisierender Strahlung ausgesetzt. So beträgt die durchschnittliche Jahresdosis der Schweizer Bevölkerung 5,5 Millisievert (mSv). Den grössten Anteil davon macht das natürlich vorkommende radioaktive Edelgas Radon und seine Folgeprodukte aus (3,2 mSv). 1,2 mSv gehen auf medizinische Anwendungen (Röntgen, Tomographie etc.) zurück. Kosmische und terrestrische Strahlung tragen 0,75 mSv zur Jahresdosis in der Schweiz bei. Natürlich vorkommende Radionuklide im Körper verursachen eine Dosis von 0,35 mSv pro Jahr. Weniger als 0,1 mSv stammen aus Kernanlagen. Auch ein Tiefenlager darf den Wert von 0,1 mSv pro Jahr nicht überschreiten.

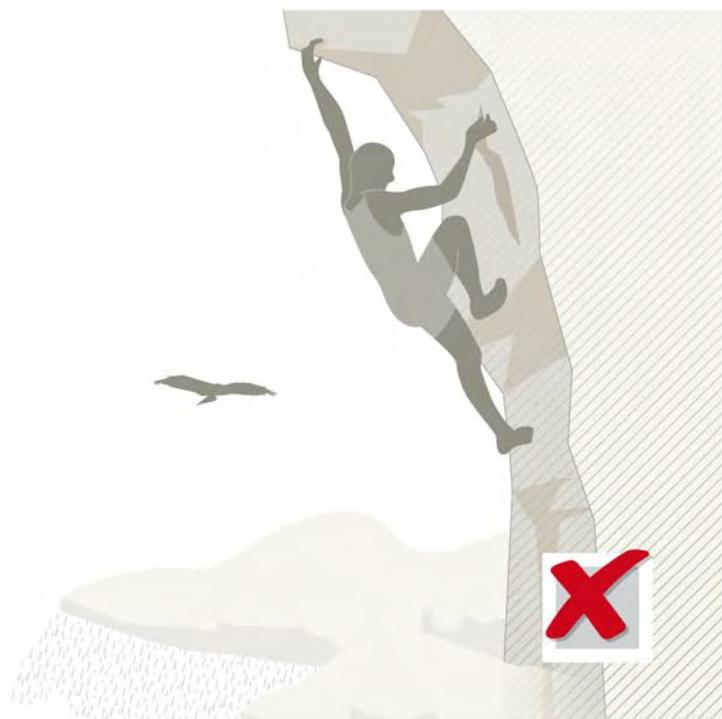
Sicherheit geht vor

Jeder Mensch hat ein unterschiedlich grosses Bedürfnis 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 tolerierbares 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 finanzielle Überlegungen werden den sicherheitstechnischen Anforderungen untergeordnet. Die grundsätzlichen Anforderungen eines Tiefenlagers sind im Kernenergiegesetz und in der Kernenergieverordnung

vorgegeben. Demnach müssen 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 Mehrfachbarrierenprinzip wirkt wie ein Sicherheitsnetz: Einzelne Fehler oder Schwächen einer Barriere werden durch die anderen abgefangen.

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 die Etappe 2 des Sachplanverfahrens hat das ENSI im Voraus dargelegt, wie der sicherheitstechnische Vergleich der Standorte durchgeführt werden soll.



Sicherheit wirkt wechselseitig: Indem das Tiefenlager vor schädlichen Einwirkungen geschützt wird, werden Mensch und Umwelt vor schädlichen Auswirkungen eines Tiefenlagers geschützt. Sicherheit ist aber auch ein Prozess und muss laufend verbessert und weiterentwickelt werden. Der in viele Zwischenschritte aufgeteilte lange Weg zu einem Tiefenlager kommt dem entgegen: Denn so können laufend neue Erkenntnisse aus Wissenschaft und Technik berücksichtigt werden.



HSK (2003): Sicherheit im Mittelpunkt, Broschüre Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen, Würenlingen.

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

ENSI 33/075: Anforderungen an die provisorischen Sicherheitsanalysen und den sicherheitstechnischen Vergleich, Sachplan geologische Tiefenlager Etappe 2, ENSI, Brugg, 2010.



Warum wurde bei der Festlegung der Standortgebiete eines künftigen Tiefenlagers die Frage der Sicherheit der Oberflächenanlagen bewusst ausgeblendet?

Die Anordnung der Oberflächenanlagen war nicht Gegenstand der Benennung potenzieller Standortgebiete im Rahmen von Etappe 1 des Sachplans. Die Identifizierung von Standortgebieten für die Tiefenlagerung erfolgte in Etappe 1 ausschliesslich aufgrund sicherheitstechnischer und geologischer Kriterien und bezieht sich auf die Sicherheit, die sich vor allem aus der Langzeitstabilität des geologischen Untergrunds ergibt. Die Sicherheit der Oberflächenanlagen wird in den weiteren Schritten des Verfahrens mehrfach geprüft, sobald konkrete Oberflächenanlagen vorgeschlagen sind. *Frage Nr. 9 Technisches Forum Sicherheit*

ENSI, CH-5200 Brugg, Industriestrasse 19, Telefon +41 (0)56 460 84 00, Fax +41 (0)56 460 84 99, info@ensi.ch, www.ensi.ch