



entsorgungs- programm

daran arbeiten wir

Entsorgungsprogramm – daran arbeiten wir

Dezember 2016

Portraitfotos

Maria Schmid

Herausgeber

Nagra

Nationale Genossenschaft für die Lagerung
radioaktiver Abfälle

Hardstrasse 73, Postfach 280, CH-5430 Wettingen

Telefon 056 437 11 11

Telefax 056 437 12 07

E-Mail info@nagra.ch

Internet www.nagra.ch

Blog www.nagra-blog.ch

Entsorgungsprogramm – daran arbeiten wir

Das Wichtigste in Kürze	5
Entsorgungsprogramm 2016	6 – 11
Sicherheit hat oberste Priorität	12 – 13
40 Jahre Nagra-Erfahrung	14 – 15
Wo stehen wir?	16 – 17
Wie geht es weiter?	18 – 19
Umgang mit Ungewissheiten	20 – 21
Forschungs- und Entwicklungsprogramm 2016	22 – 23
Arbeitsschwerpunkt: Radionuklid C-14	24 – 25
Arbeitsschwerpunkt: Gasbildung und -ableitung	26 – 27
Arbeitsschwerpunkt: alternative Behältermaterialien	28 – 29
Impressionen aus den Schweizer Felslaboren	30 – 31
Arbeiten in den beiden Schweizer Felslaboren	32 – 33
Langzeit-Diffusionsexperiment in Opalinuston	34 – 35
Experiment zur Korrosion in Bentonit	36 – 37
Experiment zu den technischen Barrieren	38 – 39
Einlagerungsexperiment im Lagerstollen für hochaktive Abfälle	40 – 41
Entsorgung ist auf gutem Weg	42
Zum Weiterlesen	43

Das Wichtigste in Kürze

- Das «Entsorgungsprogramm 2016 der Entsorgungspflichtigen» zeigt detailliert auf, wie die Entsorgung aller radioaktiven Abfälle der Schweiz geplant und umgesetzt wird.
- Die radioaktiven Abfälle werden in geologischen Tiefenlagern entsorgt. Mehrere Sicherheitsbarrieren bieten langfristigen Schutz für Mensch und Umwelt.
- Im Entsorgungsprogramm gibt die Nagra einen Überblick über alle Arbeiten, von der Zwischenlagerung bis hin zu Planung, Bau, Betrieb und Verschluss der geologischen Tiefenlager.
- Der «Sachplan geologische Tiefenlager» des Bundes regelt die Suche nach Standorten für geologische Tiefenlager in der Schweiz.
- Bis zur Einbringung der Abfälle in geologische Tiefenlager muss die Nagra ein aufwändiges Bewilligungsverfahren des Bundes, bestehend aus Rahmen-, Bau- und Betriebsbewilligung, durchlaufen.
- Die vom Bundesrat anerkannten Entsorgungsnachweise haben die technische Machbarkeit von geologischen Tiefenlagern in der Schweiz bestätigt.
- Die Nagra besitzt einen soliden technisch-wissenschaftlichen Kenntnisstand. Im Entsorgungskonzept sind die grundlegenden Fragen geklärt. Nun wird weiter optimiert.
- Die anstehenden Forschungs- und Entwicklungsarbeiten der Nagra zur weiteren Optimierung werden im Forschungs- und Entwicklungsprogramm 2016 dargelegt.

Entsorgungsprogramm 2016

Die Nagra erstellt im Auftrag der Abfallverursacher ein Entsorgungsprogramm. Dieses zeigt die Arbeitsschritte auf, die für die Entsorgung aller radioaktiven Abfälle der Schweiz notwendig sind. Es muss den Bundesbehörden vorgelegt und alle fünf Jahre aktualisiert werden.

Zweck des Entsorgungsprogramms

Das «Entsorgungsprogramm 2016 der Entsorgungspflichtigen» beschreibt das Entsorgungskonzept der Nagra und dokumentiert das grundsätzliche Vorgehen bei Planung, Bau, Betrieb und Verschluss der geologischen Tiefenlager. Es gibt den Rahmen für die langfristige Planung der geologischen Tiefenlager vor und zeigt auf, welche Entscheidungen wann erfolgen sollen, auf welchen Grundlagen sie basieren und wie diese erarbeitet werden. Das erste Entsorgungsprogramm wurde von der Nagra im Auftrag der Abfallverursacher erstellt, 2008 eingereicht und vom Bundesrat 2013 genehmigt. 2016 müssen die Entsorgungspflichtigen das aktualisierte Entsorgungsprogramm, das

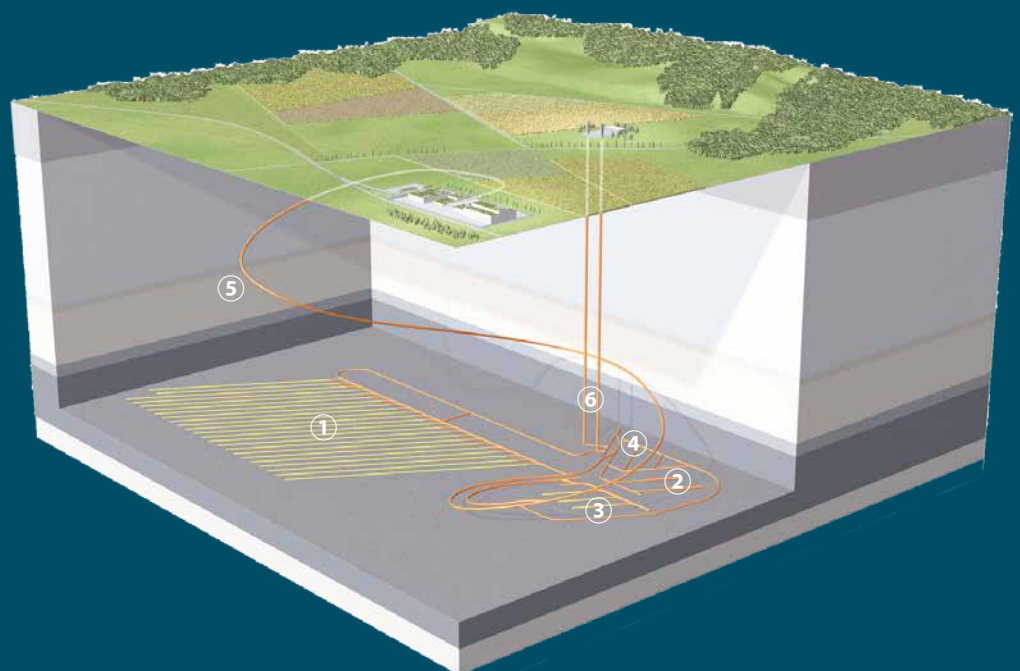
Forschungs- und Entwicklungsprogramm 2016 (vgl. Seiten 22 und 23) und eine Kostenstudie einreichen. Die Verantwortung für die Kostenstudie liegt bei swissnuclear.

Inhalt des Entsorgungsprogramms

Im Entsorgungsprogramm stehen Angaben über:

- Herkunft, Art und Menge der radioaktiven Abfälle
- die benötigten geologischen Tiefenlager einschliesslich ihres Auslegungskonzepts
- die Zuteilung der Abfälle zu den geologischen Tiefenlagern
- den Realisierungsplan für die Erstellung der geologischen Tiefenlager
- die Dauer und die benötigte Kapazität der zentralen und dezentralen Zwischenlagerung
- den Finanzplan für die Entsorgungsarbeiten bis zur Ausserbetriebnahme der Kernanlagen, mit Angaben über die zu tätigenen Arbeiten, die Höhe der Kosten und die Art der Finanzierung
- das Informationskonzept

Geologisches Tiefenlager für hochaktive Abfälle



Herkunft, Art und Menge der Abfälle

In der Schweiz stammen die radioaktiven Abfälle und Materialien aus der Nutzung der Kernenergie in Kernkraftwerken und aus Anwendungen in Medizin, Industrie und Forschung. Es gibt drei Abfallkategorien gemäss Kernenergieverordnung:

- **Hochaktive Abfälle (HAA)** umfassen abgebrannte Brennelemente (BE), die nicht weiter verwendet werden, sowie verglaste Spaltproduktlösungen aus der Wiederaufarbeitung von abgebrannten Brennelementen.
- **Alphatoxische Abfälle (ATA)** sind Abfälle, deren Gehalt an Alphastrahlern den Wert von 20 000 Becquerel/g konditioniertem Abfall übersteigt.
- **Schwach- und mittelaktive Abfälle (SMA)** sind alle anderen radioaktiven Abfälle.

Die Abfälle werden laufend für die Zwischenlagerung oder die geologische Tiefenlagerung vorbereitet, charakterisiert und inventarisiert. Vor-

hersagen zu zukünftigen Abfallmengen macht die Nagra auf der Basis eines modellhaften Inventars. Das Szenario mit den grössten Abfallvolumen geht von 60 Jahren Betrieb der Kernkraftwerke Beznau, Gösgen und Leibstadt sowie 47 Jahren Betrieb des Kernkraftwerks Mühleberg aus (vgl. Tabelle Seite 8). Es berücksichtigt absehbare neue Vorgaben durch die Strahlenschutzverordnung.

Geologische Tiefenlager & Abfallzuteilung

Radioaktive Abfälle müssen langfristig sicher entsorgt werden, ohne Mensch und Umwelt zu gefährden. Nur die geologische Tiefenlagerung erfüllt die hohen Sicherheitsanforderungen. In der



Zum Weiterlesen

Sie können das «Entsorgungsprogramm 2016 der Entsorgungspflichtigen» von unserer Website www.nagra.ch herunterladen.

Das geologische Tiefenlager

Die radioaktiven Abfälle der Schweiz werden in geologischen Tiefenlagern entsorgt. Diese bestehen aus Anlagen an der Erdoberfläche und Untertag.

Aufbau eines Tiefenlagers für hochaktive Abfälle

- ① **Hauptlager BE/HAA** Lagerstollen für verbrauchte Brennelemente und hochaktive Abfälle
- ② **Lager** Lagerkammern für langlebige mittelaktive Abfälle wie die alphatoxischen Abfälle
- ③ **Pilotlager** Kurzer Lagerstollen im geologischen Tiefenlager, in dem radioaktive Abfälle eingelagert werden. Das Pilotlager wird während der ganzen Betriebs- und Beobachtungsphase überwacht.
- ④ **Testbereich** Der Bereich dient dazu, die erforderlichen Daten für den Lagerbetrieb zu verifizieren.
- ⑤ **Zugangstunnel** Zugang von der Oberflächenanlage in das Tiefenlager; eine Erschliessung durch Schächte ist ebenso möglich.
- ⑥ **Lüftungsschacht und Bauschacht** Für den Bau und die Belüftung des Tiefenlagers angelegte Schächte

Schweiz ist sie gesetzlich vorgeschrieben; es soll grundsätzlich im Inland entsorgt werden. Die beiden vom Bundesrat anerkannten Entsorgungsnachweise der Nagra für SMA und HAA belegen, dass geologische Tiefenlager in der Schweiz grundsätzlich technisch machbar sind.

SMA und HAA besitzen unterschiedliche Eigenschaften und müssen daher in getrennten Lagerkammern entsorgt werden: in einem SMA- und einem HAA-Lager. Diese können an zwei verschiedenen Standorten oder aber als Kombilager am gleichen Standort erstellt werden.

Die Auslegung, d.h. Anordnung und Gestaltung, eines geologischen Tiefenlagers wird durch Art und Menge der Abfälle, das darauf abgestimmte Sicherheitskonzept, die Überwachung des Lagers und Vorgaben zu einer allfälligen Rückholung der Abfälle bestimmt. Ein geeigneter Tiefenlagerstandort muss Untertag in bevorzugter Tiefe ausreichend Platz für die Anordnung der Lageranlagen bieten. Das Wirtgestein Opalinuston, das die

Lagerkammern mit den Abfällen beherbergt, muss genügend mächtig sein und über intakte Barriereigenschaften verfügen. Mehrere gestaffelte Sicherheitsbarrieren schliessen die Abfälle ein.

Realisierungsplan für die Entsorgung

Die Nagra hat Realisierungspläne für ein SMA- und ein HAA-Lager erstellt (vgl. Seite 18). Diese listen die notwendigen Arbeiten bis zum Verschluss der geologischen Tiefenlager auf und beschreiben den grundsätzlichen Ablauf. Den Rahmen geben die gesetzlichen und behördlichen Vorgaben sowie das Entsorgungskonzept vor. Auch der abgeschätzte Zeitbedarf für die Bewilligungsverfahren und die Arbeiten der Nagra flossen ein. Nach den Rahmenbewilligungsverfahren muss die Nagra sowohl das Bau- wie auch das Betriebsbewilligungsverfahren durchlaufen. Der Realisierungsplan der Nagra geht von einer rechtsgültigen Rahmenbewilligung 2031 sowie von einer Betriebsaufnahme für das SMA-Lager 2050 und für das HAA-Lager 2060 aus.

		Herkunft						Total	
		BE (KKW)	WA (KKW)	BA (KKW)	RA (KKW)	SA (KKW)	MIF		BEVA
Kategorie nach KEV	HAA	1 357 (8 995)	114 (398)				8 (8)	1 479 (9 402)	
	ATA		99 (414)			24 (24)	168 (634)	291 (1 072)	
	SMA			8 326 (31 271)	478 (1 811)	18 839 (27 366)	14 222 (19 010)	651 (2 302)	42 516 (81 760)
	Total	1 357 (8 995)	213 (812)	8 326 (31 271)	478 (1 811)	18 863 (27 390)	14 398 (19 652)	651 (2 302)	44 286 (92 234)

Menge an radioaktiven Abfällen

Maximal zu erwartendes Volumen an konditionierten Abfällen sowie Volumen, bei denen diese konditionierten Abfälle zusätzlich in Endlagerbehältern verpackt sind (Zahlen in Klammern). Alle Angaben in Kubikmeter.

Zwischenlagerung der Abfälle

Bereits entstandene Abfälle aus Kernkraftwerken (Betriebsabfälle inkl. Reaktorabfälle) werden in Zwischenlagern vor Ort oder im zentralen Zwischenlager ZWILAG in Würenlingen zwischengelagert. Diese bieten ausreichend Kapazität für alle radioaktiven Abfälle aus den Schweizer Kernkraftwerken inklusive zukünftigen Stilllegungsabfällen aus dem Rückbau der Kernkraftwerke (vgl. Tabelle unten). Für die Tiefenlagerung vorgesehene Abfälle aus Medizin, Industrie und Forschung werden im Bundeszwischenlager in Würenlingen zwischengelagert und unterliegen der Verantwortung des Bundes. Damit alle bis 2065 erwarteten Abfälle aus Medizin, Industrie und Forschung zwischengelagert werden können, ist eine Erweiterung des Bundeszwischenlagers in Planung.

Finanzplan

Gemäss Kernenergiegesetzgebung gilt bei der Stilllegung von Kernanlagen und der Entsorgung von radioaktiven Abfällen aus diesen Anlagen das Verursacherprinzip: Die Eigentümer der Kernanlagen sind für die Stilllegung und Entsorgung verantwortlich und müssen die Kosten dafür vollumfänglich tragen. Zur Deckung der Kosten nach Ausserbetriebnahme der Kernanlagen zahlen sie jährlich in den Stilllegungs- und den Entsorgungsfonds ein. Die Fonds stehen unter Bundesaufsicht (siehe www.stenfo.ch). Die Entsorgungskosten, die vor Ausserbetriebnahme der Kernanlagen entstehen, bezahlen die Eigentümer direkt. Alle fünf Jahre werden die voraussichtlichen Kosten für die Stilllegung und Entsorgung in einer Kostenstudie neu berechnet (vgl. Tabelle Seite 10). Darauf basierend legt der Bund dann die Höhe der Beitragszahlungen neu fest. Um die Projektkosten der Entsorgung genau zu quantifizieren, macht die Nagra auch plausible modellhafte Annahmen, die

Abkürzungen

ATA	= Alphatoxische Abfälle
BA	= Betriebsabfälle von KKW und ZWILAG
BE	= Verbrauchte Brennelemente
BEVA	= Abfälle aus Betrieb und Stilllegung der Verpackungsanlagen sowie Entsorgung der Transport- und Lagerbehälter für BE
HAA	= Hochaktive Abfälle
KEV	= Kernenergieverordnung
KKW	= Kernkraftwerk
MIF	= Medizin, Industrie und Forschung
RA	= Reaktorabfälle der KKW
SA	= Stilllegungsabfälle von KKW und ZWILAG
SMA	= Schwach- und mittelaktive Abfälle
WA	= Abfälle aus der Wiederaufarbeitung von BE
ZWILAG	= Zentrales Zwischenlager für KKW-Abfälle

Radioaktive Abfälle konditionieren

Als Konditionieren werden die Arbeiten definiert, mit denen radioaktive Abfälle für die Zwischenlagerung oder für die Lagerung in einem geologischen Tiefenlager vorbereitet werden. Dazu zählen das mechanische Zerkleinern, das Dekontaminieren, das Verpressen, das Verbrennen, das Einbetten in schwer lösliches Glas oder in Zement sowie das Verpacken der radioaktiven Abfälle.

über den heutigen Planungsstand hinausgehen. Dabei greift sie aber Entscheiden nicht vor, die in der laufenden Standortsuche für geologische Tiefenlager oder den nachfolgenden Bewilligungsverfahren getroffen werden.

Informationskonzept

Die Informationsarbeit der Nagra hat zum Ziel, die Bevölkerung über Arbeiten, Projekte und Resultate der Untersuchungen sowie später über Bau und Betrieb der geologischen Tiefenlager zu informieren. Dabei werden die Gründe transparent dargelegt, warum es eine nukleare Entsorgung braucht und wozu die radioaktiven Abfälle in geologischen Tiefenlagern langfristig eingeschlossen werden. Die Gesellschaft soll sich eine objektive Meinung bilden können und die unterschiedlichen Rollen der beteiligten Akteure (vgl. Seiten 16 und 17) wahrnehmen und verstehen können.

Solider Kenntnisstand vorhanden

Im Entsorgungskonzept der Nagra sind die grundlegenden Fragen geklärt. Sie verfügt über einen soliden technisch-wissenschaftlichen Kenntnisstand. Die Entsorgungspflichtigen konnten zudem in vielen Bereichen der Entsorgung bereits während Jahren praktische Erfahrungen sammeln.

In Schritten zum Ziel

Bis zur Einlagerung der Abfälle muss die Nagra aufwändige Bewilligungsverfahren durchlaufen. Sie optimiert ihr Konzept weiter, verfeinert ihre Erkenntnisse und verringert Ungewissheiten (vgl. Seiten 20 und 21). Die Arbeitsthemen werden im Forschungs- und Entwicklungsprogramm 2016 festgelegt.

Parallel dazu führt die Nagra auch ihre Arbeiten für die laufende Standortsuche weiter. Diese dienen dem Bundesrat in den Rahmenbewilligungsverfahren als Basis für den Standortentscheid.

Themen	Kosten
Wiederaufarbeitung	2 762
Zwischenlagerung (ZWILAG) inklusive zentrale Abfallbehandlung	2 686
ZWIBEZ und KKG-Nasslager	156
Beschaffung Transport- und Lagerbehälter für BE/HAA	1 096
Transporte	299
SMA-Lager	3 361
HAA-Lager inklusive Verpackungsanlage für BE/HAA	7 630
Total Entsorgung	17 990
Stilllegung der Kernkraftwerke und Zwischenlager	3 406
Gesamttotal	21 396

Gesamtkosten der Entsorgung und Stilllegung

Beträge in Millionen Schweizer Franken, Preisbasis 2016. Die Kosten umfassen bereits getätigte Ausgaben sowie über die Fonds zu tätige Ausgaben. Entsorgungskosten für MIF-Abfälle sind nicht aufgeführt. Siehe auch Tabelle 7-1 im «Entsorgungsprogramm 2016 der Entsorgungspflichtigen». ZWIBEZ: Zwischenlager beim KKW Beznau, KKG: Kernkraftwerk Gösgen

In den Rahmenbewilligungsgesuchen (vgl. Kasten unten) legt die Nagra die Grundzüge des Projekts dar. Die konkrete Detailplanung muss sie erst in den späteren Bewilligungsschritten vorlegen. Der Kenntnisstand muss jeweils ausreichen, um notwendige Entscheide treffen zu können. Dieses schrittweise Vorgehen mit dem Offenhalten von Varianten ist charakteristisch für viele Länder, auch für die Schweiz. Dadurch ist genügend Flexibilität vorhanden, um auch zukünftige Informationen (Resultate aus den detaillierten Standortuntersuchungen, Erkenntnisgewinn durch Forschung und Entwicklung) oder allenfalls geänderte gesetzliche Rahmenbedingungen berücksichtigen zu können. Auch kann die Nagra von den Fortschritten anderer Entsorgungsorganisationen profitieren.

Die Auslegung der Anlagen muss erst für die Baubewilligung im Detail vorliegen. Bis zum Baubeginn werden im Untertagebau und bei der Automatisierung der Handhabung der radioaktiven Abfälle noch erhebliche technologische Entwicklungen stattfinden, die in die Lagertechnologie einfließen

werden. Davon wird auch die zu demonstrierende Rückholung der Abfälle aus dem Tiefenlager profitieren. Bis zur Betriebsbewilligung muss die Nagra mit Experimenten am Tiefenlagerstandort nachweisen, dass ihr Konzept funktioniert, insbesondere die Einlagerung der Abfälle.

Entsorgungsprogramm wird geprüft

Das Eidgenössische Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI) und das Bundesamt für Energie (BFE) prüfen das Ende 2016 eingereichte Entsorgungsprogramm und das Forschungs- und Entwicklungsprogramm der Nagra. Dann gibt die Kommission für Nukleare Sicherheit ihre Stellungnahme ab. Die öffentliche Vernehmlassung erfolgt voraussichtlich Mitte 2018. Der Bundesratsentscheid zu beiden Programmen wird Anfang 2019 erwartet.

Was ist ein Rahmenbewilligungsgesuch?

Geologische Tiefenlager sind Kernanlagen und benötigen daher eine Rahmenbewilligung des Bundesrats. Zum Erlangen der Rahmenbewilligung reicht die Nagra Rahmenbewilligungsgesuche ein. Diese beschreiben stufengerecht die Anlagen in ihren Grundzügen an den vorgeschlagenen Standorten. Mit der Rahmenbewilligung werden der Standort sowie die Grösse und die ungefähre Lage der wichtigsten Bauten festgelegt. Detaillierte Beschreibungen der Anlagen sowie von Prozessen und Technologien werden später im Rahmen des Baubewilligungs- respektive des Betriebsbewilligungsgesuchs benötigt.

Sicherheit hat oberste Priorität

Radioaktive Abfälle sind gemäss Kernenergiegesetz so zu entsorgen, dass der dauernde Schutz von Mensch und Umwelt gewährleistet ist. Sie müssen getrennt von unserem Lebensraum in geologischen Tiefenlagern entsorgt werden. Sicherheit hat bei der Standortsuche sowie bei der Planung, beim Bau und beim Betrieb der Tiefenlager oberste Priorität.

Schutz durch Sicherheitsbarrieren

Ein Tiefenlager wird am besten Standort gebaut. Für den zuverlässigen Einschluss der Abfälle im Tiefenlager sorgen mehrere sich ergänzende technische und geologische Sicherheitsbarrieren. Die Barrieren haben die Aufgabe, die Abfälle vor sicherheitsmindernden Einflüssen zu schützen und die Radionuklide so lange im Tiefenlager zurückzuhalten, bis sie auf natürliche Werte zerfallen sind. Für einen bestmöglichen Schutz stimmt die Nagra die Auslegung der Anlagen des Lagers sowie die Technologie für dessen Bau, Betrieb und Verschluss auf die Geologie und das Wirtgestein ab.

Zu den technischen Sicherheitsbarrieren gehören die Abfallmatrix, die Endlagerbehälter und die Verfüllung von Lagerstollen mit Bentonit und von Lagerkavernen mit Zementmörtel (vgl. Abbildung unten). Sämtliche radioaktiven Abfälle werden in fester, schwer löslicher Form ins Tiefenlager gebracht – z.B. in Zement oder Glas verfestigt (Abfallmatrix).

Die Geologie sorgt im Schweizer Sicherheitskonzept für langfristige Stabilität und trägt erheblich zur Rückhaltung der radioaktiven Stoffe im Tiefenlager bei. Tief unter dem Erdboden gibt es Gesteinsschichten, die über viele Jahrtausende stabil bleiben, ihre Eigenschaften behalten und sich als geologische Barriere zum Einschliessen der Abfälle eignen. In der Schweiz werden die Lagerstollen und -kavernen des geologischen Tiefenlagers im sehr geringdurchlässigen Opalinuston gebaut; man bezeichnet ihn deshalb als Wirtgestein. Der Opalinuston ist rund 175 Millionen Jahre alt.



© Comet Photoshopping, Dieter Enz

Das Tongestein Opalinuston ist äusserst geringdurchlässig. In der Schweiz ist es die geologische Sicherheitsbarriere eines SMA- und HAA-Tiefenlagers.



© Comet Photoshopping, Dieter Enz

Mit Zementmörtel ausgegossene Endlagercontainer aus Beton enthalten die Endlagerfässer und bilden eine der technischen Sicherheitsbarrieren des SMA-Tiefenlagers.

Mass an erreichbarer Sicherheit

Für die Einreichung der Rahmen-, Bau- und Betriebsbewilligungsgesuche muss die Nagra je einen Sicherheitsnachweis erstellen. Darin zeigt sie auf, dass ein Tiefenlager bautechnisch machbar ist, sicher betrieben werden kann und für lange Zeit Schutz bietet. Ebenso legt sie das Mass an erreichbarer Sicherheit, offene Punkte und allfällige Ungewissheiten dar. So kann die Nagra das Einhalten der behördlich vorgegebenen Sicherheitsanforderungen aufzeigen. Mit einer weiteren Optimierung der sicherheitsrelevanten Aspekte kann sie das Mass an Sicherheit zusätzlich erhöhen. Das ENSI schreibt diese Optimierungen vor.

Sichere Tiefenlager sind möglich

Die Nagra hat bereits Sicherheitsnachweise durchgeführt, zum Beispiel die beiden Entsorgungsnachweise für SMA und HAA, die vom Bundesrat 1988 respektive 2006 anerkannt wurden.

Auch die Sicherheitsanalysen in der laufenden Standortsuche haben bestätigt, dass in der Schweiz sichere Tiefenlager unter Einhaltung der behördlich geforderten Schutzziele und -kriterien möglich sind. Die maximale Strahlendosis, die durch ein Tiefenlager zusätzlich für die Bevölkerung entstehen darf, liegt bei 0,1 Millisievert pro Jahr (Schutzkriterium, Richtlinie ENSI-G03). Dies entspricht rund einem Fünfzigstel der durchschnittlichen Strahlenbelastung pro Jahr, der eine Person in der Schweiz heute ausgesetzt ist.

Ein Tiefenlager darf erst verschlossen werden, wenn nachgewiesen wurde, dass es passiv sicher ist. Dann erfüllt es seine Schutzfunktion, ohne dass die Abfälle überwacht werden müssen und der Mensch eingreifen muss. Kann die passive Sicherheit nicht nachgewiesen werden, müssen die Abfälle aus dem Tiefenlager zurückgeholt werden.



© Comet Photoshopping, Dieter Enz

Bentonit-Granulat kann Wasser aufnehmen und quillt dabei auf. Als Stollenverfüllung ist es eine der technischen Sicherheitsbarrieren des HAA-Tiefenlagers.



© Comet Photoshopping, Dieter Enz

Modell des teilweise verfüllten Stollens eines HAA-Tiefenlagers: Der Endlagerbehälter liegt auf einem Bentonit-Block und enthält die verbrauchten Brennelemente.

40 Jahre Nagra-Erfahrung





© Comet Photoshopping, Dieter Enz



© Comet Photoshopping, Dieter Enz



© Nagra

- 1 Nagra-Tiefbohrprogramm in der Nordschweiz (Schafisheim)
- 2 Bohrungen für Entsorgungsnachweis SMA (Oberbauenstock, 1986/87)
- 3 Sondierbohrung (Wellenberg, 1992/93)
- 4 3D-Seismik für Entsorgungsnachweis HAA (Weinland ZH, 1996/97)
- 5 Untersuchung des Gasflusses (Felslabor Grimsel, 2000/01)
- 6 Castor-Transport ins Zwischenlager (Würenlingen, 2008)
- 7 Geofonauslage für die 2D-Seismik (Standortgebiet Jura Ost, 2012)
- 8 Vermessungsarbeiten für die 3D-Seismik (2015/16)

Wo stehen wir?

Die Suche nach Standorten für geologische Tiefenlager erfolgt gemäss «Sachplan geologische Tiefenlager» des Bundes. Die Nagra erkundet den geologischen Untergrund und liefert eine Entscheidungsgrundlage für den Bundesrat.

Bester Standort wird ermittelt

Um in der Schweiz den am besten geeigneten Standort für ein geologisches Tiefenlager zu ermitteln, ist der geologische Untergrund systematisch untersucht worden. Dies mit verschiedenen Erkundungsmethoden wie Seismik oder Sondierbohrungen. Laufende und zukünftige Erkundungen ergänzen den Kenntnisstand der Nagra weiter.

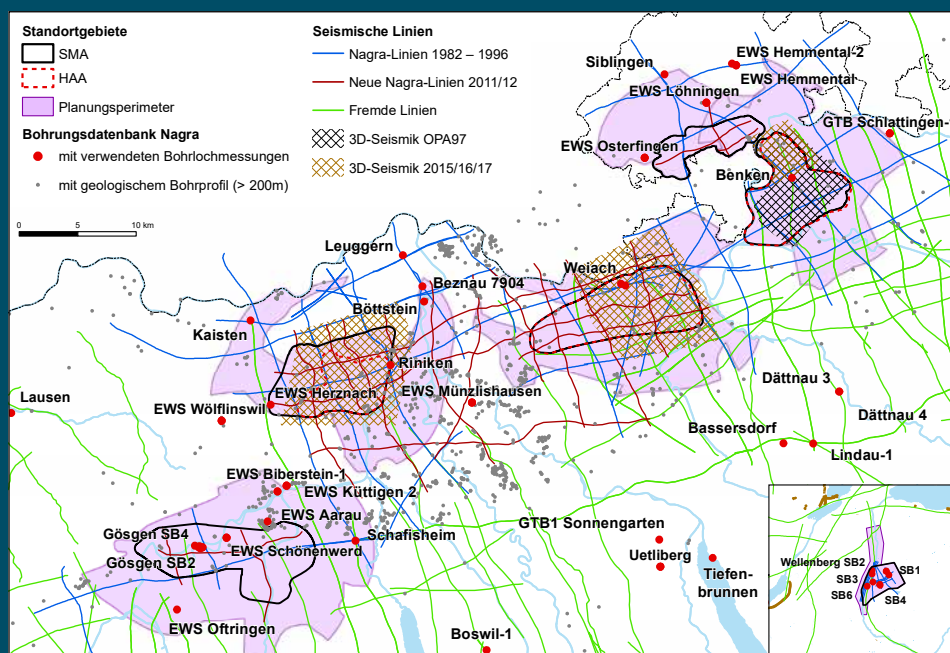
Sachplan regelt Standortwahl

Die Standortwahl verläuft in drei Etappen nach dem «Sachplan geologische Tiefenlager (SGT)» des Bundes. Von Etappe zu Etappe steigt der Erkenntnisgewinn, was zur Eingrenzung der Standortgebiete führt, die für ein Tiefenlager in Frage kommen.

Am Ende wird je ein Standort für ein HAA- und ein SMA-Lager oder aber ein gemeinsamer Standort für beide Abfalltypen benötigt. Die Rollen im Sachplanverfahren sind klar verteilt: In jeder Etappe erarbeitet die Nagra die notwendigen technischen und wissenschaftlichen Grundlagen für ihre Vorschläge zuhanden des verfahrenleitenden BFE. Das ENSI als Aufsichtsbehörde und die Expertengruppe Geologische Tiefenlagerung (EGT) prüfen die Vorschläge. Dann folgt eine öffentliche Vernehmlassung. Entscheide fällt der Bundesrat, der von der Eidgenössischen Kommission für Nukleare Sicherheit (KNS) beraten wird. Das BFE wird von den Bundesämtern für Raumentwicklung (ARE) und Umwelt (BAFU) unterstützt. Es stellt auch im Rahmen der regionalen Partizipation die Mitsprache in den Standortregionen sicher.

Resultate aus Etappe 1

In Etappe 1 (2008 bis 2011) schlug die Nagra auf der Grundlage von gesetzlichen und behördlichen Vorschriften sowie den vom ENSI vorgegebenen



Erkundungen des geologischen Untergrundes der Schweiz mittels Seismik und Sondierbohrungen

Sicherheitskriterien Standortgebiete für ein HAA- und ein SMA-Lager vor: Zürich Nordost, Nördlich Lägern und Jura Ost; zusätzlich für ein SMA-Lager: Südranden, Jura-Südfuss und Wellenberg. Nach gründlicher Prüfung entschied der Bundesrat Ende 2011, alle sechs möglichen Standortgebiete in das weitere Verfahren aufzunehmen.

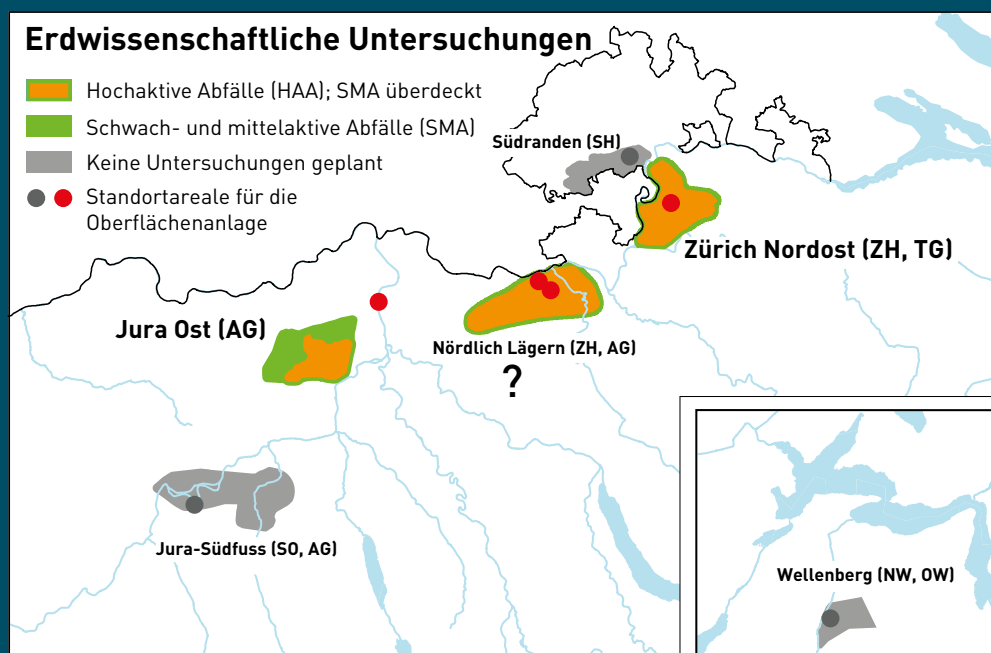
Resultate aus Etappe 2

In Etappe 2 vertiefte die Nagra ihren Kenntnisstand mit Experimenten aus Felslaboren sowie Erkundungen des geologischen Untergrunds in den Standortgebieten – beispielsweise mit seismischen Messungen. Für jedes Standortgebiet erstellte sie eine provisorische Sicherheitsanalyse und verglich diese miteinander. Auf der Basis des sicherheitstechnischen Vergleichs schlug die Nagra dann Anfang 2015 vor, die Standortgebiete Jura Ost und Zürich Nordost in Etappe 3 vertieft zu untersuchen und Südranden, Nördlich Lägern, Jura-Südfuss und Wellenberg im Verfahren zurückzustellen. Zudem schlug sie Opalinuston als

einziges Wirtgestein vor und bezeichnete in Zusammenarbeit mit den Regionen in jeder Standortregion mindestens ein Standortareal für die Oberflächenanlage eines geologischen Tiefenlagers.

Zusatzdokumentation eingereicht

Im Sommer 2016 musste die Nagra dem ENSI eine Zusatzdokumentation nachliefern. Diese beinhaltet Betrachtungen zur Sicherheit und bautechnischen Machbarkeit beim Erstellen eines Tiefenlagers in Opalinuston in grosser Tiefe. Diese Thematik ist für die von den Bundesbehörden zu beurteilende Frage relevant, ob auch das Standortgebiet Nördlich Lägern in Etappe 3 weitergezogen werden muss. Im Frühjahr 2017 wird das Gutachten des ENSI zu den Vorschlägen der Nagra zu Etappe 2 erwartet. Der Bundesratsentscheid dazu folgt nach einer öffentlichen Vernehmlassung Ende 2018.



© Nagra

In Etappe 2 hat die Nagra basierend auf ihren Untersuchungen und den Ergebnissen des sicherheitstechnischen Vergleichs die Standortgebiete Zürich Nordost und Jura Ost für die weiteren Untersuchungen für Etappe 3 vorgeschlagen.

Wie geht es weiter?

In **Etappe 3 des Sachplans** werden die verbleibenden Standortgebiete vertieft erdwissenschaftlich untersucht. Dann folgen die Rahmenbewilligungsverfahren, das Bau- und das Betriebsbewilligungsverfahren.

3D-Seismik und Sondierbohrungen

Die Nagra untersucht für Etappe 3 die verbleibenden Standortgebiete mit Untersuchungsmethoden wie 3D-Seismik und Sondierbohrungen. Die 3D-Seismik ermöglicht ein räumliches Abbild der Gesteinsschichten im geologischen Untergrund. Sie wurde für Etappe 3 bereits im Winter 2015/16 in den Standortgebieten Jura Ost und Zürich Nordost durchgeführt. Um für alle Fälle gerüstet zu sein und allfällige Verzögerungen zu vermeiden, findet von Oktober 2016 bis Februar 2017 auch in Nördlich Lägern eine 3D-Seismik statt.

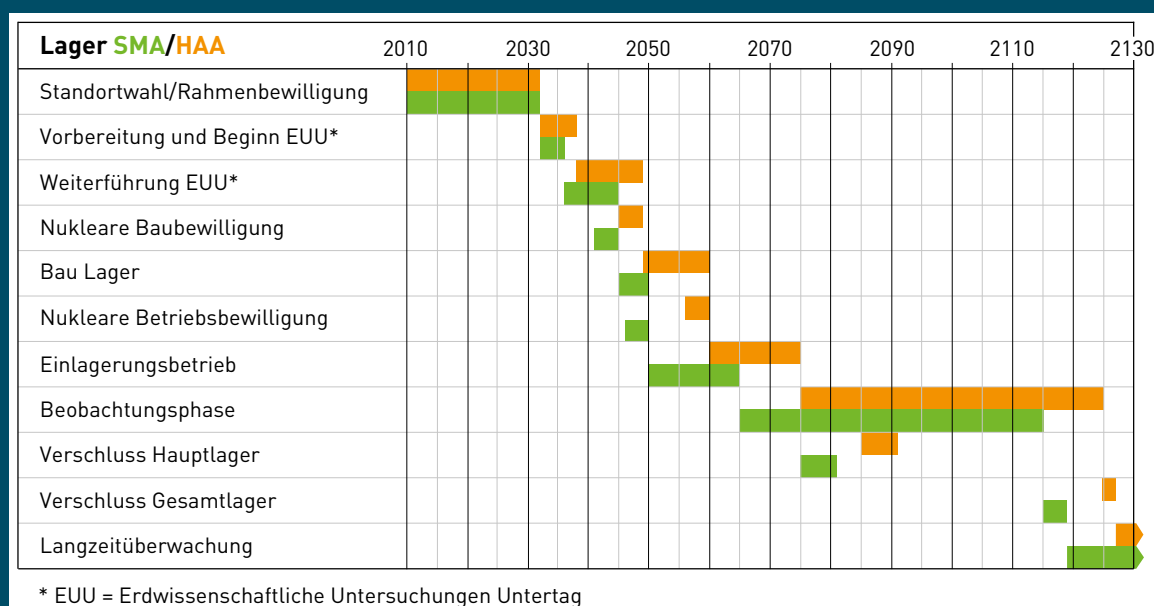
Sondierbohrungen liefern umfassende Informationen zu Wirtgesteinseigenschaften und wasserführenden Schichten. Sie dienen zur Eichung der

Seismik. Die Sondierbohrungen erfordern eine Bewilligung durch das Eidgenössische Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK). Damit die Nagra nach dem auf Ende 2018 zu erwartenden Bundesratsentscheid zu Etappe 2 mit Sondierbohrungen beginnen kann, hat sie beim UVEK bereits im September 2016 Sondiergesuche für Jura Ost und Zürich Nordost eingereicht. Auch mit der Ausarbeitung von Sondiergesuchen für das Standortgebiet Nördlich Lägern wurde begonnen.

Nächstes Ziel: Rahmenbewilligung

Die Realisierungspläne für das SMA- und HAA-Lager (vgl. Abb. unten) verdeutlichen, dass die Nagra ein dreistufiges Bewilligungsverfahren durchlaufen muss, bevor sie die radioaktiven Abfälle in den geologischen Tiefenlagern einlagern kann.

Den Anfang bilden die Rahmenbewilligungsverfahren. Nach Abschluss und Auswertung der 3D-Seismik und der Sondierbohrungen schlägt die



© Nagra

Realisierungsplan für das SMA- und HAA-Lager gemäss heutiger Planung

Nagra circa 2022 die am besten geeigneten Tiefenlagerstandorte bezüglich Sicherheit vor. Für diese arbeitet sie Rahmenbewilligungsgesuche aus, die sie circa 2024 einreicht. Nach Prüfung durch die Sicherheitsbehörden befinden Bundesrat und Parlament darüber. Der Parlamentsentscheid untersteht dem nationalen fakultativen Referendum. Wird dieses ergriffen, entscheiden die Schweizer Stimmberechtigten über die Rahmenbewilligungs-

gesuche (ca. 2031). Nach Erhalt der Rahmenbewilligung steht fest, wo das SMA- und das HAA-Lager gebaut werden sollen. Dort werden mit erdwissenschaftlichen Untersuchungen Untertag in Sondierstollen und -schächten die sicherheitsrelevanten Aspekte verifiziert. Ebenso werden die vorbereitenden Arbeiten zum Beantragen der Bau- und der Betriebsbewilligung für die Tiefenlager durchgeführt.



© Nagra

Im Bild der Bohrplatz der Sondierbohrung Weiach, wo die Nagra 1983 eine Sondierbohrung durchführte.

Umgang mit Ungewissheiten

Im Entsorgungskonzept der Nagra sind die **Schlüsselfragen** beantwortet. **Ungewissheiten** gibt es noch bei Teilaspekten, die heute mit **konservativen Annahmen abgedeckt** sind. **Durch Forschung und Entwicklung können Ungewissheiten weiter reduziert werden. Zeit dafür ist da.**

Irina Gaus, Gesamtprojektleiterin Forschung & Entwicklung, erklärt im Interview, wie die Nagra mit Ungewissheiten umgeht.

Wie kann ein Tiefenlager optimiert werden?

Irina Gaus: Von jedem Bestandteil des geologischen Tiefenlagers müssen wir die sicherheitsrelevante Funktion definieren und zu erfüllende Anforderungen festlegen. Bis zur Betriebsbewilligung gehen wir weiter ins Detail, bis alle Lagerbestandteile, Prozesse und Technologien erfasst sind. Auch für Optimierungen benötigen wir diese Informationen. Die Bestandteile werden später so gebaut, dass sie die Anforderungen erfüllen. Je besser Anforderungen erfüllt werden, desto robuster ist ein Tiefenlager gegen Einflüsse.

Wie geht ihr mit Ungewissheiten um?

In unserem Entsorgungskonzept haben wir verbleibende Ungewissheiten identifiziert und adressieren sie im Forschungs- und Entwicklungsprogramm. Generell lassen sich Ungewissheiten und mögliche Auswirkungen durch eine konservative Behandlung unter Einbezug ausreichend grosser Sicherheitsreserven abdecken. Durch das mehrstufige Bewilligungsverfahren haben wir aber genügend Zeit, um mit Forschungs- und Entwicklungsarbeit Ungewissheiten weiter zu reduzieren. Je genauer die Erkenntnisse sind, desto kleiner wird das Mass an Ungewissheit, das konservativ abgedeckt werden muss. Hinsichtlich Einreichung der Rahmenbewilligungsgesuche gibt es keine grossen Ungewissheiten mehr.

Gibt es verschiedene Arten von Ungewissheiten?

Insgesamt gibt es drei Arten: Erstens potenzielle Ungewissheiten, die wir umgehen oder vermeiden können. Zweitens potenzielle Ungewissheiten, die sich nicht vermeiden lassen, deren Auswirkungen wir aber mit zusätzlicher Entwicklungs- und Inge-



© Comet Photoshopping, Dieter Enz

Die Verfüllmaschine ist ein gutes Beispiel für stetige Optimierungen. Die praktischen Erfahrungen zeigten, dass Bentonit mit Hilfe von fünf Schneckenförderern homogen in einen Stollen eingebracht werden kann. Dies gelang mit älteren Einbringtechniken noch nicht so gut.



«Mit unserer zielgerichteten Forschungs- und Entwicklungsarbeit optimieren wir die Sicherheit der Schweizer Tiefenlager weiter.»

Dr. Irina Gaus, Hydrogeologin
Gesamtprojektleiterin Forschung & Entwicklung

nieursarbeit in den Griff bekommen. Drittens gibt es auch Ungewissheiten, die wir weder vollständig vermeiden noch ihre Auswirkungen vollständig abschwächen können.

Wie umgeht ihr Ungewissheiten der ersten Art?

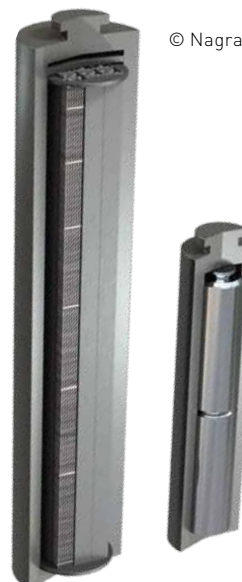
Durch eine vorausschauende Standortwahl, ein geschicktes Lagerkonzept oder die Bevorzugung erprobter Technologien und Materialien können wir bereits ein hohes Sicherheitsniveau erreichen. Bei der Standortsuche für ein HAA-Lager haben wir den Alpenraum mit den hohen Hebungsraten ausgeschlossen. Oder wir vermeiden im Tiefenlager den Einsatz von Werkstoffen, die einen negativen Effekt auf die Sicherheitsbarrieren haben.

Warum ist die Bildung von Wasserstoffgas in einem Tiefenlager eine Ungewissheit zweiter Art?

Weil sich die Gasbildung bei der Korrosion von Stahl nicht vermeiden lässt. Wir haben die Gasbildung und -ableitung aber im Griff: Gas fließt im Tiefenlager entlang der Stollenwände ab. Durch den Einbau gasdurchlässiger Siegel können wir es zudem direkt durch einen verfüllten Stollen ableiten und ein potenzielles Risiko noch weiter minimieren. Auch die Abgabe der Nachzerfallswärme verbrauchter Brennelemente lässt sich nicht verhindern. Durch ausreichend Abstand zwischen den Endlagerbehältern in den Lagerstollen und zwischen den Lagerstollen kann der Opalinuston aber die Wärme ohne Beeinträchtigung der Einschlussfähigkeit aufnehmen.

Wie handhabt ihr Ungewissheiten der dritten Art?

Bei den Ungewissheiten dritter Art müssen wir die Auswirkungen besonders detailliert untersuchen und den Einfluss auf Langzeitsicherheit, Betriebssicherheit oder technische Machbarkeit eines Tiefenlagers analysieren. Durch Erkenntnisse aus zusätzlichen Experimenten und Modellrechnungen können wir allfällige Konsequenzen weiter eingrenzen und so eine höhere Sicherheit aufzeigen. Ein Beispiel ist die glaziale Erosion: Wir haben vertieft abgeklärt, welche Auswirkungen die glaziale Erosion hat und welche Massnahmen ergriffen werden können, damit sie das Tiefenlager nicht beeinträchtigen. Baumaterialien stoppen keinen vorrückenden Gletscher. Man kann aber den Standort geschickt wählen, um ihm aus dem Weg zu gehen. Ebenfalls haben wir beurteilt, was wäre, wenn unter extremen oder höchst unwahrscheinlichen Umständen das Tiefenlager trotzdem beeinflusst würde.



Auch die Materialien der Endlagerbehälter werden optimiert. Derzeit ist Stahl vorgesehen. Mehr dazu auf den Seiten 28 und 29.

Forschungs- und Entwicklungspr

Zielgerichtet arbeitet die Nagra auf den Bau der geologischen Tiefenlager hin und optimiert ihr bestehendes Konzept weiter. Das Forschungs-, Entwicklungs- und Demonstrationsprogramm «RD&D-Plan» ist dazu eine wichtige Planungsgrundlage und enthält alle relevanten Arbeitsschwerpunkte. Die Nagra pflegt in der Forschung und Entwicklung eine enge Zusammenarbeit mit Partnern im In- und Ausland.

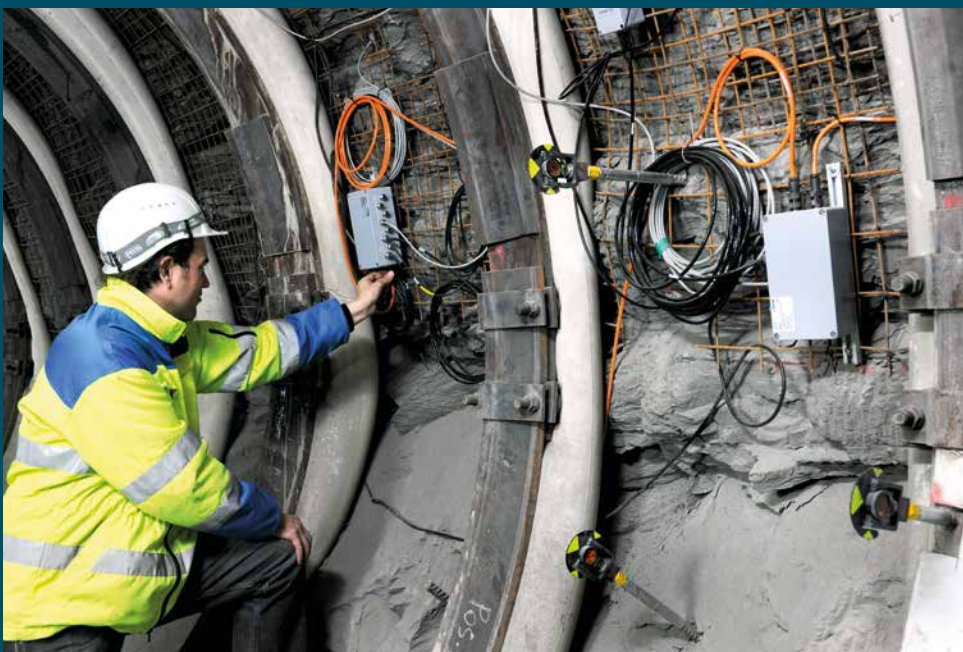
Wichtige Planungsgrundlage

Im RD&D-Plan stellt die Nagra den Zweck, den Umfang, die Art und die Zeitdauer der verschiedenen zukünftigen Arbeiten zu Forschung, Entwicklung und Demonstration detailliert dar. Sie ergeben sich aus dem festgelegten Entsorgungskonzept und dem Realisierungsplan. Ebenfalls wird der Umgang mit verbleibenden Ungewissheiten dargelegt und es wird beschrieben, mit welchen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten diese weiter untersucht und reduziert werden.

Die Nagra hat 2009 das erste Programm publiziert. Sie kann damit den Sicherheitsbehörden aufzeigen, dass sie den aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik berücksichtigt und dass ihre Pläne zielgerichtet sind. 2016 muss die Nagra den RD&D-Plan erstmals zusammen mit dem Entsorgungsprogramm den Bundesbehörden vorlegen. Danach hat sie die beiden Dokumente alle fünf Jahre zu aktualisieren.

Schwerpunkte der Arbeiten

Die Arbeiten decken ein breites Spektrum von Themen ab; dazu gehören Fragen zur Geologie, zur Sicherheit und zu sicherheitsrelevanten Phänomenen und Prozessen. Auch zu den radioaktiven Abfällen, zu den technischen Barrieren sowie zum Verschluss der geologischen Tiefenlager finden Forschungs- und Entwicklungsarbeiten statt. Auf den folgenden Seiten dieses Themenhefts finden Sie einige Beispiele.



© Comet Photoshopping, Dieter Enz

Im Mont Terri bei St-Ursanne im Kanton Jura liegt eines der beiden Schweizer Felslabore. Dort laufen verschiedene Experimente, die den Opalinuston als Wirtsgestein für ein zukünftiges geologisches Tiefenlager für radioaktive Abfälle untersuchen.

ogramm 2016

Die Arbeiten betreffen Themen wie:

- Gastransport und -ableitung im Tiefenlager; Reduktion der Gasbildung z.B. durch Verwenden alternativer Behältermaterialien
- Transporteigenschaften ausgewählter Radionuklide in den Barrieren eines Tiefenlagers
- Design und Verhalten der technischen Barrieren; Laborversuche und Messungen für eine noch exaktere Bestimmung der Korrosionsraten von Stahl; Einfluss von Mikroorganismen
- Auswirkung von thermo-, hydro-, mechanisch- und chemisch-gekoppelten Prozessen auf das Wirtgestein
- Überwachung eines Tiefenlagers

Die Nagra sieht weitere geologische Untersuchungen vor: zur Charakterisierung des geologischen Untergrunds in den Standortgebieten und zur Verfeinerung des Verständnisses sicherheitsrelevanter Prozesse im Wirtgestein wie die Selbstabdichtung von Opalinuston. Auch die geologische Langzeitentwicklung bezüglich Erosion und Klimaentwicklung wird studiert.

Zusammenarbeit mit Partnern

Die Nagra vergibt auch Arbeiten an Auftragnehmer, die über spezifisches Fachwissen, erfahrene Mitarbeitende und die notwendige Infrastruktur wie Labore verfügen. Mit etablierten und wissenschaftlich unabhängigen Kompetenzzentren pflegt sie eine langjährige Zusammenarbeit: Labor für Endlagersicherheit am Paul Scherrer Institut (PSI), Labor für Radio- und Umweltchemie der Universität Bern und des PSI, ETH Zürich, ETH Lausanne etc. Auch mit anderen Entsorgungsorganisationen arbeitet die Nagra an Projekten, beispielsweise in Felslaboren.

Mitarbeit in internationalen Gremien

Die Nagra beteiligt sich an EU-Forschungsprogrammen wie «Horizon 2020» und ist in internationalen Beratungsgremien und Arbeitsgruppen aktiv, beispielsweise:

- in Expertengruppen der Internationalen Atomenergie-Organisation (IAEA)
- in Arbeitsgruppen und Projekten der «Nuclear Energy Agency» (NEA) zu technisch-wissenschaftlichen und gesellschaftlichen Aspekten der Entsorgung
- im EDRAM-Interessenverbund (International Association for Environmentally Safe Disposal of Radioactive Materials) der weltweit führenden Entsorgungsorganisationen



www

Zum Weiterlesen

Sie können «The Nagra Research, Development and Demonstration (RD&D) Plan for the Disposal of Radioactive Waste in Switzerland» von unserer Website www.nagra.ch auf Englisch herunterladen.

Arbeitsschwerpunkt: Radionuklid

Dosisberechnungen zeigen, dass von einem Tiefenlager auch unter ungünstigsten Bedingungen keine Gefahr für Mensch und Umwelt ausgeht. Dazu braucht es Messdaten, die beschreiben, wie schnell die einzelnen Radionuklide beispielsweise durch Opalinuston migrieren. Von vielen Radionukliden sind solche Messdaten bereits vorhanden; erstmals auch zum Radionuklid C-14.

Sicherheitsbarrieren halten zurück

Die chinesische Doktorandin Yanhua Chen arbeitet am Labor für Endlagersicherheit des Paul Scherrer Instituts in Würenlingen. Sie untersucht für die Nagra die Wechselwirkung von bestimmten Radionukliden mit dem Tongestein Opalinuston. Dieser ist die natürliche Sicherheitsbarriere eines geologischen Tiefenlagers. Radionuklide breiten sich nur sehr langsam durch den Opalinuston aus. Wechselwirken sie mit den in Opalinuston enthaltenen Tonmineralien wie Illit und Kaolinit, werden sie zurückgehalten und migrieren noch langsamer.

Radionuklid C-14 im Fokus

«Ich habe das Radionuklid C-14 untersucht, das in einfachen organischen Verbindungen wie Carbon säuren und Alkoholen gebunden wird», erklärt Yanhua Chen. «Diese Verbindungen entstehen im Tiefenlager bei der Freisetzung von C-14 infolge der Korrosion von Metallen aus Kernreaktoren.» Dort ist das C-14 durch Neutronenbestrahlung aus Stickstoff während des Reaktorbetriebs entstanden. Da das radioaktive C-14 eine Halbwertszeit von «nur» 5730 Jahren habe, könne es nahezu vollständig in der Tiefe zerfallen, bevor es an die Erdoberfläche gelange. «Damit dies geschieht, genügt bereits eine schwache Wechselwirkung der C-14-enthaltenden organischen Verbindungen mit den Tonmineralien, die in Opalinuston enthalten sind», sagt die junge Forscherin. Bis anhin gab es weltweit noch keine Messwerte für C-14. Die Nagra musste bisher in ihren Dosisberechnungen daher annehmen, dass es bei C-14 keine solche Wechselwirkung gibt und konservativ mit einer grossen Sicherheitsmarge rechnen.



© Nagra

Yanhua Chen bereitet im Labor einen neuen Versuch vor.

C-14

Schwache Wechselwirkung vorhanden



«Ich konnte mir hier viel Wissen zu Sicherheitsanalysen aneignen. Nach meiner Rückkehr nach China möchte ich dort meine Erkenntnisse einbringen und zur sicheren Entsorgung der radioaktiven Abfälle Chinas beitragen.»

Yanhua Chen, Umweltingenieurin
Doktorandin am Paul Scherrer Institut

einer unabhängigen Überprüfung standhalten, können sie in die Dosisberechnungen der Nagra einfließen», sagt Yanhua Chen stolz. Dies bedeutet, dass die Nagra dann den von Yanhua Chen ermittelten Messwert verwenden wird und für diesen Aspekt nicht mehr konservativ rechnen muss.

«Sowohl in meinen Experimenten mit den reinen Tonmineralien Illit und Kaolinit als auch mit Opalinuston selbst konnte ich eine solche schwache Wechselwirkung nachweisen», fasst die Forscherin zusammen. Dies ist relevant für die Dosisberechnungen der Nagra, mit denen gezeigt wird, dass durch das Tiefenlager nie eine Gefahr für die Bevölkerung entsteht. «Wenn die von mir ermittelten Messwerte für das Radionuklid C-14



© Nagra

Yanhua Chen (rechts) zeigt Jens Mibus (Projektmanager Sicherheitsanalysen, Nagra) ihre Versuchsanlage, in der sie mit Opalinuston forscht.

Arbeitsschwerpunkt: Gasbildung

Untersuchungen zur Gasbildung und -ableitung in einem geologischen Tiefenlager sind ein Arbeitsschwerpunkt im Forschungs- und Entwicklungsprogramm der Nagra. Die Ergebnisse zeigen, dass sich Gas gut ins umliegende Gestein ableiten lässt. Andere Aspekte wie die Gasbildung beim Abbau organischer Abfälle werden noch weiter untersucht.

Im Tiefenlager entsteht Gas

In einem verschlossenen geologischen Tiefenlager für SMA- oder HAA-Abfälle entsteht Gas. Grösstenteils ist es Wasserstoff, der bei der Korrosion von Metallen unter Sauerstoffausschluss entsteht. Tiefenlager enthalten ein breites Spektrum an Metallen und Legierungen: in den radioaktiven Abfällen selbst, in Einbauten wie Felsankern sowie Stützbögen und als Behältermaterial. Stahl kommt am häufigsten vor. Er korrodiert in einem Tiefenlager aber äusserst langsam (vgl. Seiten 36 und 37). Weitere Gase wie Methan können beim Abbau organischer Abfälle in einem SMA-Tiefenlager entstehen. Zu den organischen Abfällen gehören vor allem Ionenaustauscherharze und diverse Kunststoffabfälle.

Auswirkungen von Gas untersucht

Die Fähigkeit eines Tiefenlagers, Radionuklide zurückzuhalten, hängt von intakten Sicherheitsbarrieren ab. Einflüsse, die sich auf eine der Barrieren auswirken könnten, müssen untersucht werden. Dazu gehört auch die Bildung und Ableitung von Gas. Opalinuston ist die natürliche Sicherheitsbarriere, die besonders wichtig für die Langzeitsicherheit des Tiefenlagers ist. Er kann Risse selbst abdichten. Opalinuston enthält viele kleine flüssigkeitsgefüllte Poren. Der Stofftrans-

port durch den Opalinuston hindurch erfolgt sehr langsam durch Diffusion, von Pore zu Pore. Ein intaktes Porensystem unterstützt den langfristigen Einschluss der Radionuklide. Die Nagra hat im Felslabor Mont Terri untersucht, wie Opalinuston und die Stollenverfüllung aus Bentonit bei unterschiedlichen Gasdrücken reagieren. Zudem konnte sie mit Experimenten und Modellrechnungen die zu erwartende Gasmenge und den Gasdruck gut abschätzen.

Gas kann sicher abgeleitet werden

Die Analysen ergaben, dass die zu erwartenden Drücke – auch bei einer sehr pessimistischen Betrachtung – unterhalb der Werte liegen, welche die Barrieren schädigen könnten. Das Gas fliesst entlang der Stollenwände aus dem Tiefenlager in den umliegenden Opalinuston ab. Bei den zu erwartenden Drücken löst sich das Gas dann im Porenwasser des Opalinustons und wird durch die Poren wegtransportiert. Damit sich die Drücke in den Stollen nicht zu sehr aufbauen, kann Gas zusätzlich mit baulichen Massnahmen direkt durch die Stollen und dann ins umliegende Gestein abgeleitet werden. Dies erfolgt mit Stollensiegeln, die Radionuklide zurückhalten, Gas aber durchlassen. International wurde intensiv an der Optimierung dieser Siegel geforscht. Auch im Felslabor Grimsel läuft ein standortunabhängiger Versuch dazu im Massstab 1:1.

Die Nagra hat 2016 zudem in einer umfassenden Studie zur Gasbildung und -ableitung Varianten aufgezeigt, wie sich die Gasbildung bei Bedarf noch weiter vermindern lässt. Ein sehr grosser Teil an Gas liesse sich beispielsweise in einem HAA-Tiefenlager durch alternative Behältermaterialien reduzieren (vgl. Seiten 28 und 29).

und -ableitung

Abbau organischer Abfälle erforschen



«An meiner Arbeit gefällt mir besonders gut, dass sie verschiedene Disziplinen wie die Chemie, die Mikrobiologie und die Physik vereint.»

Dr. Mario Stein, Chemiker
Projektleiter Radioaktive Materialien

Mario Stein inventarisiert und charakterisiert bei der Nagra radioaktive Materialien, erstellt Prognosen zu zukünftig anfallenden Abfallmengen und führt Experimente durch. «Experimentelle Daten zur Zersetzung organischer Abfälle unter Bedingungen, wie sie in einem SMA-Tiefenlager herrschen, sind rar», sagt Mario Stein. «Daher untersuchen wir den mikrobiellen Abbau von Ionenaustauscherharzen und anderen organischen Materialien selbst.» Ionenaustauscherharze

dienen in Kernkraftwerken zur Reinigung von Wasserkreisläufen. Erschöpfte Harze fallen als zu konditionierende, radioaktive Abfälle an. Mario Stein experimentiert mit inaktiven Abfällen, die in gasdicht verschlossenen Fässern lagern und leicht beheizt werden. Er kann kontinuierlich Temperatur, Druck sowie Kohlenstoffdioxid-, Methan- und Sauerstoffgehalt in der Gasphase der Fässer messen. Zur Analyse aller Gaskomponenten werden Gasproben auch direkt aus den Fässern entnommen. Das Experiment läuft seit September 2015. «Nach einem Jahr konnten wir noch keine merkliche Zersetzung von Ionenaustauscherharzen zu Gasen feststellen», so Stein.

Bei Bedarf liesse sich die Menge an Gas aus organischen Abfällen in einem Tiefenlager reduzieren. Eine mögliche Methode dazu ist die Pyrolyse – eine kontrollierte Verbrennung der organischen Abfälle. Da durch die Korrosion von Stahl nachweislich grössere Mengen an Gas entstehen als durch den Abbau organischer Abfälle, untersucht die Nagra verstärkt auch alternative Behältermaterialien.



© Nagra

In dieser Versuchsanlage untersucht Mario Stein den Abbau organischer Verbindungen. Sie steht beim Zwischenlager ZWILAG in Würenlingen. Die untersuchten Ionenaustauscherharze befinden sich in den fünf beheizbaren Fässern.

Arbeitsschwerpunkt: alternative

Endlagerbehälter zählen zu den **technischen Barrieren** eines geologischen Tiefenlagers. Die Endlagerbehälter für verbrauchte Brennelemente und die hochaktiven verglasten Abfälle aus der Wiederaufarbeitung verbrauchter Brennelemente sind ein wichtiger Arbeitsschwerpunkt.

Endlagerbehälter aus Kohlenstoffstahl

Verbrauchte Brennelemente (BE) und andere hochaktive Abfälle werden verpackt in Endlagerbehältern ins HAA-Tiefenlager gebracht. Die Behälter müssen langzeitbeständig sein und dürfen nur langsam korrodieren. Die Schweiz hat geringdurchlässigen Opalinuston als Wirtgestein und bettet die Endlagerbehälter im Stollen in Bentonit ein. Das ENSI fordert, dass die Endlagerbehälter für BE und HAA mindestens 1000 Jahre dicht sind. Die Nagra sieht derzeit gasdicht verschweisste Zylinder aus Kohlenstoffstahl mit einer Wanddicke von 14 Zentimetern vor. Berechnungen zeigen, dass diese Endlagerbehälter während circa 10 000 Jahren absolut dicht sind. Wie schnell ein Behälter

unter Sauerstoffausschluss korrodiert, hängt von Feuchtigkeit, Temperatur, pH-Wert und Salinität im Lagerstollen ab. Laborversuche zeigen, dass die gemessene Korrosionsrate von Kohlenstoffstahl in verfestigtem Bentonit bereits nach einigen Monaten auf einen Wert von unter einem Tausendstel Millimeter pro Jahr abnimmt. Dies stimmt gut mit Werten überein, die im Felslabor Mont Terri erhalten wurden.

Andere Länder, anderes Material

Um einen sicheren Einschluss zu gewährleisten, muss das Behältermaterial zum Wirtgestein passen. Finnland und Schweden haben aufgrund der geologischen Rahmenbedingungen einzig Granit als Wirtgestein. Im geklüfteten Granit will man eine viel längere Einschlussdauer haben, als im Opalinuston notwendig ist. Schweden und Finnland verwenden daher langsamer korrodierendes Kupfer für ihre Endlagerbehälter für verbrauchte Brennelemente und versehen diese mit einem Einsatz aus Gusseisen.



© Posiva Oy

Das Wirtgestein Granit kann wasserführende Klüfte enthalten; deshalb werden in Schweden und Finnland korrosionsbeständigere Kupferbehälter mit Gusseiseneinsatz verwendet.

Behältermaterialien

Nagra testet alternative Materialien

Die Nagra muss das Behältermaterial erst beim Einreichen der Baubewilligung festlegen. Bis dahin hält sie sich Varianten zu den bewährten Behältern aus Kohlenstoffstahl offen: Sie beobachtet die Entwicklungen im Bereich der Materialwissenschaften und forscht mit anderen Organisationen an alternativen Behältermaterialien. Dabei prüft die Nagra sowohl Korrosionsbeständigkeit als auch mechanische Belastbarkeit der Behältermaterialien und allfällige Auswirkungen auf die Sicherheitsbarrieren des Tiefenlagers. Zudem sollte auch eine grosse Menge an Behältern einfach und ressourcenschonend hergestellt werden können.

Edelstahl kommt als Material für Endlagerbehälter nicht in Frage, da er mit zu grossen Ungewissheiten behaftet ist. Er besitzt zwar eine natürliche Schutzschicht, die ihn resistenter als Kohlenstoffstahl gegen Korrosion macht. Diese ist aber nie perfekt und anfällig für Beschädigungen. Als Folge davon können unkontrollierbare lokale Korro-

sionserscheinungen auftreten, die beispielsweise zu tiefen Löchern im Edelstahl führen könnten.

Auch Keramik als Behältermaterial wurde diskutiert; bislang ist das aber keine Option, da sich der Deckel eines solchen Behälters nicht dicht verschweissen lässt und Keramik brüchig ist.

Behälter aus Vollkupfer würden im Schweizer Konzept mit dem sehr geringdurchlässigen Opalinuston wenig Sinn machen. In Zusammenarbeit mit der kanadischen Schwesterorganisation NWMO entwickelt die Nagra daher einen Behälter aus Kohlenstoffstahl, der mit einer drei bis zehn Millimeter dicken Kupferbeschichtung versehen wird. Die Kupferbeschichtung ist eine sehr gute Lösung, um vom erhöhten Korrosionsschutz von Kupfer zu profitieren und gleichzeitig nicht unnötig viel des wertvollen Metalls verbrauchen zu müssen. Weitere alternative Metallbeschichtungen aus Nickel und Titan werden zusammen mit der Eidgenössischen Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (EMPA) evaluiert.



© NWMO

Prototyp eines
Stahlbehälters mit
Kupferbeschichtung

Impressionen aus den Schweizer



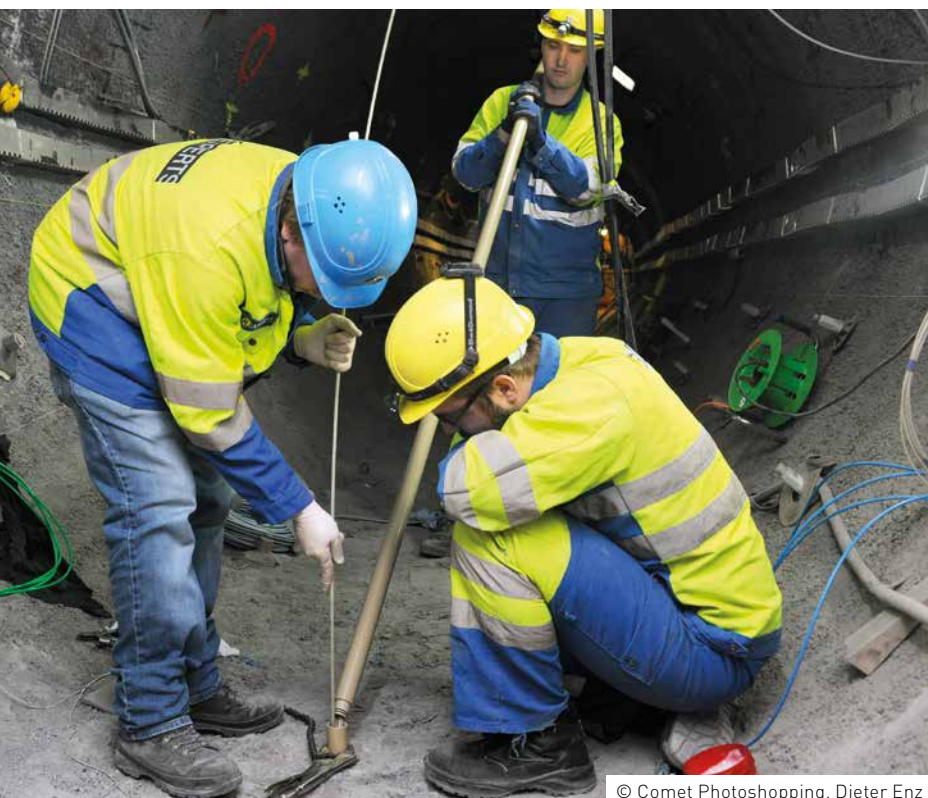
© Comet Photoshopping, Dieter Enz



© Comet Photoshopping, Dieter Enz



Felslaboren



© Comet Photoshopping, Dieter Enz

In den beiden Schweizer Felslaboren können unter realitätsnahen Bedingungen Experimente direkt im Gestein durchgeführt werden. Das Felslabor Grimsel wird durch die Nagra und das Felslabor Mont Terri durch das Bundesamt für Landestopografie swisstopo betrieben.

Melden Sie sich für eine kostenlose Führung an:

fuehrungen.nagra.ch



© Comet Photoshopping, Dieter Enz



© Nagra

Arbeiten in den beiden Schweizer

Mit den Felslaboren Grimsel und Mont Terri verfügt die Schweiz über zwei internationale Zentren der Tiefenlagerforschung. Hunderte Meter unter der Erdoberfläche arbeiten die Nagra und ihre Partner dort an der sicheren Entsorgung radioaktiver Abfälle.

Felslabore ermöglichen Experimente unter realistischen Bedingungen direkt im Wirtgestein. So können wichtige Erkenntnisse zu Machbarkeit und Sicherheit von Tiefenlagern gewonnen werden, die in Planung und Bau einfließen. Die Nagra betreibt das Felslabor Grimsel und das Bundesamt für Landestopografie swisstopo das Felslabor Mont Terri.

Wertvolle Daten und Erkenntnisse

In beiden Felslaboren testet und optimiert die Nagra ihre Konzepte. Untersucht werden geologische, chemische und physikalische Prozesse, die später unter vergleichbaren Randbedingungen auch in einem Tiefenlager ablaufen. Vor allem die

Wirksamkeit und das Langzeitverhalten der technischen und geologischen Barrieren werden unter verschiedensten Einflüssen studiert: die Korrosion der Endlagerbehälter, die Migrationsgeschwindigkeiten der Radionuklide in Opalinuston, die Ableitung von Gas und Wärme etc. Die Experimente helfen, das Prozessverständnis zu verbessern, Modelle für Vorhersagen zu entwickeln, und sie liefern Daten für Modellrechnungen. Im bautechnisch anspruchsvollen Opalinuston wird zudem auch die Bohrtechnik optimiert.

Experimente im Massstab 1:1

In sogenannten Demonstrationsexperimenten werden im Grossmassstab Verfahren zur Einlagerung der Abfallbehälter während mehrerer Jahren unter verschiedensten Einflüssen untersucht. Das «Full-Scale Emplacement»-Experiment im Felslabor Mont Terri ist solch ein Experiment im Massstab 1:1, bei dem das Einlagerungskonzept für einen Lagerstollen für verbrauchte Brennelemente simuliert wird.



© Comet Photoshopping, Dieter Enz

Das Felslabor Mont Terri in St-Ursanne (JU) liegt rund 300 Meter unter der Erdoberfläche im Opalinuston.

Felslaboren

Sensorentests und neue Messmethoden

Ein verschlossenes Tiefenlager wird während einer Beobachtungsdauer von mindestens fünfzig Jahren überwacht. In den Felslaboren werden deshalb auch Sensoren zum Überwachen von Parametern wie Temperatur, Feuchtigkeit und Druck getestet und Messmethoden entwickelt.

Messdaten sind wichtig für Vorhersagen

Ein Tiefenlager schliesst verbrauchte Brennelemente mindestens eine Million Jahre lang sicher ein. Dies lässt sich im Rahmen von Sicherheitsanalysen mit Dosisberechnungen zeigen. In diese fließen auch in Felslaboren gemessene Migrationsgeschwindigkeiten von Radionukliden ein. So konnte die Nagra belegen, dass die durch ein Tiefenlager verursachte Strahlendosis an der Erdoberfläche weit unterhalb der natürlichen Strahlung und des Grenzwerts von 0,1 Millisievert pro Jahr liegt. Dies selbst unter ungünstigsten Bedingungen und während der gesamten Einschlusszeit der Abfälle.



«Das Felslabor Grimsel ist das einzige Untertagelabor weltweit, in dem Forschende unter kontrollierten Bedingungen auch Experimente zum Verhalten von Radionukliden in geklüftetem Gestein durchführen können.

Unter realistischen Bedingungen wird mit Spuren von radioaktiven Stoffen untersucht, wie diese langsam durch kleine Risse und Klüfte im Gestein migrieren oder zurückgehalten werden. In unserem international anerkannten Forschungszentrum bieten wir unseren Partnern beste Forschungsbedingungen und eine optimale Infrastruktur.»

Dr. Ingo Blechschmidt, Geowissenschaftler
Ressortleiter des Felslabors Grimsel



© Nagra

Das Felslabor Grimsel (BE) liegt 450 Meter tief unter dem Juchlistock (links) in granitischen Gesteinen des Aarmassivs.

Langzeit-Diffusionsexperiment in

«Long-Term Diffusion Experiment» (DR-B), Felslabor Mont Terri

Während mindestens zehn Jahren wird die Diffusion von Radionukliden insitu in Opalinuston studiert. Zum Detektieren der Radionuklide wird eine neue, mobile Messsonde eingesetzt, die zerstörungsfreie Messungen erlaubt.

Radionuklide einfach nachweisen

Zur Bestimmung der Migrationsgeschwindigkeiten von Radionukliden musste die Nagra ihre Diffusionsexperimente bisher mit der Entnahme eines Bohrkerns beenden, um ihn in ein Labor zur Analyse zu senden. Diese Art der Probenahme zerstört das Experiment. Nun setzt die Nagra erstmals eine mobile Messsonde ein, mit der sie geringste Konzentrationen bestimmter Elemente (u.a. Iod, Cäsium, Uran) zerstörungsfrei in Opalinuston messen kann. Aus den gemessenen Konzentrationskurven lässt sich dann die Migrationsgeschwindigkeit ableiten. Das Messprinzip beruht auf Röntgenfluoreszenz: Die höhenverstell- und drehbare Sonde steckt in einem Beobachtungsbohrloch im Opalinuston und sendet

Röntgenstrahlen aus. Treffen sie auf eines der eben erwähnten Elemente an der Wand des Bohrlochs, so senden diese Elemente eine charakteristische Röntgenstrahlung zurück. Die Sonde fängt diese auf und liefert die Elementkonzentrationen.

Diffusion von Iod in Opalinuston

Im DR-B-Experiment wird die Diffusion von Iod in Opalinuston untersucht. Iod entsteht in Kernkraftwerken bei der Kernspaltung und gelangt in den radioaktiven Abfall. Es gibt radioaktives Iod-129 und stabiles Iod. Da beide praktisch identische chemische Eigenschaften haben, wird mit stabilem Iod gearbeitet. Die Ergebnisse sind übertragbar.

Die Versuchsanordnung besteht aus einem zentralen Bohrloch, in das Iod gegeben wird, und drei Beobachtungsbohrlöchern, welche die Messsonde aufnehmen (vgl. Abb. rechts). Im Sommer 2016 startete das Experiment: Das Iod wurde als Natriumiodidlösung in den untersten Teil des zentralen Bohrlochs injiziert. Von dort aus wandert



© Nagra

Die mobile XRF-Sonde wird im Beobachtungsbohrloch getestet.

Opalinuston

das Iodid nun durch den Opalinuston, bis es dann in wenigen Jahren von der Messsonde in den Beobachtungsbohrlöchern detektiert werden kann.



«Die nukleare Entsorgung ist ein Generationenprojekt. Wir müssen Wissen nicht nur erarbeiten, sondern es auch gut dokumentieren und weitergeben.»

Dr. Veerle Cloet, Chemikerin & Umweltingenieurin
Projektleiterin Materialverhalten

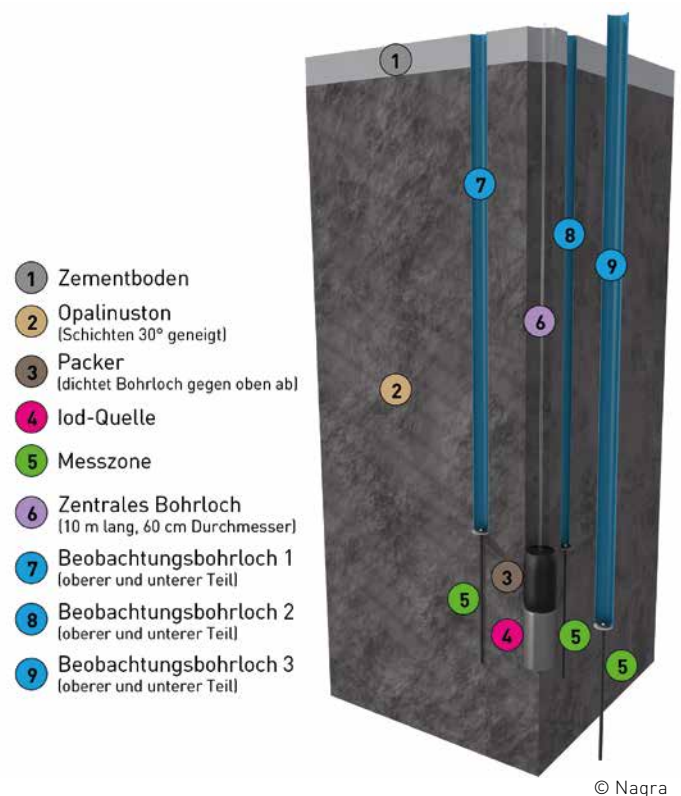
Die Migrationsgeschwindigkeit von Iodid durch den Opalinuston wird durch die langsame Diffusion bestimmt. Das Iodid trägt eine negative Ladung und wird von der ebenfalls negativ geladenen Oberfläche des Opalinustons abgestossen. Es gibt dadurch nur eine sehr geringe bis gar keine Sorption, d.h., Iodid wird nicht zusätzlich zurückgehalten. Es migriert im Vergleich zu positiv geladenen Radionukliden «schnell» durch den Opalinuston. Bei Dosisberechnungen gehört es somit zu den relevanten Radionukliden.

Wissensmanagement ist sehr wichtig

Veerle Cloet untersucht Wechselwirkungen zwischen den Sicherheitsbarrieren Zement und Ton sowie den Stofftransport in den Sicherheitsbarrieren. «Der Stofftransport aus einem Tiefenlager erfolgt ausschliesslich durch Diffusion im Opalinuston und ist sehr langsam», erklärt sie. «Opalinuston leistet als natürliche Sicherheitsbarriere einen wichtigen Beitrag zum sicheren Einschluss der Abfälle.» Laborexperimente zu Wechselwirkungen und zum Stofftransport werden auch am PSI, an der Universität Bern und an der EMPA durchgeführt.

Gerade bei einem generationenübergreifenden Projekt wie der Entsorgung reiche es aber nicht,

Wissen nur zu erarbeiten, sondern es müsse auch dokumentiert und weitergegeben werden, sagt Veerle Cloet. Dazu sei auch der kollegiale wissenschaftliche Austausch innerhalb der Nagra wichtig. «Wir treffen unsere Entscheidungen jeweils gemeinsam auf der Basis technisch-wissenschaftlicher Untersuchungen; sicherheitstechnische Aspekte stehen für uns im Vordergrund. Ich bin mir aber bewusst, dass für viele Menschen die Entsorgung radioaktiver Abfälle auch eine emotionale Sache ist und mit gesellschaftlichen oder politischen Fragen verknüpft sein kann.»



© Nagra

Versuchsskizze des Langzeit-Diffusionsexperiments: Gut sichtbar sind die verschiedenen Bohrlöcher, beispielsweise die Beobachtungsbohrlöcher, welche die mobile Messsonde aufnehmen.

Experiment zur Korrosion in Ben

«Corrosion in Bentonite» (IC-A), Felslabor Mont Terri

In diesem Experiment wird die Korrosion metalischer Komponenten aus Stahl und Kupfer untersucht. In einem SMA- und HAA-Tiefenlager gibt es ein breites Spektrum an Metallen und Legierungen in den Abfällen selbst, in Einbauten und als Behältermaterial. Stahl kommt am häufigsten vor.

Realistische Versuchsbedingungen

Im Felslabor Mont Terri untersucht Nikitas Diomidis seit Anfang 2013 die Korrosion von Kohlenstoffstahl unter Sauerstoffausschluss in Bentonit. Vergleichbare Bedingungen werden auch in einem zukünftigen HAA-Tiefenlager herrschen. Mehrere Edelstahlzylinder stecken in einem 16 Meter tiefen Bohrloch im Opalinuston (vgl. Abb. unten). Das Porenwasser kann durch Öffnungen in die Zylinder gelangen. Die Edelstahlzylinder selbst sind nicht Ziel der Untersuchungen, sondern halten den Bentonit im Innern zusammen. «Jeder dieser Zylinder enthält kleine Probenstücke aus Kohlenstoffstahl, die in verdichtetes Bentonit-Granulat

oder in Bentonit-Blöcke eingebettet sind», erklärt Nikitas Diomidis. Er will nun herausfinden, wie gross die Korrosionsraten der Kohlenstoffstahlproben unter In-situ-Bedingungen sind und welchen Einfluss die mikrobielle Aktivität hat. «In einem Tiefenlager wird es Bakterien geben, die im ungünstigsten Fall die Korrosion von Stahl beschleunigen», so Diomidis, «dies können wir aber durch die Wahl geeigneter Bedingungen unterbinden, beispielsweise durch eine dichte Verfüllung mit Bentonit.»



«Ziel ist es, die Lebensdauer der Behälter noch weiter zu erhöhen und die durch Eisenkorrosion entstehende Gasmenge zu verringern.»

Dr. Nikitas Diomidis, Materialwissenschaftler
Ressortleiter Materialverhalten



tonit

Übereinstimmung mit Laborversuchen Auch Kupfer wird untersucht

Rund ein Jahr nach Start des Experiments wurden 2014 die ersten drei Zylinder aus dem Bohrloch entnommen, um die Korrosionsraten der Probenstücke zu ermitteln und zu schauen, ob die Bakterien einen Einfluss haben. «Die Analysen ergaben, dass Bakterien keinen massgebenden Einfluss auf die Korrosion hatten.» Für ein endgültiges Fazit sei es aber zu früh. Man werde in den nächsten Jahren noch weitere Zylinder ausbauen und deren Inhalt analysieren. «Bereits jetzt können wir sagen, dass die im Felslabor Mont Terri insitu gemessene Korrosionsrate von Kohlenstoffstahl sehr gut mit dem Wert aus Laborversuchen in dicht zusammengepresstem Bentonit übereinstimmt», betont der Nagra-Forscher. Die Korrosionsrate beträgt momentan etwas unter einem Tausendstel Millimeter pro Jahr und wird mit fortschreitender Experimentdauer weiter sinken.

Die drei ausgebauten Zylinder wurden planmässig durch neue Zylinder ersetzt, die zusätzlich drei verschiedene Arten von Kupferproben enthalten. So kann die Nagra auch die extrem langsame Korrosion von Kupfer unter Tiefenlagerbedingungen untersuchen und schauen, ob es zwischen den verschiedenen Kupferproben Unterschiede gibt. Bei den Kupferproben handelt es sich um:

- Sauerstofffreies Kupfer mit Spuren von Phosphor, wie es die schwedische Entsorgungsorganisation SKB für ihre Behälter verwendet
- Kupferproben der Sprühbeschichtung, die auf Kohlenstoffstahlbehälter aufgebracht wird
- Proben von elektrolytisch abgeschiedenem Kupfer

Die Erkenntnisse aus diesem Experiment helfen bei der Konstruktion noch robusterer Endlagerbehälter.

Linkes Bild:
Entnahme der Edelstahlzylinder aus dem Bohrloch
Mittleres Bild:
Im Bohrloch befinden sich zwölf solche Zylinder.
Rechtes Bild:
Jeder Edelstahlzylinder enthält kleine Probenstücke, eingebettet in verdichtetem Bentonit.

Experiment zu den technischen B

«Full-Scale Engineered Barriers Experiment» (FEBEX), Felslabor Grimsel

Bereits in den 90er-Jahren wurde die bautechnische Machbarkeit eines Stollens für verbrauchte Brennelemente getestet. Unter realistischen Bedingungen wurden das Langzeitverhalten der technischen Barrieren untersucht und Modelle für Vorhersagen überprüft.

Auswirkungen von Wärme studieren

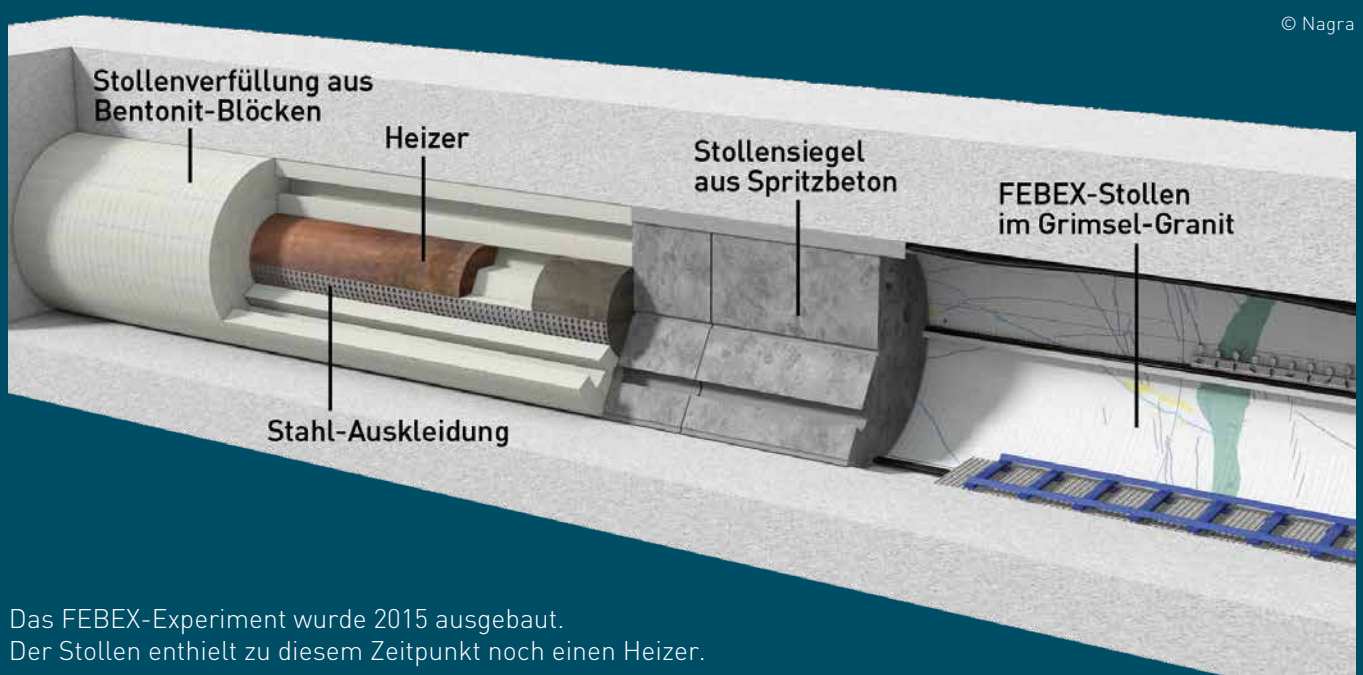
In diesem Demonstrationsexperiment im Massstab 1:1 wurde ein Lagerstollen für verbrauchte Brennelemente gemäss spanischem Lagerkonzept in Granit nachgebildet. Die Nagra konnte einerseits praktische Erfahrungen beim Bau der technischen Barrieren sammeln; der Fokus lag auf Bentonit-Blöcken, die als Verfüllmaterial dienten. Andererseits konnte sie die Auswirkungen der Wärme auf die Bentonit-Blöcke und das umliegende Gestein studieren. Da im Felslabor Grimsel nicht mit radioaktiven Abfällen gearbeitet werden darf, simulierten zwei Behälter mit Heizelementen, sogenannte Heizer, die Wärmeabgabe verbrauchter Brennelemente. Die Heizer wurden 1997

im Stollen eingelagert. Dieser wurde mit Bentonit-Blöcken abgedichtet und mit einem Beton-Pfropf verschlossen. Danach konnte das Experiment gestartet werden. Nach fünf Jahren Laufzeit wurden 2002 der erste von zwei Heizern ausgebaut und zahlreiche Proben genommen. Da ein Grossteil der Messinstrumente zur Überwachung des Experiments noch funktionierte, wurde der Versuch mit einem Heizer bis 2015 fortgesetzt. So konnte die Nagra weitere wertvolle Messdaten zum Langzeitverhalten der technischen Barrieren sammeln.



«Das FEBEX-Experiment ist das einzige Experiment dieser Art, das über einen so langen Zeitraum lief. Die Nagra konnte zeigen, dass das System aus technischen Barrieren ihren Zweck erfüllt.»

Dr. Florian Kober, Geowissenschaftler
Projektleiter FEBEX-Ausbau



© Nagra

Das FEBEX-Experiment wurde 2015 ausgebaut.
Der Stollen enthielt zu diesem Zeitpunkt noch einen Heizer.

arrieren

Bentonit verhielt sich wie erwartet

Während der Versuchsdauer von 18 Jahren konnten die Nagra-Forscher viele Messdaten sammeln. Aufgezeichnet wurden beispielsweise Temperatur, Wassergehalt und Quelldruck des Bentonits. «Die Messinstrumente waren viel robuster als erwartet», betont Florian Kober, «das hat mich besonders beeindruckt.» 2015 seien von den eingebauten Messinstrumenten noch rund 70 Prozent funktionstüchtig gewesen. «Das ist nicht selbstverständlich», so Kober, «denn im Stollen herrschen raue Bedingungen, wie Temperaturen von 80 bis 100 °C, hohe Drücke und Feuchtigkeit.»

Beim Ausbau der Heizer wurden zahlreiche Proben entnommen und für Analysen in Labore im In- und Ausland gesendet. «Die Messdaten und beim Ausbau genommene Gesteinsproben haben gezeigt, dass sich die technischen Barrieren im Grossen und Ganzen wie erwartet verhalten haben», erklärt Kober. Alle nach dem Einbau der Bentonit-Blöcke noch vorhandenen Ritzen seien

zudem bei der Aufnahme von Wasser aus dem umliegenden Granit durch Aufquellen des Bentonits zuverlässig abgedichtet worden. Noch seien nicht alle Proben ausgewertet. Man sehe aber bereits jetzt, dass die Ergebnisse aus den Laboranalysen der Proben gut mit den im Felslabor erhaltenen Messwerten übereinstimmen würden, so Kober. «Durch das Experiment konnten wir Daten zum mechanischen, physikalischen und chemischen Verhalten des Bentonits sammeln», fasst Kober zusammen. Die Daten würden dazu genutzt, um die Aussagen aus Computermodellen zu prüfen. «Mehrheitlich stimmen die Vorhersagen, beispielsweise zur Temperatur, mit den Messdaten überein», hält der Nagra-Forscher fest. Einzig die Aufsättigung des Bentonits mit Wasser habe länger als erwartet gedauert. «Die Modelle nutzen wir, um möglichst genaue Vorhersagen für neue Experimente – auch im Opalinuston – und schliesslich für ein späteres Tiefenlager zu machen.»



© Comet Photoshopping,
Dieter Enz

Auch beim Ausbau des zweiten Heizers 2015 wurden zahlreiche Proben gesammelt.

Einlagerungsexperiment im Lage

«Full-Scale Emplacement Experiment» (FE-Experiment), Felslabor Mont Terri

Im FE-Experiment werden praktische Erfahrungen für den Einlagerungsprozess in einem späteren Tiefenlager für hochaktive Abfälle gesammelt. Hauptziel ist das Messen der Auswirkungen von Wärme auf Bentonit-Granulat und Opalinuston.

Testlauf für das Tiefenlager

Im Massstab 1:1 wird das Schweizer Einlagerungskonzept für ein HAA-Tiefenlager unter möglichst realistischen Bedingungen getestet. Der erste Teil des Versuchs wurde von 2010 bis Anfang 2015 auch im Rahmen des EU-Projekts LUCOEX «Large Underground Concept Experiments» durchgeführt. Mit ähnlichen Arbeitsabläufen wie in einem zukünftigen Tiefenlager wurden ein Versuchsstollen im Opalinuston ausgebrochen, drei Behälter (Heizer) eingebracht sowie der Stollen mit Bentonit-Granulat verfüllt und mit einem Beton-Pfropf verschlossen. Aus früheren Experimenten floss viel Know-how ein: zum Beispiel in die neu entwickelte Verfüllmaschine (vgl. Seite 20), mit der

Bentonit-Granulat gleichmässig und mit hoher Dichte eingebracht werden konnte. Bei einer hohen Bentonit-Dichte wird der Quelldruck von Bentonit maximiert und die Wärme wird bestmöglich abgeführt.

Auch nach Einbringen in ein Tiefenlager geben verbrauchte Brennelemente Wärme ab, die abgeführt werden muss, ohne das Gestein zu schädigen. Wärme erhitzt Porenwasser und Opalinuston. Da sich Wasser stärker ausdehnt als Ton, führt dies zu Spannungen. Daher untersucht die Nagra im zweiten Teil des FE-Experiments in den nächsten Jahren solche thermo-hydro-mechanisch gekoppelten Prozesse, also die Auswirkung von Wärme auf Bentonit-Granulat und Opalinuston. Rund 1700 Sensoren überwachen Temperatur, Feuchte respektive Wassergehalt, Druck, Deformation etc.



© Comet Photoshopping, Dieter Enz

Im bereits teilweise mit Bentonit-Granulat verfüllten FE-Stollen werden letzte Einstellungen an den Heizersensoren vorgenommen.

Stollen für hochaktive Abfälle



«Es ist ein gutes Gefühl, dass etwas auf dem Papier Geplantes in der Umsetzung wirklich funktioniert.»

Herwig R. Müller, Ingenieurgeologe
Projektleiter



«Mit den vielen Sensoren im und um den Stollen zeichnen wir rund eine Million Messwerte auf – pro Tag!»

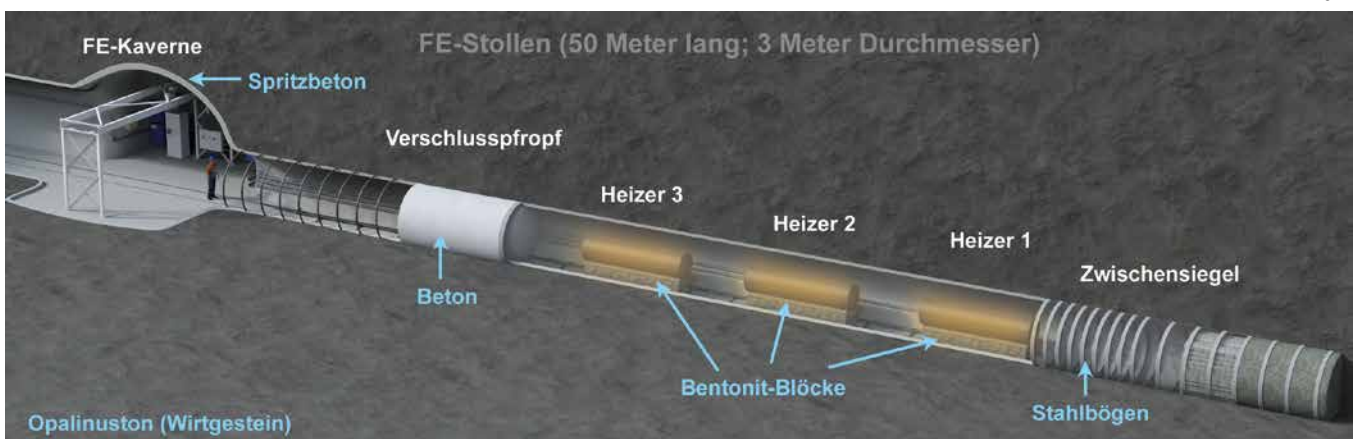
Benoit Garitte, Bauingenieur
Projektleiter

vierversprechend», erklärt Benoit Garitte, der nun für das Sammeln von Daten und deren Auswertung zuständig ist. Eine nicht ganz einfache Aufgabe: «Wir zeichnen pro Tag rund eine Million Messwerte auf», führt Benoit Garitte aus. Wichtig sei, dass er und sein Team diese enorme Datenmenge visualisieren können. «Die Auswertung der Messwerte zeigt, dass sich die Temperaturen so verhalten, wie es die Modelle vorhergesagt haben. Das Experiment liefert uns wertvolle Messdaten, um damit unsere bestehenden Modelle und Computersimulationen abzugleichen. Wir verwenden diese später, um Berechnungen für ein geologisches Tiefenlager durchzuführen», erklärt Benoit Garitte. Auch Herwig R. Müller unterstreicht die grosse Bedeutung des FE-Experiments für die Tiefenlagerforschung: «Es handelt sich hier um einen Prototypen, der so noch nie gebaut wurde.» Mit dem FE-Experiment habe die Nagra wichtige praktische Erfahrungen für den Einlagerungs- und Verfüllprozess in einem späteren Tiefenlager gesammelt, so Müller.

Ein einzigartiger Prototyp

«Im FE-Experiment steckt eine jahrelange theoretische Planung, die wir erfolgreich in die Praxis umsetzen konnten», sagt Herwig R. Müller. Er war von der Planung bis zum Start der Heizelemente für die Umsetzung des FE-Experiments verantwortlich. «Auch knapp zwei Jahre nach Messbeginn sieht es gut aus und sind die Messdaten

© Nagra



Entsorgung ist auf gutem Weg

Die Nagra ist auf gutem Weg, damit alle radioaktiven Abfälle der Schweiz in geologischen Tiefenlagern entsorgt werden können. Dies langfristig sicher und ohne künftigen Generationen unzumutbare Lasten aufzuerlegen.

Tiefenlager gibt es bereits

Nicht nur die Schweiz, sondern auch eine Vielzahl anderer Länder setzt auf die geologische Tiefenlagerung. Die Tiefenlagerforschung ist eine ausgereifte Wissenschaft. In Ländern wie Schweden, Finnland, Südkorea und Ungarn sind bereits geologische Tiefenlager für schwach- und mittelaktive Abfälle in Betrieb. Nach jahrzehntelanger Forschungs- und Entwicklungsarbeit sind auch die Entsorgungsprojekte für hochaktive Abfälle in Ländern wie Finnland, Frankreich oder Schweden weit fortgeschritten. In Finnland ist ein Tiefenlager für verbrauchte Brennelemente im Bau. Da es international eine enge Zusammenarbeit gibt, profitiert auch die Schweiz von diesen Fortschritten.

Verantwortung wahrnehmen

Die Tiefenlagerung radioaktiver Abfälle ist eine technisch und gesellschaftlich anspruchsvolle Aufgabe. Die Nagra nimmt diese Aufgabe zum generationenübergreifenden Schutz von Mensch und Umwelt mit dem nötigen Respekt und verantwortungsbewusst wahr. In der Schweiz sind bereits wesentliche Schritte zur Entsorgung der radioaktiven Abfälle realisiert. Die Standortsuche für Tiefenlager läuft gemäss Sachplan des Bundes und macht kontinuierlich Fortschritte. Auch die Finanzierung aller Arbeiten zur Stilllegung der Kernanlagen und zur Entsorgung der radioaktiven Abfälle ist gewährleistet. Dazu zahlen die Abfallverursacher jährliche Beiträge in den Entsorgungs- und den Stilllegungsfonds ein. Mit grosser Sorgfalt und nach aktuellem Stand von Technik und Wissenschaft geht die Nagra die im Entsorgungsprogramm noch anstehenden Schritte zielgerichtet an.



© Posiva Oy

Ende 2015 hat die finnische Entsorgungsorganisation Posiva die Baubewilligung für Onkalo, das geologische Tiefenlager für verbrauchte Brennelemente auf der Halbinsel Olkiluoto, erhalten. Die in der unteren Bildhälfte erkennbaren Zugänge nach Untertag sind schon gebaut.

Zum Weiterlesen

Nagra (2016): Entsorgungsprogramm 2016 der Entsorgungspflichtigen. NTB 16-01

Nagra (2016): The Nagra Research, Development and Demonstration (RD&D) Plan for the Disposal of Radioactive Waste in Switzerland. NTB 16-02

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

Nagra (2015): Standortgebiete für geologische Tiefenlager – Sicherheitstechnischer Vergleich: Vorschläge für Etappe 3; Themenheft 7

Nagra (2008): Entsorgungsprogramm 2008 der Entsorgungspflichtigen. NTB 08-01

Nagra (2002): Projekt Opalinuston; Konzept für die Anlage und den Betrieb eines geologischen Tiefenlagers; Entsorgungsnachweis für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive sowie langlebige mittelaktive Abfälle. NTB 02-02

Sie können diese Dokumente unter www.nagra.ch im Bereich «Publikationen» herunterladen oder bestellen.

Nationale Genossenschaft
für die Lagerung
radioaktiver Abfälle

Hardstrasse 73
Postfach 280
CH-5430 Wettingen

Tel 056 437 11 11
Fax 056 437 12 07

info@nagra.ch
www.nagra.ch
www.nagra-blog.ch

nagra ● **aus verantwortung**