

Bundesamt für Strahlenschutz BfS

Projekt: PSP-Nr. WS 0008 / BfS-Bestell-Nr. 8391-0

Titel: **Auswertung von
Langzeitsicherheitsanalysen hinsichtlich
Kriterien für die Auswahl von
Endlagerstandorten
Schlussbericht – ANHANG**

**Auftragnehmer/
Verfasser/
Bearbeiter** **Arbeitsgemeinschaft**
**Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver
Abfälle, CH – 5430 Wettingen**
Colenco Power Engineering AG, CH – 5405 Baden
**Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH,
D – 38122 Braunschweig**

Wettingen, 15. Mai 2002

Unterschrift:

Die Studie wurde im Auftrag des Bundesamtes für Strahlenschutz (BfS) erstellt. Das BfS behält sich alle Rechte vor. Insbesondere darf die Studie nur mit Zustimmung des BfS zitiert, ganz oder teilweise vervielfältigt bzw. Dritten zugänglich gemacht werden.

**Arbeitsgemeinschaft
Nagra – Colenco – GRS**

ANHANG

Auswertung von Langzeitsicherheitsanalysen hinsichtlich Kriterien für die Auswahl von Endlagerstandorten

INHALTSVERZEICHNIS – ANHANG

KRISTALLINE GESTEINE	161
AECL EIS	161
Kristallin-I	165
SITE 94	168
SR 97	171
TILA-99	176
SEDIMENTGESTEINE	180
Dry Run 3	180
Plan Konrad	184
Nirex 97 (& Nirex 95)	188
Wellenberg	193
SALZFORMATIONEN	198
ERAM	198
PROSA	201
SAM	204
WIPP CCA	208
VERSCHIEDENE WIRTGESTEINE	213
H12	213
1 st TRU Report	216
PAGIS/ PACOMA/ EVEREST	219
GESAMTSEITENZAHL	233

KRISTALLINE GESTEINE

AECL EIS	Atomic Energy of Canada Ltd. (AECL, Kanada) 1994
-----------------	---

Zielsetzung und Randbedingungen

Bericht erstellt für ein nationales Environmental Assessment Panel ("Umweltverträglichkeitsgremium"), das für die Überprüfung von Fragestellungen zum Abfallmanagement verantwortlich ist [1]. Eine Vorgabe der Regierung war, dass kein Standort gewählt werden durfte, bevor das Endlagerungskonzept angenommen war. Das Konzept sieht die Endlagerung in einem Pluton im kanadischen Schild unter Verwendung eines Mehrfachbarrierensystems vor. Im Bericht vorgeschlagen wird ein Endlagerkonzept, jedoch weder ein Standort noch eine standortspezifische Endlagerauslegung. Das Konzept beinhaltet für einige der Systemkomponenten Optionen, so z.B. langlebige Endlagerbehälter [2]. Fallstudien zur Bewertung der Sicherheit in den Betriebs- und Nachbetriebsphasen des Endlagers wurden durchgeführt.

Abfälle

Abgebrannter Brennstoff (Natururan-Oxid) aus CANDU-Reaktoren oder verglaste Abfälle aus der Wiederaufarbeitung des Brennstoffs.

Geologie

Plutonisches Kristallingestein des kanadischen präkambrischen Schilds mit bzw. ohne Überdeckung.

Standort

Es wurde kein Standort selektiert. Als hypothetischer Standort (im Sinne einer Fallstudie) wurde der Lac du Bonnet Batholit intensiv untersucht und für die Evaluation der Endlagertechnologie und der Methodologie für die Sicherheitsanalyse verwendet.

Sicherheitskonzept

Völliger Einschluss im Abfallgebäude für mindestens 500 Jahre. Danach langsame Auslaugung der Abfälle, Freisetzung von Radionukliden aufgrund von Diffusion durch eine Bentonit-Barriere und langsamer Transport durch die Geosphäre.

Erkenntnisse bezüglich der Wirksamkeit der technischen Barrieren und ihrer

Abhängigkeit vom Standort

Es wurde eine Fallstudie durchgeführt, die von der Endlagerung von abgebranntem CANDU Brennstoff in

Titanbehältern ausging. Die Behälter wurden innerhalb einer Bentonit/Sand-Barriere in Bohrlöchern eingelagert, die in einer Tiefe von 500 m von Tunneln im Lac du Bonnet Batholith aus abgeteuft wurden. Die wichtigen Erkenntnisse waren:

- Für das Versagen der Behälter wurde ein Zeitraum von 1000 bis 8000 Jahren nach Einlagerung geschätzt. Die niedrigen Auslaugungsraten des abgebrannten Brennstoffs sorgten für eine äusserst wirksame Rückhaltung der meisten Radionuklide, mit Ausnahme von ^{129}I , ^{14}C und ^{36}Cl . Es wurde angenommen, dass ein Teil des Inventars dieser Radionuklide (ca. 10 %) schnell freigesetzt wird (Gap-Inventar). Die geringe Permeabilität der Geosphäre am Standort verringerte die Freisetzung dieser Radionuklide in die Biosphäre wesentlich.
- Die Kombination aus den geringen Löslichkeiten für die Mehrheit der Radionuklide und der starken Sorption an der Bentonit/Sand-Barriere verminderten zusätzlich die Freisetzung der Radionuklide, ausser ^{129}I , ^{14}C und ^{36}Cl , so dass nur die letztgenannten Radionuklide einen nennenswerten Beitrag zur Strahlendosis leisteten. Die geschätzte Strahlendosis zum Zeitpunkt von 100'000 Jahren betrug 0.05 % der natürlichen Hintergrundstrahlung.
- Sämtliche Barrieren leisteten wichtige Beiträge zur Sicherheit, auch wenn die hervorragende Wirksamkeit der Geosphäre den wichtigsten Faktor darstellte.

Erkenntnisse bezüglich der Wirksamkeit der Geosphäre

Für die Fallstudie am Standort Lac du Bonnet war die sehr geringe Permeabilität ($<10^{-19} \text{ m}^2$) des Plutons in einer Tiefe von mehr als 240 m das dominante Merkmal. In diesem Gestein stellt die Diffusion der Radionuklide den dominanten Transportprozess dar, was die Maxima der Strahlendosis für ^{129}I , ^{14}C und ^{36}Cl stark verzögert [1].

Schlüsselfragen hinsichtlich der Standortauswahl

Das Endlagerkonzept war auf Plutone ausgerichtet, von denen es im kanadischen Schild mehr als 1000 gibt.

Aufgrund von Felduntersuchungen an mehreren Plutonen weisen derartige Gesteinskörper in Tiefen von mehr als 200 bis 500 m nur wenige durchlässige Klüfte auf. Zwischen diesen Klüften liegen ausgedehnte Gesteinsbereiche mit geringer Permeabilität und niedrigen hydraulischen Gradienten, in denen ein Endlager angelegt werden könnte.

In Tiefen von 500 bis 1000 m können ungewöhnlich hohe Spannungen im Gestein auftreten. Stabile Tunnelausbrüche können dennoch mit üblichen Massnahmen wie Felsankern und Netzen gewährleistet werden. Trotzdem können die hohen Spannungen die Auslegung des Endlagers beeinflussen; so können z.B. die Einlagerungsbohrlöcher unter hohen Spannungen instabil werden und die Einlagerung von Behältern im Tunnel zur bevorzugten Option werden.

Eine Standortwahl in Plutonen hat den Vorteil, dass die Wahrscheinlichkeit einer künftigen Rohstoffgewinnung in diesen Gesteinskörpern gering ist.

Sogar über Zehnmillionen von Jahren werden keine erheblichen Änderungen in der Permeabilität des Wirtgesteins in Tiefen von mehreren hundert Metern durch Vergletscherungs- und Erosionsprozesse erwartet.

Fragestellungen in Hinblick auf die Standortcharakterisierung während der Standortauswahl

Die zu untersuchenden Plutone sollten gross sein, um die Flexibilität für die Standortwahl zu maximieren. Ein grossflächiger Aufschluss des Plutons würde es erlauben, hinsichtlich Hauptlineamenten, Klüften bzw. der allgemeinen Homogenität des Gesteins ein Maximum an Informationen zu erlangen.

Ein wenig ausgeprägtes topographisches Relief wird bevorzugt, um die hydraulischen Gradienten möglichst niedrig zu halten.

Die Grundwasserinfiltrations- und -exfiltrationsgebiete sollten identifiziert und Informationen über das Grundwasserfließsystem in der Tiefe gewonnen werden, um ein dreidimensionales konzeptuelles Modell sowie ein mathematisches Modell für den Schadstofftransport zu erstellen. Diese Modelle würden für die Identifizierung des bevorzugten Standorts benutzt werden.

Ab einem gewissen Punkt ist es unwahrscheinlich, dass die noch bestehenden Unsicherheiten durch weitere Erkundungsbohrlöcher verringert werden können. Dann wird die Erstellung von Untertagebauten notwendig.

Weitere Gesichtspunkte

Eine zweite, eingeschränktere Fallstudie [2] wurde von AECL als Teil des EIS Review-Verfahrens eingereicht. Die Studie beruhte auf der Einlagerung von abgebranntem Brennstoff in langlebigen Kupferbehältern in einem Tunnel an einem hypothetischen Standort, dessen Gestein eine höhere Permeabilität (10^{-17} m^2) aufweist. Es wurde angenommen, dass ungefähr 1 von 5'000 Behältern vor Ablauf der Auslegungs-Lebensdauer von 10^6 Jahren versagt. Die durchschnittliche, berechnete Strahlendosis war jederzeit um mehr als ca. 20 mal geringer als das gesetzliche Kriterium. Gemeinsam veranschaulichen die EIS und die zweite Fallstudie die Flexibilität des Endlagerkonzepts in Bezug auf die Einhaltung der Sicherheitsanforderungen.

Anmerkungen aus der Review relevant für die Standortwahl

Während der Review wurden zwei wichtige Fragen im Zusammenhang mit der Standortwahl aufgeworfen:

- War der aktuelle Stand der Technik ausreichend für die Charakterisierung von potentiell geeigneten Standorten?
- Bestehen technisch annehmbare Standorte und sind solche weit über das kanadische Schild verteilt?

Referenzen:

- 1) AECL 1994. Environmental Impact Statement on the Concept for Disposal of Canada's Nuclear Fuel Waste. AECL-10711, COG-93-1.
- 2) Wikjord, A.G., P. Baumgartner, L.H. Johnson, F.W. Stanchell, R. Zach, and B.W. Goodwin 1996. The Disposal of Canada's Nuclear Fuel Waste: A Study of Postclosure Safety of In-Room Emplacement of Used CANDU Fuel in Copper Containers in Permeable Plutonic Rock. Vol. 1: Summary. AECL-11494-1, COG-95-552-1.

Kristallin-I	Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra, Schweiz) Juli 1994
---------------------	---

Zielsetzungen und Randbedingungen

Teil der abschliessenden Synthese der regionalen Felduntersuchungen (Phase I). Kristallin-I untersucht die Machbarkeit eines HAA-Endlagers im kristallinen Grundgebirge der Nordschweiz. Die berechneten Dosen werden den Schutzziele der behördlichen Richtlinie R-21 gegenübergestellt.

Abfälle

Verglaste hochaktive Abfälle von wiederaufbereiteten Brennelementen aus Siedewasser- und Druckwasserreaktoren.

Geologie

Kristallines Grundgebirge, überlagert von mächtiger Sedimentgesteinsdecke.

Standort

Region Nordschweiz; regionsspezifische Daten (7 Tiefbohrungen, regionale seismische Profile) und standortunabhängige Daten (z.B. Felslabor Grimsel) als Input für die Sicherheitsanalyse

Sicherheitskonzept

Absoluter Einschluss in den Abfallbinden für 1'000 Jahre, gefolgt von langsamer Glasauflösung, diffusiver Freisetzung von Radionukliden durch die Bentonitverfüllung und Transport durch die Geosphäre. Bei der gewählten Lagerauslegung sind die technischen Barrieren sehr wirksam, sodass die Hauptaufgabe des Wirtgesteins darin besteht, über lange Zeiträume ein stabiles und günstiges Umfeld zu garantieren. Erst bei ungünstigem Verhalten des Nahfeldes kommt die Wirkung der Geosphäre als Transportbarriere voll zum Tragen.

Schlussfolgerungen bezüglich der Wirksamkeit der technischen Barrieren und ihrer Abhängigkeit vom Standort

Die gute Wirksamkeit des Nahfelds hängt von der geringen Löslichkeit vieler sicherheitsrelevanter Nuklide im Nahfeld ab. Dabei ist auch die Filtrationswirkung des Bentonits für allfällige Kolloide wichtig. Die geringe Löslichkeit wird begünstigt durch geringe Salinität und reduzierende Bedingungen des Nahfeldporenwassers. Die Wirksamkeit der technischen Barrieren für die Langzeitsicherheit wird auch sehr begünstigt durch den diffusiven Transport durch die Bentonitverfüllung. Deshalb wird allfälligen

ungünstigen Entwicklungen des Bentonits (z.B. Absinken des Behälters) spezielle Aufmerksamkeit gegeben.

Die gute Wirkung des Nahfeldes wird noch weiter verstärkt durch geringe Grundwasserflüsse im Bereich der Lagerstollen. Der Einfluss von Behälter-Lebensdauer und Glaskorrosionsrate auf die berechneten Dosen sind weniger gross.

Schlussfolgerungen bezüglich der Wirksamkeit der Geosphäre

Damit die gute Wirksamkeit des Nahfeldes über lange Zeiten muss die Geosphäre ein geeignetes Umfeld bilden (physikalischer Schutz, günstige geochemische Verhältnisse, genügend kleine Wasserfliessraten). Bei guter Wirkung des Nahfeldes ist Wirkung der Geosphäre als Transportbarriere je nach Parameterwahl unterschiedlich gross. Bei ungünstigem Verhalten des Nahfeldes ist die Wirkung der Geosphäre als Transportbarriere viel ausgeprägter.

Das mögliche Auftreten von "schnellen Pfaden" kann die Wirksamkeit der Geosphäre stark beeinträchtigen. Die Häufigkeit bzw. die Auftretenswahrscheinlichkeit solcher Pfade sowie ihre Eigenschaften sind für die Bewertung der Geosphärentransportbarriere von grosser Bedeutung.

Falls durch vertiefte Untersuchungen die Existenz einer grösseren Zahl solcher "schnellen Pfade" ausgeschlossen werden kann, würde dies evtl. zu einer optimistischeren Bewertung der Wirkung der Geosphäre als Transportbarriere führen.

Schlüsselfaktoren hinsichtlich Standortauswahl

Zur Gewährleistung der guten Barrierenwirkung des Nahfeldes muss das geologische Umfeld der Lagerstollen Randbedingungen erfüllen: Neben Stabilität sind es insbesondere beschränkter Grundwasserfluss und günstige geochemische Verhältnisse. Zusätzlich spielt auch die in-situ Temperatur eine wichtige Rolle, um die wegen radiogener Wärmeproduktion der Abfälle erfolgende Temperaturerhöhung entstehenden maximalen Temperaturen auf einem vernünftigen Niveau zu halten.

Um die Eigenschaften des Bentonits möglichst wenig zu beeinträchtigen, werden wegen potentiell störenden Einflüssen zementgebundene Werkstoffe möglichst vermieden. Daher wird ein Wirtgestein mit günstigen felsmechanischen Eigenschaften (wie es im kristallinen Grundgebirge in günstiger Situation erwartet werden kann) einem Wirtgestein, welches massive Beton- bzw. Stahleinbauten bedarf, vorgezogen.

Eine Sedimentüberdeckung isoliert das Wirtgestein von der Erdoberfläche sehr wirkungsvoll, so dass das Lagerumfeld gegenüber hydrologischen und anderen Auswirkungen von Klimaveränderungen, wie sie eine Eiszeit oder menschliche Einflüsse verursachen können, gut geschützt ist.

Die Wahrscheinlichkeit eines unbeabsichtigten menschlichen Eindringens wird durch die Wahl eines Standorts ohne bedeutende Ressourcen verringert.

Faktoren hinsichtlich der Standortcharakterisierung während der Standortauswahl

Die berechnete Barrierenwirkung der Geosphäre reagiert empfindlich auf die Transmissivität und die kleinräumige Struktur der wasserführenden Elemente und auf deren Variabilität. Die Charakterisierung der Transportpfade stellt eine Schlüsselaufgabe dar.

Die Sicherheitsanalyse gibt Aufschluss über die Bedeutung einzelnen Eigenschaften der wasserführenden Elemente.

Es wurde versucht, die wichtigsten Wirtgesteinscharakteristiken des kristallinen Grundgebirges der Nordschweiz zu quantifizieren, z.B. durchschnittlicher spezifischer Grundwasserfluss in der Grössenordnung von 10^{-11} bis 10^{-13} ms^{-1} , nahezu neutraler pH-Wert und reduzierendes Grundwasser von geringer bis mässiger Salinität, genügende Ueberdeckung.

Einige Wirtgesteine/Standorte sind möglicherweise einfacher bzw. zuverlässiger zu charakterisieren als andere und werden dadurch bevorzugt.

Weitere Gesichtspunkte

^{79}Se und ^{135}Cs dominieren die berechneten Dosiswerte bis ca. 1 Million Jahre aufgrund ihrer hohen Löslichkeit im Nahfeld und der geringen Sorption.

Beabsichtigtes menschliches Eindringen braucht gemäss der behördlichen Richtlinie R-21 nicht analysiert zu werden.

Der Beitrag etlicher sich günstig auf die Sicherheit auswirkenden Prozesse wurde nicht berücksichtigt (z.B. Sorption an Behälterkorrosionsprodukten); diese bleiben als Reserve-FEPs bestehen.

Anmerkungen aus der Review relevant für die Standortwahl

Die behördliche Beurteilung von Kristallin-I ist noch nicht abgeschlossen.

Referenzen

Kristallin-I Safety Assessment. Nagra Technical Report NTB 93-22. Nagra, Wettingen, Switzerland, July 1994.

SITE 94	Swedish Nuclear Power Inspectorate (SKI, Schweden) 1992 bis 1996
----------------	---

Zielsetzung und Randbedingungen

Aufbau einer unabhängigen Expertise für Sicherheitsanalysen in der Aufsichtsbehörde [1]. Fortführung einer ähnlichen, ersten Studie: Project-90 (1991).

Abfälle

ca. 7000 t abgebrannter Kernbrennstoff aus Druckwasser- und Siedewasser-Reaktoren.

Geologie

Kristallines Grundgebirge.

Standort

Standortspezifische Daten von SKB, basierend auf Angaben vom Äspö Felslabor (ausschliesslich aus Oberflächenuntersuchungen vor jeglichen Exkavationsarbeiten), auf ein hypothetisches Endlager angewandt, um generische Schlussfolgerungen ziehen zu können.

Sicherheitskonzept

Das SKB "KBS-3" Sicherheitskonzept. Vollkommene Rückhaltung in einem langlebigen Abfallgebinde für mehr als 100'000 Jahre. Anschliessend langsame, diffusionskontrollierte Freisetzung durch die technischen Barrieren. Die geologische Barriere dient hauptsächlich dazu, die technischen Barrieren zu schützen und die Geschwindigkeit der in dieser ablaufenden Prozesse zu stabilisieren. Die geologische Barriere spielt eine beschränkte Rolle für die Rückhaltung (hauptsächlich für langlebige sorbierende Radionuklide wie Pu und Th).

Schlüsselfragen hinsichtlich der Standortauswahl

Die oberen Regionen im Grundgebirge sind während einer Eiszeit, besonders wenn eine Vergletscherung wahrscheinlich ist, beachtlichen thermischen, mechanischen, hydraulischen und chemischen Störungen ausgesetzt.

Stabile hydrochemische Bedingungen in der Tiefe sind für das Funktionieren dieses Sicherheitskonzepts wichtig, d.h. Standorte dürfen keinen offensichtlichen zukünftigen dynamischen Antriebskräften ausgesetzt sein, die dies beeinflussen könnten.

Regionen mit salinaren Formationswässern aus grossen Tiefen wären für das Konzept mit der technischen Barriere (besonders für den Bentonitpuffer) nicht förderlich.

Grundwasserfliesszeiten vom Endlager zur Oberfläche werden generell kurz sein (wenige Tausend Jahre); dies lässt sich nicht vermeiden.

Die Gesamtwirksamkeit des Endlagers hängt stark von der Lage der einzelnen Abfallgebinde im Netzwerk des Fliesssystems ab; daher sollte bei der Standortauswahl auf generell niedrige Fliessraten in der Tiefe geachtet werden, die nicht zu variabel sein dürfen.

Fragestellungen in Hinblick auf die Standortcharakterisierung während der Standortauswahl

Modellierungen der Paläohydrogeologie im grossen regionalen Massstab führen zu Kenntnissen über das heutige Grundwasserregime und seine Hydrochemie und unterstützen somit die Gegenüberstellung mit anderen potentiellen Standorten. Dafür sind hydrochemische Messwerte aus der Tiefe am Standort notwendig.

Die eindeutige Interpretation eines geologischen und strukturellen Standortmodells ist trotz grosser Datenmengen nicht möglich. So müssen auch nach der Einschränkung auf einen einzigen Standort und trotz einer umfassenden Datenbank mit Standortkennwerten verschiedene Modelle erwartet werden.

Die erhebliche Variabilität im Raum ist eine wesentliche Eigenschaft dieses Umfelds, und obwohl eine grosse hydrogeologische Datenbank vorhanden ist, bestehen erhebliche Unsicherheiten in Bezug auf die Vernetzung der hydraulischen Verbindungen. Dies deutet darauf hin, dass in jedem Stadium der Standortwahl und schliesslichen Genehmigung eines einzelnen Standorts statistische und stochastische Modelle sowie mehrere Alternativmodelle notwendig sind.

Anmerkungen aus der Review relevant für die Standortwahl

durchgeführt von OECD Nuclear Energy Agency [2]

Daten, die man direkt aus untertägigen Beobachtungen im Felslabor erhält, werden für das detaillierte Verständnis von Stress- und Strömungsbedingungen am ausgewählten Standort sehr wichtig sein.

Die Aufsichtsbehörden wie auch die ausführenden Organisationen müssen berücksichtigen, welche Arten von Daten während der verschiedenen Stadien des Programms zur Standortcharakterisierung verfügbar werden und wie sich dies darauf auswirkt, in welchem Mass von den Beiträgen der verschiedenen Barrieren zur Sicherheitsanalyse Kredit genommen wird.

Einfache eindimensionale Geosphärentransportmodelle, wie sie für die Sicherheitsanalyse benutzt werden, könnten für Systeme mit ausgeprägter räumlicher Variabilität an ihre Grenzen stossen.

Referenzen

- 1) SKI SITE-94 Deep Repository Performance Assessment Project. SKI, Stockholm, December 1996, 2 volumes, SKI Report 96:36
- 2) The SKI SITE-94 Project: An International Peer Review carried out by an OECD-NEA Team of Experts. SKI, Stockholm, October 1997, SKI Report 97:41

SR 97	Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB, Schweden) 1999
--------------	--

Zielsetzung und Randbedingungen

SR 97 wurde aufgrund einer Aufforderung von der schwedischen Regierung und den Aufsichtsbehörden erstellt "... to demonstrate that the KBS-3 method has good prospects of being able to meet the safety and radiation protection requirements which SKI and SSI have specified in recent years" (... um nachzuweisen, dass für die KBS-3 Methode gute Aussichten darauf bestehen, den Anforderungen an Sicherheit und Strahlenschutz, welche in den vergangenen Jahren von SKI und SSI spezifiziert wurden, gerecht zu werden). Entsprechend stellt die Studie eine Vorbereitung für die bevorstehenden Standortuntersuchungen dar [1].

Abfälle

Abgebrannter Kernbrennstoff. Für SR 97 wird davon ausgegangen, dass 8000 t Brennstoff eingelagert werden müssen und dass alle Kanister Brennstoffe aus Siedewasser-Reaktoren mit einem Abbrand von 38 GWd/tU beinhalten.

Geologie

Alle drei Standorte liegen in altem kristallinem Grundgebirge an oder nahe der Ostseeküste. Zwei der Standorte befinden sich in Gebieten mit eher flacher Topographie, der dritte in hügeligerem Terrain.

Standort

Drei hypothetische Endlager: Aberg am Standort Äspö, Beberg am Standort Finnsjön und Ceberg am Standort Gideå. Diese Standorte wurden bzw. werden von der SKB im Rahmen des F&E Programms untersucht. In Äspö, Südschweden, befindet sich das Felslabor, wo die SKB zur Zeit einen Grossteil des F&E Programms ausführt. In Finnsjön, Mittelschweden, führte die SKB von 1985 bis 1991 die Untersuchungen zu einer flach einfallenden Kluffzone durch (das Finnsjön Projekt). Der nordschwedische Standort Gideå wurde ursprünglich als Teil des Programms KBS-3 von Sicherheitsanalysen in den Jahren 1981 bis 1983 untersucht.

Sicherheitskonzept

Das Endlager "KBS-3" ist primär so ausgelegt, dass die abgebrannten Brennelemente isoliert werden. Als zweites Ziel soll die Rückhaltung jeglicher freigesetzter Radionuklide gewährleistet sein. Diese Sicherheit wird durch folgende Massnahmen erzielt:

- Die Einlagerung der Brennstoffe in korrosionsresistente Kupferkanister. Im Inneren des 5 m langen

Kanisters befindet sich ein Einsatz aus Gusseisen, der für die notwendige mechanische Festigkeit sorgt.

- Die Kanister sind von kompaktiertem Bentonit umgeben, der ihnen im Fall geringer Felsverschiebungen mechanischen Schutz bietet und das Grundwasser und korrosive Substanzen von ihnen fernhält. Ferner adsorbiert der Bentonit viele Radionuklide, die freigesetzt werden könnten, wenn der Kanister beschädigt wird oder korrodiert.
- Die Kanister werden in ca. 500 m Tiefe in ein kristallines Wirtgestein eingelagert, wo über lange Zeiträume hinweg stabile mechanische und chemische Bedingungen herrschen.
- Sollte ein Kanister beschädigt werden oder korrodieren, werden die chemischen Eigenschaften der Brennstoffe und der radioaktiven Stoffe – z.B. ihre geringe Wasserlöslichkeit – den Transport der Radionuklide vom Endlager zur Biosphäre stark begrenzen. Dies trifft vor allem für die Elemente mit der höchsten langfristigen Radiotoxizität, wie z.B. Americium und Plutonium, zu.

Das Endlager besteht aus einer Reihe von Barrieren, die sich gegenseitig unterstützen und ergänzen, mit dem wichtigen Vorbehalt, dass die Sicherheit des Endlagers auch dann noch gewährleistet sein muss, wenn eine der Barrieren versagt bzw. die vorgesehene Wirksamkeit nicht erfüllt.

Ein weiteres Prinzip besteht darin, dass im Endlager möglichst viele "natürliche" Materialien, wie Bentonit und Kupfer, zum Einsatz kommen. Die Wahl derartiger Materialien macht es möglich, ihre Stabilität und ihr Verhalten in einem Endlagerumfeld über lange Zeiträume durch Vergleich mit ihren natürlichen Vorkommen abzuleiten.

Dem gleichen Prinzip getreu sollte das Endlager so geplant werden, dass es die in-situ Bedingungen im Gebirgskörper möglichst wenig beeinträchtigt. Dies betrifft ganz besonders die chemischen Auswirkungen des Endlagers.

Für die Analyse der Langzeitsicherheit wird vorausgesetzt, dass im Basisfall die komplette Isolation des radioaktiven Abfalls durch die intakten Kupferkanister über den gesamten Untersuchungszeitraum (1 Million Jahre) gewährleistet ist. Im Fall der "defekten Kanister" wird angenommen, dass ein paar wenige (1 bzw. 5) der insgesamt 4'000 Kupferkanister die strengen Qualitätskontrollen unterlaufen und mit einer durchdringenden Öffnung von 1 mm² die Radionuklidefreisetzung bestimmen.

Erkenntnisse bezüglich der Wirksamkeit der technischen Barrieren und ihrer Abhängigkeit vom Standort

Für den Fall, dass das Endlager wie geplant errichtet wird ("Base Scenario", also Referenzfall genannt), behält der Kupferkanister seine isolierende Funktion bei, auch wenn sich während der Evolution das Endlagersystem im Lauf der Zeit verändert. Die mechanischen Belastungen, die aus den verschiedensten Gründen auf den Kanister einwirken, sind viel zu schwach, als dass sie seine ordnungsgemäße

Funktionsstüchtigkeit gefährden könnten. Die chemischen Beanspruchungen in Form von Korrosion durch Sauerstoff oder Sulfide, die auf den Kanister einwirken, sind im Zeitraum von 1 Million Jahre nicht imstande, das Kupfergehäuse zu beschädigen und somit seine isolierenden Eigenschaften zu gefährden.

Die Sicherheitsanalyse basiert auf der Anforderung, dass die Oberflächentemperatur des Kanisters 100°C nicht überschreiten und das Grundwasser auf Endlagerniveau frei von Sauerstoff sein sollte. Ersteres kann durch ausreichenden Abstand der Einlagerungslöcher oder durch Anpassung des Brennstoffgehalts in den Kanistern erzielt werden. Im Referenzfall wurden keinerlei langfristige Veränderungen oder Prozesse identifiziert, die der Schlussfolgerung, dass das Grundwasser auf Endlagerniveau über einen Zeitraum von 1 Million Jahre frei von Sauerstoff ist, widersprechen würden.

Der Erhalt der Kanisterintegrität basiert ferner auf der Anforderung, dass der Puffer wie vorgesehen funktioniert. Das heisst, dass er seine geringe hydraulische Leitfähigkeit, eine genügend hohe Dichte und einen genügend hohen Quelldruck beibehält. Prozesse wie Ionenaustausch, Mineralumbildung oder Erosion des Puffers verursachen keine Veränderungen seiner Eigenschaften, welche die Funktion des Kanisters gefährden könnten – nicht einmal im Zeitraum von 1 Million Jahre.

Erkenntnisse bezüglich der Wirksamkeit der Geosphäre

Das Rückhaltevermögen der Geosphäre ist im Falle eines Kanisterversagens wichtig. Diese Kapazität ist nuklidspezifisch und wird durch die Halbwertszeit des Nuklids, nuklidabhängige chemische Faktoren und die Transporteigenschaften des Gesteins bestimmt. Letztere werden mit dem Faktor F bezeichnet, dem Produkt aus der advektiven Fliesszeit und dem benetzten Fliessquerschnitt.

Die errechneten Differenzen zwischen den Standorten in Bezug auf Grundwasserfliessraten und Fliesszeiten können auf standortspezifische hydrogeologische Bedingungen zurückgeführt werden. Die Gesteinsmasse um Aberg ist zum Beispiel hundertmal permeabler als die um Ceberg.

Nichtsorbierende Radionuklide wie ¹²⁹I dominieren oftmals die berechneten Strahlendosen und Risiken, da sie die Geosphäre stets überwinden, also unabhängig vom F-Faktor, so dass die Differenzen im F-Faktor zwischen den Standorten in der Analyse des Gesamtrisikos zu einem gewissen Masse ausgeglichen werden.

Die natürliche Bandbreite im F-Faktor hat den grössten Einfluss auf die berechneten Ergebnisse (d.h. die maximale Strahlendosis über einen Zeitraum 1 Million Jahre). Die Unsicherheiten in Bezug auf Sorption und Matrixdiffusion sind weniger wichtig als die Strömungsverhältnisse.

Schlüsselfragen hinsichtlich der Standortauswahl

In der Studie SR 97 werden keine spezifischen Standortanforderungen oder bevorzugte Standortrichtlinien präsentiert, da diese in einem anderen Dokument publiziert werden.

Das Szenarium Tektonik / Erdbeben veranschaulicht, wie wichtig es ist, dass das Endlager weit genug von grossen Kluffzonen entfernt positioniert wird, um das Risiko zu minimieren, dass die Kanister aufgrund seismischer Aktivitäten beschädigt werden.

SR 97 zeigt, dass viele Teile Schwedens potentiell für ein Endlager geeignet wären und insbesondere, dass sämtliche Standorte, die von SKB über viele Jahre als Teil ihres F&E Programms untersucht wurden, dafür von Natur aus geeignet wären. Dies bestätigt die vorläufige Schlussfolgerung der früheren SKB-91 Studie [2].

Fragestellungen in Hinblick auf die Standortcharakterisierung während der Standortauswahl

Es wird als eine der wichtigsten Aufgaben erachtet, das, was SKB "geoscientific suitability indicators" (geowissenschaftliche Eignungsindikatoren) nennt, zu identifizieren und zu publizieren. Informationen dieser Art werden in SR 97 nicht vorgestellt, sollten aber 2001 veröffentlicht werden. Dieser separate Bericht wird eine Entscheidungsgrundlage für die Einschätzung der Wichtigkeit spezifischer Parameter liefern, die während der Standortuntersuchung eingeholt werden können. Folglich wird der Bericht Auskunft darüber geben, wo in der Planung der Untersuchungen die Schwerpunkte gelegt werden sollten. Ausserdem wird er eine Vorgehensweise bieten, wie im Anschluss an Oberflächenuntersuchungen Standorte ausgewählt werden können.

Weitere Gesichtspunkte

SR 97 ist ein wichtiger Bestandteil des SKB Entwicklungsprogramms für ein Endlager. Es gibt allerdings weitere Teilprogramme, auf die in SR 97 kein Bezug genommen wird. Eins davon ist das parallel laufende Programm zur Standortauswahl. Kürzlich wurden zwei Standorte ausgewählt, die beide vorher noch nicht von der SKB untersucht worden waren.

Die drei hypothetischen Endlagerstandorte in SR 97 wurden so ausgewählt, dass der Kontrast hinsichtlich Geologie, Hydrogeologie und zukünftigen Klimaentwicklungen möglichst gross ist. Da die Menge der für diese Standorte vorhandenen Informationen verschieden ist, gestaltete sich der Vergleich problematisch. Die darauf beruhenden Unterschiede waren womöglich grösser als die von Natur aus gegebenen Unterschiede zwischen den Standorten.

Anmerkungen aus der Review relevant für die Standortwahl

Wie bereits angesprochen, soll noch in diesem Jahr ein eigener Bericht zur Standortwahl publiziert werden. SR 97 beinhaltet nur wenige Angaben, die speziell für die Standortwahl für ein Endlager geeignet sind. Eine Ausnahme ist der Verweis auf das Bestreben, das Endlager durch ausreichend Distanz von grossen Störzonen abzusondern, um das Risiko, das von seismischen Aktivitäten ausgeht, zu minimieren. Diese gedankliche Lücke wurde auch im NEA Peer Review-Bericht erkannt [3] und erläutert als "the lack of discernible link, within SR 97, between the results of safety assessments and the development of site investigations and siting criteria" (das Fehlen einer erkennbaren Verbindung innerhalb SR 97 zwischen den Ergebnissen der Sicherheitsanalysen und der Entwicklung von Standortuntersuchungen und Standortkriterien).

Referenzen

- 1) Deep repository for spent nuclear fuel. SR 97 – Post-closure safety. Main Report Volumes I & II. SKB Technical Report TR-99-06.
- 2) SKB 91: Final disposal of spent fuel: Importance of the bedrock for safety. SKB Technical Report 92-20.
- 3) SR 97: Post-closure safety of a deep repository for spent fuel in Sweden – An international peer review. NEA 2000.

TILA-99	VTT Energy im Auftrag von POSIVA (Finnland) März 1999
----------------	--

Zielsetzung und Randbedingungen

TILA-99 ist eine Sicherheitsanalyse für die Nachbetriebsphase. Sie stellt eine Weiterführung und Aktualisierung der früheren Studien TVO-92 und TILA-96 dar. Sie basiert auf detaillierten Standortuntersuchungen an vier Standorten (Hästholmen, Kivetti, Olkiluoto und Romuvaara) und trägt zu einem stufenweisen Programm für die bis Ende 2000 abzuschliessende Festlegung eines Standorts für die Endlagerung von abgebrannten Kernbrennstoffen im finnischen Grundgebirge bei. Die Resultate werden den vorläufigen gesetzlichen Bestimmungen, die von der finnischen Nuklearsicherheitsbehörde (STUK) vorgelegt wurden, gegenübergestellt.

Abfälle

Abgebrannte Kernbrennstoffe, geschätzt auf etwa 2600 tU, inkl. 1850 tU (10'500 Abfallgebinde) Brennstoff aus Siedewasser-Reaktoren und 760 tU (6300 Abfallgebinde) Brennstoff aus Druckwasser-Reaktoren.

Geologie

Kristallines Grundgebirge mit Bodenbedeckung.

Standort

Zwei Standorte im Landesinneren (Kivetti und Romuvaara) und zwei Küstenstandorte (Hästholmen und Olkiluoto).

Sicherheitskonzept

Das Endlager stellt ein System von mehreren passiven Barrieren dar; diese bestehen aus:

- Einem Kupfer-Stahl-Kanister, der über sehr lange Zeit (ungefähr eine Million Jahre) intakt bleibt und die vollständige Rückhaltung der Radionuklide gewährt.
- Stabile Abfallformen (Brennstoffmatrix, Verkleidung und tragendes Material der Abfallgebinde), welche die Freisetzung eingebetteter Radionuklide nach einem möglichen Behälterversagen begrenzen.
- Einem Puffer aus hoch kompaktiertem Bentonit, der die Kanister mechanisch schützt, garantiert, dass die mobilisierten Radionuklide nur auf dem diffusiven Wege freigesetzt werden, als Kolloidfilter fungiert und die Radionuklide während des Transports retardiert und dispergiert.
- Einem kristallinen Grundgebirge, das die menschliche Umgebung von den abgebrannten Brennstoffen isoliert und diese vor den Vorgängen an der Oberfläche und im oberflächennahen Bereich schützt,

günstige Bedingungen für die technischen Barrieren bewahrt, den Grundwasserfluss begrenzt sowie potentielle Freisetzungen aus dem Endlager retardiert, dispergiert und verdünnt.

Erkenntnisse bezüglich der Wirksamkeit der technischen Barrieren und ihrer Abhängigkeit vom Standort

Es wird erwartet ("best estimate"), dass die Kupfer-Stahl-Kanister unversehrt bleiben und es während einer Million Jahre zu keiner nennenswerten Freisetzung von Radionukliden kommen wird. Sehr langfristig gesehen, also nach mehreren Millionen Jahren, könnten gewisse Mengen an ¹²⁹I und einzelnen langlebigen Actiniden (einschl. Natururan) und ihren Tochternukliden freigesetzt werden, ohne jedoch untragbare radiologische Konsequenzen zu verursachen. Die Evaluation der normalen Entwicklung des Endlagers an den vier Standortkandidaten wies auf keinerlei generellen oder standortspezifischen Faktor hin, der eine Abänderung dieser Einschätzung der Entwicklung der technischen Barrieren begründen würden.

Wird hypothetisch vom frühzeitigen Versagen eines oder mehrerer Kanister ausgegangen, zeigen konservative Modelle und Daten, dass selbst dann keine untragbaren Konsequenzen entstehen; nicht einmal bei extrem pessimistischen "was wenn" Abweichungen vom erwarteten Verhalten. Beispiele für derartige Abweichungen sind das "Verschwinden" einer Kanisterwand sofort nach dem Verschluss des Endlagers, rasche Degradation der Brennstoffmatrix, äusserst pessimistische Schätzwerte für die Löslichkeit und schlechte Wirksamkeit des Bentonitpuffers. Es kann von einer grossen Anzahl "verschwundener" Kanisterwände ausgegangen werden, ohne dass die vorgeschlagenen gesetzlichen Grenzwerte für die Strahlendosis überschritten würden.

Lediglich in ein paar Extremfällen, in denen hohe Grundwasserflüsse, (in den meisten Fällen) salinare Wässer und einige wesentliche Abweichungen von den erwarteten Normalbedingungen zusammentreffen, liegt die maximale Anzahl von Kanisterwänden, die bereits anfänglich als defekt angenommen werden oder gleichzeitig "verschwinden", unter 100, bevor untragbare Konsequenzen entstehen.

Erkenntnisse bezüglich der Wirksamkeit der Geosphäre

TILA-99 empfiehlt, dass das Hauptaugenmerk bei der Untersuchung natürlicher Systeme verlegt werden sollte, nämlich weg vom Geosphärentransport und hin zu Gesichtspunkten, die direkter mit der Integrität und Wirksamkeit der technischen Barrieren zusammenhängen (siehe unten). Dennoch können einige Überkonservativitäten der Geosphärenmodellierung durch detaillierte Untersuchungen von Strömungsverhältnissen in salinaren Wässern an Küstenstandorten und Untersuchungen der Löslichkeit, Sorption und Diffusionskonstante gewisser Kationen unter salinaren Wasserbedingungen abgeschwächt werden.

Schlüsselfragen hinsichtlich der Standortauswahl

Hinsichtlich der Sicherheit in der Nachbetriebsphase kann zusammenfassend gesagt werden, dass alle vier Standortkandidaten geeignet sind, ein Endlager für abgebrannte Brennelemente aufzunehmen. Aus der Sicherheitsanalyse gehen keinerlei Gründe hervor, die zum Ausschluss eines der Kandidaten führen würden. Ferner ergaben die Freisetzungs- und Transportanalysen keine stichhaltigen Argumente, um einem der Standortkandidaten eine bevorzugte Stellung zuzuweisen.

Abschliessend wurde festgestellt, dass jegliche Vergleichsstudien zur Standorteignung hinsichtlich der Sicherheit in der Nachbetriebsphase nicht nur auf quantitativen Gegenüberstellungen irgend eines Sicherheitsindex (z.B. der berechneten Strahlendosis) basieren sollten, sondern auf einer qualitativen Bewertung von Faktoren einschliesslich derer, die im folgenden im Zusammenhang mit der Standortcharakterisierung aufgeführt sind.

Geotechnische Faktoren sollten in der Standortwahl schwerpunktmässig behandelt werden, weil günstige Bau- und Betriebsbedingungen im tiefen Grundgebirge die Voraussetzung dafür bilden, dass das Endlager seine Aufgabe über lange Zeiten gut erfüllt.

Fragstellungen in Hinblick auf die Standortcharakterisierung während der Standortauswahl

Die detaillierte Standortcharakterisierung sollte auf die folgenden geologischen und geotechnischen Faktoren eingehen:

- Die Vorhersage der künftigen Entwicklung von Standorten an der Küste, was für die finnischen Standorte durch den variierenden Salzgehalt des Grundwassers und die fortwährende Hebung erschwert wird
- Standortspezifische Differenzen im Verdünnungspotential der Biosphäre (obwohl die Autoren nicht glauben, dass die gegenwärtigen Biosphärenbedingungen an potentiellen Austrittszonen als entscheidender Faktor für die Standortwahl betrachtet werden sollten)
- Das räumliche Muster der Grundwasserströmung, das stark durch die lokale Topographie beeinflusst werden kann
- Das Vorhandensein wasserführender Klüftzonen, welche an verschiedenen Standorten die geplanten Endlager durchqueren
- Beschränkungen in der Tiefe, mit denen besonders an den Küstenstandorten nachteilige Einflüsse von hoch salinarem Grundwasser vermieden werden sollen
- Klüftzonen, die Spannungsverhältnisse im Gebirge und andere geotechnische Faktoren, welche die räumliche Auslegung, den Bau und den Betrieb eines Endlagers beschränken können.

Weitere Gesichtspunkte

Sämtliche Standortkandidaten befinden sich in Gegenden mit gewöhnlichen Gesteinsarten und mit nur geringer Erwartung für Erz- oder andere Mineralienvorkommen. Somit ist das Risiko für unbeabsichtigte menschliche Eingriffe gering.

Referenzen

Safety Assessment of Spent Fuel Disposal in Hästholmen, Kivetti, Olkiluoto and Romuvaara TILA-99; T. VIENO & H. NORDMAN; POSIVA 99-07; March 1999.

SEDIMENTGESTEINE

Dry Run 3	Her Majesty's Inspectorate of Pollution (HMIP, Grossbritannien) 1992
------------------	---

Zielsetzung und Randbedingungen

Probelauf für eine Methodologie der Sicherheitsanalyse, die auf einer probabilistischen Risikoanalyse (PRA) beruht. Ziel war die Entwicklung der Möglichkeit zur unabhängigen Sicherheitsbeurteilung im Auftrag der Genehmigungsbehörde. Dritte Arbeit in einer Reihe von Probelaufen zur Untersuchung hypothetischer Endlager für schwachaktive und mittelaktive Abfälle am Standort Harwell, Oxfordshire, GB. Die primäre spezifische Aufgabenstellung galt der Darstellung eines zeitabhängigen PRA-Verfahrens, das Unsicherheiten im Zusammenhang mit zukünftigen klimatischen Veränderungen berücksichtigt [1].

Abfälle

Bis 2030 erwartete Betriebsabfälle aus Grossbritannien: ca. 1'200'000 m³ schwachaktive (SAA) und 150'000 m³ mittelaktive Abfälle (MAA).

Geologie

Flach einfallende Abfolge von Tonen und Aquiferen des Jura und der Kreide unter einem regional ausgedehnten Steilabfall.

Standort

Der Standort Harwell in Oxfordshire wurde als Demonstrationsstandort gewählt. Für diesen Standort standen aus Tiefbohrungen der frühen 80'er Jahre Daten zur Verfügung.

Sicherheitskonzept

Das Endlager wird in drei Sohlen angelegt: zwei Sohlen für schwachaktive Abfälle in den Tonen des Gault/Kimmeridge, ca. 150 m u. GOK, und eine Sohle für mittelaktive Abfälle im Oxford-Ton, ca. 300 m u. GOK.

Die Abfälle werden in einem System von Tunneln mit Betonauskleidung und zementgebundenem Verfüllmaterial eingelagert. Die Einlagerung erfolgt für mittelaktive Abfälle hauptsächlich in rostfreien Edelstahlfasern, für schwachaktive Abfälle in Fasern und Behältnissen aus Baustahl. Zementgebundenes Verfüllmaterial gewährleistet eine geringe Löslichkeit der wichtigsten Radionuklide und grosse Sorptionsflächen.

Der umgebende Ton begrenzt die Grundwasserbewegung in und die Migration der Radionuklide aus den Tunneln; advective und diffusive Migration in den oberen Tonschichten, aber überwiegend diffusive Migration in den unteren Tonschichten (Oxford-Ton).

Erkenntnisse bezüglich der Wirksamkeit der technischen Barrieren und ihrer

Abhängigkeit vom Standort

Die technischen Barrieren werden nicht als besonders wirksam erachtet: es wird angenommen, dass noch während der Betriebsphase oder beim Verschliessen des Endlagers die Abfallbehälter aufgrund innerer Korrosion und die Tunnelauskleidung durch Rissbildung beim Abbinden versagen.

Überschlagsrechnungen zeigten, dass die meisten Actiniden, kurzlebige Radionuklide und sorbierende Radionuklide erheblich zurückgehalten werden und die Aufmerksamkeit daher auf ^{36}Cl , ^{99}Tc , ^{129}I und die ^{237}Np -Kette ($^{237}\text{Np} \rightarrow ^{233}\text{U} \rightarrow ^{229}\text{Th}$) zu richten ist.

Das dominante Radionuklid war ^{129}I . Für dieses Radionuklid zeigte unter den Parametern der technischen Barrieren einzig die Durchlässigkeit des Einlagerungshohlraums (Verfüllmaterial) in den Endlagertunneln für schwachaktive Abfälle einen nennenswerten Einfluss. Dies ist eine Folge der relativ guten Eigenschaften (geringe effektive Porosität) des Oxford-Tons und der weniger guten Eigenschaften der Tone des Gault/Kimmeridge.

Erkenntnisse bezüglich der Wirksamkeit der Geosphäre

Unter der Annahme konstanter Umweltbedingungen (wie heute) führte der Haupttransportpfad vom SAA-Endlager nach unten, vom MAA-Endlager aufwärts zum Corallian Aquifer und von dort zur Oberfläche im oberen Einzugsgebiet der Themse.

Typische deterministische Transportzeiten für ^{129}I waren 100'000 Jahre, um aus den Tonen des Gault/Kimmeridge auszutreten, 300'000 Jahre, um aus dem Oxford-Ton auszutreten und 100'000 Jahre entlang des Corallian Aquifer.

Nach der PRA waren die einflussreichsten Parameter die

- Radionuklidsorption im Oxford-Ton
- Radionuklidsorption im Corallian Aquifer
- Porosität (effektive Porosität) im Oxford-Ton

Zwei Szenarien mit Klimaveränderungen wurden durch Parameterveränderungen in der PRA betrachtet: (1) eine vordefinierte Sequenz basierend auf der geo-historischen Klimaabfolge eines Standorts in Nord-England und (2) eine stochastisch generierte Sequenz basierend auf Übergangswahrscheinlichkeiten,

welche aus geo-historischen Aufzeichnungen abgeleitet wurden. Unveränderliche Alternativbedingungen wie z.B. nordische Bedingungen und Tundra, wurden ebenfalls ausgewertet.

In beiden Szenarien für Klimaveränderungen wurden signifikante Freisetzungen in die Kreideformation oberhalb der Tone des Gault/Kimmeridge festgestellt. Ein Teil dieser Freisetzungen rührte von aufwärtsgerichteten Radionuklidmigrationen her, die ausgehend vom MAA-Endlager durch sämtliche überlagernden Schichten in die Kreideformation gelangten.

Die Ergebnisse zeigen, dass durch die Berücksichtigung von veränderten Umweltbedingungen andere Pfade erschlossen werden können. Für den Standort Harwell ist die Sequenz mit den Klimaveränderungen wichtig. Die Ergebnisse dieser Sequenz hätten nicht durch die Kombination von Resultaten ermittelt werden können, die für verschiedene konstant gehaltene Klimabedingungen errechnet wurden.

Schlüsselfragen hinsichtlich der Standortauswahl

Eine in Dry Run 3 nicht untersuchte Schlüsselfrage ist die Möglichkeit einer Verschlechterung der Toneigenschaften aufgrund von Gasbildung und -freisetzung sowie durch Wechselwirkung mit dem Zement. Ansonsten ist durch die ausgezeichneten Barriereigenschaften der Tone ein hoher Grad an Langzeitsicherheit gegeben.

Am Standort Harwell ist die Oxford-Tonschicht ca. 30-40 m mächtig. Das ist ausreichend für das Endlagerkonzept mit Tunneln von kleinem Durchmesser (ca. 5 m Durchmesser). Die Tonschicht ist von uneinheitlichen Sedimenten umgeben, denen im Sicherheitsnachweis keine Barrierewirkung beigemessen wird.

Geotechnische Fragestellungen wurden in Dry Run 3 nicht detailliert berücksichtigt, wären jedoch für die Durchführbarkeit und die Anlagenplanung im Hinblick auf eine Realisierung wichtig.

Fragestellungen in Hinblick auf die Standortcharakterisierung während der Standortauswahl

In einer Parallelstudie wurde die Auswirkung des Umfangs der Standortuntersuchung auf die Ermittlung der radiologischen Schutzwirkung untersucht [2].

In dieser Studie wurde ein synthetisches regionales Standortmodell entwickelt und dieses an zwei unabhängige Teams zur "Untersuchung" übergeben. Jedes Team führte mit zunehmend umfangreicheren echten und synthetischen Daten drei Risikoanalysen durch.

Zu den Schlussfolgerungen gehörte die Erkenntnis, dass die zusätzlichen Daten zwar zu einer Verfeinerung des Modells und seiner Daten führten, es jedoch Schwierigkeiten gab, das ursprüngliche konzeptuelle Modell nachzubilden. Das heisst, die Unsicherheit des ursprünglichen konzeptuellen Modells wurde nicht voll ermittelt oder repräsentiert, und die Ergebnisse konvergierten nicht zwingend gegen das "wahre" Modell des synthetischen Standorts.

Dies zeigt eine generelle Schwierigkeit bei der Erstellung eines adäquaten regionalen Modells, das die tatsächliche Unsicherheit repräsentiert.

Anmerkungen aus der Review relevant für die Standortwahl

Dry Run 3 wurde unter der Leitung der Sandia National Laboratories durch eine unabhängige "peer review" überprüft [3].

Die Review konzentrierte sich auf Fragestellungen zur Methodologie. Im Zusammenhang mit der Standortwahl und den Standortmodellen stellte die Review jedoch fest, dass das Vorgehen für die Behandlung der räumlichen Variabilität ungenügend war.

Referenzen

- 1) Dry Run 3: A Trial Assessment of Underground Disposal of Radioactive Waste Based on Probabilistic Risk Analysis: Overview. SUMERLING T. (Ed.), DoE/HMIP/RR/92.039, June 1992 (plus 10 supporting volumes).
- 2) A Study of the Effect of the Extent of Site Investigation on the Estimation of Radiological Performance: Overview. MACKAY R., DoE/HMIP/RR/93.053, March 1993 (plus 2 supporting volumes).
- 3) Peer Review of the UK DoE Dry Run 3 Exercise. ZIMMERMAN D.A. et al., SANDIA Report SAND92-1945 September 1992.

Plan Konrad	Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), bzw. Bundesamt für Strahlenschutz (BfS – ab 1989, Deutschland) Stand September 1986 in der Fassung vom April 1990
--------------------	---

Zielsetzungen und Randbedingungen

Grundlage für die Planfeststellung der Schachanlage Konrad als Endlager für radioaktive Abfälle. Die Sicherheitsanalyse ist Bestandteil der regulatorischen Anforderungen im Genehmigungsverfahren.

Wissenschaftliche Voruntersuchungen im Jahr 1975 hatten keine Hinweise ergeben, welche die Schachanlage von vornherein als ungeeignet ausgewiesen hätten. Ab Herbst 1976 weitere Eignungsuntersuchungen. Genehmigungsverfahren (Planfeststellung) durchgeführt, positiver Entscheid erwartet.

Abfälle

650'000 m³ Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung im Zusammenhang mit der friedlichen Nutzung der Kernenergie und dem sonstigen Umgang mit radioaktiven Stoffen im Geltungsbereich des Atomgesetzes

Die Abgrenzung zwischen wärmeentwickelnden und vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfällen erfolgt durch die Annahmekriterien für das Endlager Konrad, welche aus betrieblichen und nachbetrieblichen Sicherheitsbetrachtungen abgeleitet wurden.

Geologie

Wirtgestein ist weiträumige Eisenerzlagerstätte im Mittleren Korallenoolith (Oxford, Malm, Obere Jura). Jura transgressiv überlagert von ruhig und horizontal geschichteten, mächtigen Ton- und Mergelgesteinsedimenten der Unterkreide (Alb, Wealden bis Apt); Teil eines Systems von Salzstockrandsenken.

Standort

Ehemaliges, sehr trockenes Eisenerzbergwerk mit zwei Schächten. Teufe des Grubengebäudes zwischen 800 und 1300 m. Erzvorkommen erreicht an keiner Stelle die Erdoberfläche, Wirtgestein erreicht erst in ca. 30 km Entfernung eine oberflächennahe Lage; umfangreiche standortspezifische Daten liegen vor.

Sicherheitskonzept

Nahfeld: Verzögerte Mobilisierung der Radionuklide aufgrund der Fixierung im konditionierten Abfall, Sorption, Löslichkeitsbegrenzung, geringe Durchströmung des Grubengebäudes. Keine Barrierewirkung der Abfallbehältnisse.

Fernfeld: Da Wirtgestein (Oxford) im Vergleich zu sonst betrachteten Wirtgesteinen eine relativ hohe Permeabilität aufweist, wird die geologische Barriere primär durch die sehr geringdurchlässige Überdeckung durch die Unterkreide und den Umstand gebildet, dass das Wirtgestein praktisch allseitig von Nicht- oder Geringleitern eingeschlossen ist: Unterkreide im Hangenden, Süden und Osten, Zechsteinsalze im Westen, Ton- und Mergelgesteine des Dogger, Lias, Keuper im Liegenden. Geringe Wasserzirkulation. Freisetzungspfade entweder durch sehr geringdurchlässige Deckschichten oder über grosse Distanzen entlang Wirtgestein oder anderen Schichten erhöhter Permeabilität gegen NNE. Lange Wasserfliesszeiten von mehreren 100'000 Jahren. Sorption und Verdünnung. Keine Berücksichtigung von Dichteeffekten aufgrund saliner Tiefengrundwässer.

Erkenntnisse bezüglich der Wirksamkeit der technischen Barrieren und ihrer Abhängigkeit vom Standort

Technische Barrieren (ausser Schachtverschluss) von relativ geringer Bedeutung, ausser für sehr pessimistische Annahmen betreffend Geosphärentransport (im Sinne von Extrembetrachtungen)

Verzögerte Freisetzung von Radionukliden aus Nahfeld abhängig vom geringen Wasserfluss durch das Endlager; dieser ist abhängig von der geologisch / hydrogeologischen Situation am Standort

Schachtverfüllung: Verhindert Wasserzutritt und Radionuklidfreisetzung entlang des Schachtes und seiner Auflockerungszone durch die Deckschichten (keine signifikante Erhöhung gegenüber ungestörten Verhältnissen). Hohe Bedeutung im Sicherheitskonzept, da rasche Radionuklidfreisetzung bei ungenügender Schachtverfüllung nicht ausgeschlossen wäre. Anforderung der chemischen Langzeitbeständigkeit und mechanischen Eignung bez. lithostatischem Druck und quellfähigen Mineralien in der Unterkreide. Geringmächtige und/oder raubbare Auflockerungszone, begrenzte Fähigkeit zur Selbstheilung gewisser Unterkreidetone.

Erkenntnisse bezüglich der Wirksamkeit der Geosphäre

Das Grubengebäude zeigt bei Bewetterung keine erkennbaren Wasserzutritte (aussergewöhnlich trockenes Eisenerzbergwerk); sehr hohes Wasseralter, geringe Fliessgeschwindigkeiten.

Gesamtmächtigkeit der geologischen Barriere 750 m bis 1300 m, hydraulisch wirksame Barriere Unterkreide (400 m bis 600 m mächtig, 100 m bis 300 m unter Geländeoberfläche) mit guten Sorptionseigenschaften.

Keine natürlichen direkten hydraulischen Verbindungen zwischen dem obersten Grundwasserstockwerk und dem Endlager in der Nähe des Endlagerstandortes; Wirtgestein abgesehen von sehr entfernter hydraulischer Verbindung zur Oberfläche allseitig von Gering- oder Nichtleitern umgeben.

Tektonische Störungen und Störzonen reichen nur teilweise in die Unterkreide, dort hydraulisch nur von untergeordneter Bedeutung; mässiger Einfluss der Randstörzonen an den Salzstockflanken.

Dadurch potentielle Freisetzungspfade durch ungestörte, sehr geringdurchlässige Deckschichten oder über lange Distanzen, mit Sorption: hochverzögerte Freisetzung lediglich von nicht- oder geringsorbierenden, langlebigen Spaltprodukten rechnerisch nach einigen 100'000 Jahren und von extrem langlebigen Uran-Isotopen (^{235}U , ^{236}U , ^{238}U) und ihren Folgeprodukten nach mehreren Mio. Jahren.

Geologische Langzeitszenarien (Eiszeiten, Abtragungen, epirogene Bewegungen und Magmatismus) sind ohne Bedeutung für die Langzeitsicherheit.

Gebirgsmechanisch günstige Eigenschaften, keine sicherheitsrelevante gebirgsmechanische Schädigung der geologischen Barriere durch das bestehende Grubengebäude oder das bevorstehende Auffahren der Endlager-Hohlräume.

Schlüsselfragen hinsichtlich der Standortauswahl

Gute Erkenntnisse der geologischen und hydrogeologischen Verhältnisse; Vorkenntnisse betreffend der geringen Grundwasserzirkulation aus der beobachteten Trockenheit des Eisenerzbergwerks.

Ausgedehnte Verbreitung, ruhige Lagerung und geringe Durchlässigkeiten der tonigen und mergeligen Schichten oberhalb des Grubengebäudes.

Fehlender Aufschluss des Wirtgesteins an der Erdoberfläche bis in grosse Entfernungen.

Keine abbauwürdigen Bodenschätze: Eisenerzlager unter heutigen und absehbaren Bedingungen nicht abbauwürdig, keine Beeinträchtigung von anderen wirtschaftlich bedeutenden Rohstofflagerstätten.

Fragestellungen im Hinblick auf die Standortcharakterisierung während der Standortauswahl

Verbreitung der geologischen Schichten und Bewertung der Barriereigenschaften des Deckgebirges; Erweiterung des Kenntnisstandes durch zusätzliche Untersuchungen nach Einleitung des Planfeststellungsverfahrens (insbesondere reflexionsseismische Untersuchungen, Bohrung Konrad 101).

Nachweis der folgenden hydrogeologischen Schlüsselfaktoren:

- Geringe hydraulische Bedeutung von tektonischen Störungen und Störzonen, speziell in der hydraulisch bedeutenden Unterkreide, der Randstörzonen der benachbarten Salzstöcke sowie der Transgressionsfläche.
- Keine hydraulische Verbindung zwischen dem Grubengebäude und der erhöht permeablen Schicht im Liegenden (Cornbrash) besteht.
- Wirksamkeit der geologischen Barriere über lange Zeiträume (geologische Langzeitprognose).
- Dichtheit von alten und neuen Bohrungen durch das Deckgebirge (teilweise unter Verwendung von Selbstabdichtungsprozessen).

Untersuchung der Standorteigenschaften hinsichtlich Schachtverschluss, speziell Ausdehnung und Permeabilität der Auflockerungszone.

Weitere Gesichtspunkte

Die Radiotoxizität der Abfälle ist nach einigen 100'000 Jahren auf die natürliche Radiotoxizität der Endlagerformation abgeklungen.

Die Restverfüllung des Grubengebäudes nach Abschluss des Einlagerungsbetriebes erfolgt durch aufgehaldetes Haufwerk aus Konrad oder geeignetem Fremdversatzmaterial.

Dichteeffekte durch saline Tiefengrundwässer wurden mit Hilfe vereinfachter Grundwasser-Modellrechnungen untersucht, bei der Modellierung des Radionuklidtransportes im Zusammenhang mit dem Sicherheitsnachweis jedoch nicht weiter berücksichtigt.

Berücksichtigung von Komplexbildnern, insbesondere EDTA, aus dem Abfall bei der Festlegung der Sorptionskonstanten für die natürlichen Barrieren.

Referenzen

Bundesamt für Strahlenschutz: Plan Endlager für radioaktive Abfälle, Schachtanlage Konrad Salzgitter, Stand: September 1986 in der Fassung vom April 1990.

Nirex 97 (& Nirex 95)	UK Nirex Ltd. (Grossbritannien) 1997 (Nirex 95: 1995)
--------------------------------------	--

Zielsetzung und Randbedingungen

Nirex 95 war die erste von Nirex publizierte Sicherheitsanalyse [1]. Sie erschien unmittelbar vor und als Beitrag zur öffentlichen Hauptanhörung zum Gesuch für den Bau des untertägigen Felslabors (Rock Characterisation Facility – RCF) zur Erfassung weiterer Standortdaten in Sellafield. Es war keine vollständige Sicherheitsanalyse des Endlagerkonzepts, es wurde lediglich der Grundwasserfliesspfad betrachtet. Nirex 97 ergänzte die frühere Studie mit einer detaillierteren Analyse zum selben Grundwasserfliesspfad und mit der international ersten umfassenden Studie zur Radionuklidfreisetzung in der Gasphase [2]. Die Schwerpunkte lagen hauptsächlich auf der Entwicklung, der Ausdehnung auf grössere Massstäbe ("Upscaling") und der Kalibrierung von konzeptuellen Modellen für die Grundwasserbewegung und auf der Modellierung der Biosphäre.

Abfälle

Ungefähr 270'000 m³ schwach- und mittelaktive Abfälle aus dem Betrieb von Kernkraftwerken und der Wiederaufarbeitung in Sellafield.

Geologie

Grundgebirge (paläozoische Tuffe) unter einer mächtigen Sedimentüberdeckung, küstennah, mit Bergen zum Landesinneren hin und einem tiefen Sedimentbecken vor der Küste.

Standort

Ungefähr 5 km landeinwärts von Sellafield. Im Anschluss an mehrjährige Untersuchungen in Tiefbohrungen und mit geophysikalischen Methoden in einem umfassenden lokalen und regionalen Standortcharakterisierungsprogramm. Bestandteil der Planung für das Endlager waren grosse Kammern in einer Tiefe von ca. 700 m.

Sicherheitskonzept

Den Behältern für die SMA-Abfälle wird für die Nachbetriebsphase keine physikalische Rückhaltewirkung zugeschrieben (obwohl ihre erwartete Lebensdauer ca. 10⁴ Jahre beträgt). Grosse Mengen von zementgebundenem Verfüllmaterial (patentiertes NRVB) sorgen für die chemische Rückhaltung durch Beeinflussung von Löslichkeit und Sorption. Eine hohe Porosität berechtigt zur Annahme der vollständigen chemischen Durchmischung in der technischen Barriere sowie der Ausbreitung von Gas. Matrixdiffusion erfolgt während des Transports in den Klüften des Wirtgesteins. Der mächtige darüberliegende

Sandsteinaquifer bildet ein grosses Verdünnungselement, durch das grosse Volumenflüsse in Richtung Küste stattfinden. Freisetzungen in den Ozean unter "heutigen" Bedingungen, alternative Freisetzungen an Land wurden für veränderte Klimabedingungen untersucht.

Erkenntnisse bezüglich der Wirksamkeit der technischen Barrieren und ihrer

Abhängigkeit vom Standort

Niedrige Löslichkeiten und/oder hohe Sorption vieler sicherheitsrelevanter Nuklide in der zementhaltigen technischen Barriere sorgen für ein hohes Mass an Rückhaltung. Das Absinken des pH durch "Spülen" der technischen Barriere hängt vom Grundwasserfluss im Nahfeld ab. Laut Berechnungen halten pH-Werte von > 10,5 während ca. 600'000 Jahre an. Der Grundwasserfluss im Nahfeld ist eine Schlüsselgrösse für die Freisetzungsprofile von einigen Radionukliden. Dennoch bedeutet die Dominanz der Ausbreitung im Fernfeld, dass eine substantielle Reduktion des Nahfeldflusses notwendig wäre, um die Auswirkungen in der Biosphäre wahrnehmbar zu beeinflussen.

Verschiedene Annahmen bezüglich der Rolle der komplexbildenden organischen Stoffe im Nahfeld (und Fernfeld) haben lediglich einen untergeordneten Einfluss auf die Strahlendosis, weil die berechneten Auswirkungen durch die Geosphäre dominiert werden. Das Verhalten der organischen Stoffe bestimmt jedoch im wesentlichen die Wirksamkeit des Nahfelds. (So führt z.B. die pessimistische Annahme eines 100 %igen Abbaus der Zellulose zu Komplexbildnern, kombiniert mit dem sofortigen und vollständigen Ausfall des physikalischen Einschlusses sogar für die sehr kurzlebigen Radionuklide zu hohen Freisetzungen aus dem Nahfeld.) Ohne das Einwirken von organischen Stoffen könnte auch der Kolloidtransport wesentlich werden (ansonsten bleiben die Auswirkungen verdeckt), allerdings nur sehr langfristig.

Anfänglich bewirkt die hohe Permeabilität des NRVB im Vergleich zu der des Füllmörtels im Abfallgebäude den Effekt eines "hydraulischen Käfigs" (analog dem Faraday-Käfig), der jedoch mit der Degradation des Mörtels im Abfallgebäude verloren geht.

Der geringe Grundwasserfluss im Gestein in Kombination mit den grossen Mengen an Fe und U im Endlager bewirkt für >1 Ma reduzierende Bedingungen im Porenwasser der technischen Barrieren.

Hoch poröses Verfüllmaterial und das geklüftete Wirtgestein stellen sicher, dass Gasüberdrücke für das Endlager kein Problem bilden. Der zementgebundene Füllmörtel in den Abfallgebänden und den Kammern reagiert mit und immobilisiert jegliches $^{14}\text{CO}_2$, das bei der Abfalldegradation entsteht. Eine verzögerte Wiederaufsättigung des Nahfelds (oder ein weniger permeables Fernfeld) würde die berechnete Strahlendosis von ^3H reduzieren.

Erkenntnisse bezüglich der Wirksamkeit der Geosphäre

Die Geosphäre verursacht eine wirksame Rückhaltung, die für viele Radionuklide einen wesentlichen radioaktiven Zerfall zur Folge hat. Dies zusätzlich zu jenen Radionukliden, die im Nahfeld zerfallen würden, sofern die optimistischere Annahme einer physikalischen Rückhaltung in den technischen Barrieren während 10^4 Jahren getroffen wird.

Falls organische Komplexbildner die Mobilität der Radionuklide wesentlich beeinflussen, stellt die Geosphäre für das "zeitliche Verteilen" der Austrittszeiten in die Biosphäre (durch Dispersion und Verdünnung) für sämtliche Radionuklide eine wesentlich wirksamere Barriere dar als das Nahfeld. Falls die organischen Stoffe eine untergeordnete Rolle spielen, haben die Geosphäre und das Nahfeld für gewisse Radionuklide (speziell U) vergleichbare Auswirkungen.

Für ^{36}Cl , das entscheidende Radionuklid in der Risikoanalyse während der anfänglichen Freisetzung, ist die Verdünnung in den überliegenden Aquiferen der wichtigste Faktor.

Bestimmte standortspezifische strukturelle Eigenschaften des Strömungsfeldes beeinflussten die Auswirkungen anderer Radionuklide: z.B. hängt die ^{238}U -Langzeit-Freisetzung von der Kombination von Annahmen zur organischen Komplexbildung und zu den Eigenschaften von grossen Störzonen ab.

Schlüsselfragen hinsichtlich der Standortauswahl

Die berechnete Strahlendosis für ^{36}Cl ist im marinen Umfeld um einiges geringer. Die langfristige Lage der Küste und ihre zeitlichen Veränderungen haben markante Auswirkungen auf das ermittelte Risiko. An diesem Ort wird sich der Verlauf der Küste in den kommenden 100'000 Jahren voraussichtlich um mehrere 10 km vor und zurück verschieben.

Risiken im Zusammenhang mit der Nutzung von Brunnen hängen stark vom Brunnentyp, seiner Teufe und seinem Ort sowie von der Charakterisierung der betroffenen Bevölkerungsgruppe (Grösse, Lebensgewohnheiten) ab.

Die steile Topographie im Landesinneren in Verbindung mit der Mischstruktur des Grundgebirges und der gestörten Sedimente bewirken erhöhte hydraulische Gradienten und ein eher komplex zoniertes tiefes Grundwassersystem mit stark unterschiedlichen Fliessraten. Dadurch entstanden Probleme betreffend der Zuverlässigkeit der Interpretation (und mögliche Schwierigkeiten bei der Auswertung von Vergletscherungsszenarien, da die Region während einer Vergletscherung ein komplexes Verhaltensmuster aufweisen würde).

Fragstellungen in Hinblick auf die Standortcharakterisierung während der Standortauswahl

Im regionalen Massstab können effektive Grundwasserströmungsparameter nicht gemessen werden, sondern müssen durch "Upscaling" kleinskaliger Messwerte hergeleitet werden, wobei den Variabilitäten und Unsicherheiten statistisch Rechnung zu tragen ist.

Die räumliche Variabilität der Geosphäreigenschaften ist sehr wichtig, da sie sich beim Grundwassertransport auf die Modellannahmen für die longitudinale und laterale Dispersion auswirkt. Diese Faktoren zeigten bei der Ermittlung der Radionuklid-Freisetzung an Land einen grossen Einfluss. Jedoch standen keine standortspezifischen Daten zur Verfügung (sie sollten einen Schwerpunkt für das RCF darstellen).

Strömungsmodelle können mit Messwerten für Pegelstände, Temperatur, Salinität und Fliessverhältnisse in Bohrlöchern erfolgreich kalibriert werden (unabhängig von den Daten, die für den Modellaufbau verwendet wurden): dies sollte ein Hauptziel eines Programms zur Standorterkundung sein.

Standortcharakterisierende Daten von hoher Qualität erlauben es, für die Strömungseigenschaften einer jeden Gesteins- und Deckschichtformation am Standort ein eigenes Modell zu erstellen.

Das Verständnis der Paläohydrogeologie ist wichtig, besonders was den Ursprung der Schwankungen im Salzgehalt und die Stabilität der Salzwasser-Grenzfläche anbelangt (welche die Grenze zwischen den Zonen mit strömungs- und mit diffusionsdominiertem Transport kennzeichnen könnte).

Standortuntersuchungen unter den gegebenen geologischen Bedingungen zeigten sich als besonders teuer und kompliziert.

Weitere Gesichtspunkte

^{36}Cl und ^{226}Ra dominieren die Strahlenexposition bis ca. 10^6 Jahre: ^{36}Cl wegen seiner hohen Löslichkeit und geringen Sorption, ^{226}Ra als Folgeprodukt des über lange Zeiträume transportierten ^{238}U . Die Strahlendosis von ^{36}Cl erreicht das Maximum nach wenigen Zehntausenden von Jahren, möglicherweise bereits 2000 Jahre nach Abfalleinlagerung.

Klimaveränderungen (im besonderen die Auswirkungen einer Vergletscherung auf den Grundwasserfluss) wurden in den Szenarien nicht berücksichtigt, ausser durch unterschiedliche Annahmen für die Biosphäre. Menschliches Eindringen und andere plötzliche Ausfallszenarien wurden nicht analysiert.

Obwohl diese Arbeit einen Meilenstein in der detaillierten Analyse der Gasentwicklung und deren Auswirkungen darstellte, wurde ein kombiniertes Szenarium für Freisetzung auf dem Gas- und Grundwasserpfad nicht untersucht.

Anmerkungen aus der Review relevant für die Standortwahl

Bei der öffentlichen Anhörung wurden als Resultat der Review (sowohl von Laien als auch von Experten) viele Feststellungen zur hohen geologischen Komplexität des Standortes gemacht, die sich in den Ergebnissen der Sicherheitsanalyse durch erhebliche Unsicherheiten niederschlugen. Nirex konnte diese Überlegungen beim gegebenen Stand der Arbeiten nicht entkräften [3].

Eine vorgängige Durchführung von Iterationen der Sicherheitsanalyse hätte viel zum Verständnis des Standorts beigetragen und dessen Erläuterung ermöglicht, bevor der Standort anhand einer ersten, unvollständigen Untersuchung in der Öffentlichkeit verteidigt werden musste.

Die Darstellungen beider Studien waren sehr technisch ausgerichtet; Konsequenzen auf den Standort oder das Entsorgungskonzept wurden wenig erörtert.

Referenzen

- 1) Nirex 95: A preliminary assessment of the groundwater flow pathway for a deep repository at Sellafield. Nirex Science Report S/95/012, 1995.
- 2) Nirex 97: An assessment of the post-closure performance of a deep waste repository at Sellafield. Nirex Report S/97/012/ROM (CD Version), 1997.
- 3) Nirex Annual Report, 1996 - 1997. ISBN 1 84029 035.

Wellenberg	Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra, Schweiz) Juni 1994
-------------------	--

Zielsetzung und Randbedingungen

Beitrag zum Gesuch um die Erteilung der Rahmenbewilligung für ein Endlager für schwach- und mittelaktive Abfälle am Standort Wellenberg, Gemeinde Wolfenschiessen (Kanton Nidwalden, Schweiz); Dokumentation der Überlegungen und Berechnungen zur sicherheitstechnischen Eignung vom Wellenberg als Standort für ein Endlager SMA [1].

Abfälle

Schwach- und mittelaktive Abfälle aus dem Betrieb und der Stilllegung schweizerischer Kernkraftwerke, der Wiederaufarbeitung von Kernbrennstoffen sowie aus Medizin, Industrie und Forschung (ca. 100'000 m³).

Geologie

Valanginian-Mergel (Wechselagerung von grauen, siltigen bis feinsandigen biodetritusführenden Tonmergeln, Kalkmergeln und Kalkbänken) und tertiäre Schiefer, eingebettet zwischen den Kalken der Drusbergdecke (NNW) und der Axendecke (SSE). Die hydraulische Durchlässigkeit des Wirtgesteins nimmt mit zunehmender Tiefe ab; die Existenz einer Unterdruckzone im vorgesehenen Endlagerbereich gibt einen Hinweis auf günstige hydrogeologische Bedingungen (geringe Gesteinsdurchlässigkeit, tektonische Stabilität).

Standort

Wellenberg, Gemeinde Wolfenschiessen (Kanton Nidwalden, Schweiz).

Sicherheitskonzept

Das Endlager-Nahfeld (Kavernen mit verfestigten Abfällen, Endlagerkontainer, Verfüllmaterial und umgebende Geologie) bildet ein "Reservoir" mit grosser Radionuklid-Rückhaltekapazität. Der grösste Teil der Nuklide zerfällt im Nahfeld, die verbleibenden Nuklide werden nur in sehr kleinen Raten in die Geosphäre freigesetzt. Die Nuklidkonzentration wird weiter reduziert durch Zerfall (abhängig von der Transportzeit) und Dispersion während dem Transport durch die Geosphäre. Die resultierende Restkonzentration an Radionukliden in der Biosphäre ist infolge der Verdünnung so klein, dass das behördliche Schutzziel eingehalten wird.

Massgebende Szenarien bzgl. der Beurteilung der Langzeitsicherheit sind die

- Freisetzung der Radionuklide mit dem Tiefengrundwasser und die
- Freilegung des Endlagers durch Erosion

Erkenntnisse bezüglich der Wirksamkeit der technischen Barrieren und ihrer Abhängigkeit vom Standort

Die Wirksamkeit der technischen Barrieren wird primär durch die Sorptionseigenschaften der verwendeten Materialien bestimmt. Massgebend ist dabei die Menge an porösen (Zement-) Materialien im Nahfeld, welche für die Sorption der Radionuklide zur Verfügung steht (d. h. Zementmörtel in den Abfallgebinden, poröser Verfüllmörtel der Kavernen) und signifikante hydraulische Kurzschlüsse durch präferenzielle Fliesswege (Risse, Hohlräume) verhindert. Zur Gewährleistung einer guten Sorption wird eine günstige und stabile Nahfeldchemie angestrebt. Dies wird durch die grosse Zementmenge und durch kleine Wasserflüsse durch das Nahfeld sichergestellt.

Abbauprodukte von organischen Materialien (Zellulose) und andere Komplexbildner können die Sorption erniedrigen bzw. die Löslichkeit gewisser Radionuklide erhöhen. Daher sieht das Endlagerkonzept eine getrennte Einlagerung von Abfällen mit signifikantem Gehalt an potentiellen Komplexbildnern vor.

Der Wasserfluss durch das Nahfeld beeinflusst den Zeitpunkt und die Grösse der Freisetzung des radionuklidhaltigen Porenwassers in die Geosphäre. Für den Sicherheitsnachweis wird der Kavernenauskleidung keine hydraulische Barrierenwirkung zugeschrieben, so dass der Wasserfluss allein durch die lokale hydrogeologische Situation im Endlagerbereich bestimmt wird (hydraulische Durchlässigkeit des Wirtgesteins, hydraulische Eigenschaften des Endlagerbauwerks, lokale Gradienten).

Erkenntnisse bezüglich der Wirksamkeit der Geosphäre

Primäre Sicherheitsfunktion der Geosphäre ist die Sicherstellung kleiner Wasserflüsse durch (und um) das System der technischen Barrieren; damit wird eine effiziente Rückhaltewirkung des Nahfeldes sichergestellt (stabiles chemisches Milieu, kleine Freisetzungsraten).

Die Wirksamkeit der Geosphäre als Transportbarriere wird bestimmt durch den

- Wasserfluss in der Geosphäre (hydraulische Durchlässigkeit, hydraulischer Gradient)
- Kleinräumiger Aufbau der wasserführenden Systeme (Geometrie, Intensität der kleinräumigen Zerklüftung, Beschaffenheit des Nebengesteins/diffusionszugängliche Porosität)
- Sorption entlang dem Transportweg (Gesteinsmineralogie, Grundwasserchemie)
- Komplexbildner (natürliche bzw. aus den Abfällen, Beeinträchtigung der Sorption)
- Kolloidkonzentration

- Länge des Migrationspfades (Auslegungskriterium: 100 m bis zur nächstgelegenen höher durchlässigen Störungszone).

Schlüsselfragen hinsichtlich Standortauswahl

Die Langzeitsicherheit des Endlagers SMA wird bestimmt durch

- a) Radionuklid-Rückhaltung im Nahfeld, insbesondere
 - Sorption (stark abhängig vom chemischen Milieu des technischen Barrierensystems und der verfügbaren Menge an sorbierendem Material)
 - geringer Wasserfluss in der Geosphäre/Bereich der Endlagerkavernen)
- b) Geosphäre als
 - hydraulische Barriere für das Nahfeld
 - Transportbarriere
 - Schutz der Endlagerkavernen vor frühzeitiger erosiver Freilegung und unerwünschten menschlichen Tätigkeiten im untertägigen Endlagerbereich
- c) Verdünnungspotential der Biosphäre.

Fragestellungen in Hinblick auf die Standortcharakterisierung während der Standortauswahl

Die geologischen und hydrogeologischen Eigenschaften des Standorts sind bezüglich Langzeitsicherheit einerseits relevant für das Verhalten des Nahfeldes und andererseits von Bedeutung, weil sie die Wirkung der Geosphäre als Transportbarriere festlegen.

Bei geringem Wasserfluss im Wirtgestein und kleiner Transmissivität der wasserführenden Systeme – zusammen mit einer gut zugänglichen Gesteinsmatrix und guten Sorptionseigenschaften – ergeben sich für die Radionuklide lange Transportzeiten. Bei realistischer Interpretation der Geosphäreneigenschaften zeigen die durchgeführten Analysen, dass die meisten Radionuklide während ihrem Transport durch das im Minimum 100 m lange Segment von gering durchlässigem Wirtgestein praktisch vollständig zerfallen.

Für verschiedene Phänomene (Nuklidtransport durch Kolloide, Veränderung der Fließwege durch alkalische Porenwässer aus dem Endlager) kann nicht ausgeschlossen werden, dass die retardierende Wirkung der Geosphäre beeinträchtigt wird.

Eine genügend mächtige geologische Überdeckung schützt das Endlager vor Vorgängen und Ereignissen, welche zu einer erhöhten Freisetzung der Aktivität und damit zu einer unzulässigen Strahlenexposition der Bevölkerung führen könnten. Dazu gehören insbesondere eine erosionsbedingte Freilegung des Endlagers, welche am Standort Wellenberg im Zeitraum von 100'000 Jahren ausgeschlossen werden kann.

Weitere Gesichtspunkte

Die Gesamtdosis liegt für den Referenzfall rund zwei Grössenordnungen unter dem behördlichen Schutzziel von 0.1 mSv/a und wird durch den Beitrag von ^{14}C dominiert; untergeordnete Beiträge stammen von ^{93}Mo , ^{237}Np und verschiedenen Pu-Isotopen.

Die Aufteilung der SMA-Abfälle in (vier) verschiedene Abfallgruppen erlaubt eine sehr differenzierte Berücksichtigung der chemischen Eigenschaften der Abfälle; sie bewirkt eine optimale Rückhaltung der Radionuklide im Endlager-Nahfeld und im Wirtgestein, sofern ein chemischer Kontakt zwischen den Abfallgruppen vermieden wird.

Durch Auslaugung des Zements im Endlager-Nahfeld verändert sich die Grundwasserchemie in der Kavernenumgebung. Mineralumwandlungen entlang des Transportpfades verändern möglicherweise die Eigenschaften der wasserführenden Systeme (Sorption, Verstopfen bzw. Aufweiten, je nach Mineralogie).

Der Einfluss der Gasbildung (Metallkorrosion, mikrobieller Abbau organischer Substanzen) auf die Radionuklidfreisetzung wird durch die Kavernenauslegung minimiert, d. h. das "Wannenkonzept" stellt sicher, dass der Verbindungsstollen für das verdrängte Porenwasser kein präferenzzieller Transportpfad darstellt. Durch die Wahl eines porösen Verfüllmaterials kann ferner Endlagergas ohne grössere Überdrücke aus den Kavernen in die Geosphäre entweichen.

Anmerkungen aus der Review relevant für die Standortwahl

Die schweizerische Sicherheitsbehörde (HSK) hat das Rahmenbewilligungsgesuch für das Endlager SMA und die dazu verwendeten Grundlagen zur Geologie und Hydrogeologie des Standorts Wellenberg in ihrem Gutachten (Mai 1996) grundsätzlich positiv beurteilt [2]. Offene Fragen im Hinblick auf die späteren Bewilligungsschritte betreffen

- Beschaffenheit und Wasserführung der steilstehenden Störungen
- Einschluss von Fremdgesteinsschollen im Wirtgestein
- hydrogeologische Bedeutung der duktilen Überschiebungszonen
- Muster der auslegungsbestimmenden Störungen
- wasserführende Systeme (bzgl. Geometrie, Häufigkeit)
- Ausdehnung von gering durchlässigem Wirtgestein
- Tiefenzonierung der Grundwässer in der Nähe von Störungen
- Verständnis der beobachteten Unterdruckzone
- Problematik der Gasführung.

Referenzen

- 1) Endlager für schwach- und mittelaktive Abfälle (Endlager SMA) - Bericht zur Langzeitsicherheit des Endlagers SMA am Standort Wellenberg (Gemeinde Wolfenschiessen, NW); Nagra Technischer Bericht NTB 94-06, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Wettingen (Schweiz), Juni 1994.
- 2) Gutachten zum Gesuch um Rahmenbewilligung für ein SMA-Endlager am Wellenberg, Berichts-Nr. HSK 30/9 und KSA 30/11, Bundesamt für Energiewirtschaft, Hauptabteilung für die Sicherheit von Kernanlagen, Würenlingen (Schweiz), Mai 1996.

SALZFORMATIONEN

ERAM	Bundesamt für Strahlenschutz (BfS, Deutschland) 2001
-------------	---

Zielsetzung und Randbedingungen

Bewertung der Langzeitsicherheit unterschiedlicher Konzepte und Massnahmen für die Stilllegung des Endlagers mit dem Ziel der Festlegung konkreter Stilllegungsmassnahmen auf der Basis des Szenariums eines Zutritts von Wässern in die Salzformation. Weitere Szenarien werden erst nach Festlegung der Stilllegungsmassnahmen betrachtet [1, 2].

Abfälle

Zementierte und unkonditionierte Abfälle aus dem Betrieb von Reaktoren und Forschungszentren sowie der Produktion und Anwendung von Radioisotopen. Insgesamt sind 28 494 m³ feste und 8 258 m³ flüssige Abfälle sowie 6617 umschlossene Strahlenquellen eingelagert worden.

Geologie

Ehemaliges Steinsalz- und Kalibergwerk in einer Salzstruktur mit weiterhin vorhandenen Kalilagern. Teufenlage des Grubengebäudes zwischen 379 m und 634 m, wobei nur die 4. Sohle in einer Teufe von 506 m als Einlagerungshorizont genutzt wurde. Teufenlage des Salzspiegels in ca. 270 m. Abdeckung der Salzstruktur mit einem 20 bis 240 m mächtigen Hutgestein und 30 bis 250 m Sediment.

Standort

Morsleben in Sachsen-Anhalt; Standortdaten aus bergmännischen Aufzeichnungen der Salzstruktur aus langjährigem Grubenbetrieb sowie Ergebnisse aus geophysikalischen Untersuchungen und Erkundungsbohrungen.

Sicherheitskonzept

Vollständige Isolation der eingelagerten Abfälle in den Einlagerungshohlräumen, falls es nicht zu einem Zutritt von Wässern bis in die Einlagerungshohlräume kommt. Hydraulische Trennung der Grubenbereiche mit Möglichkeiten für einen Zutritt von Wässern von den Grubenbereichen mit den eingelagerten Abfällen. Für den Fall eines Zutritts von Wässern wird somit der Kontakt mit den eingelagerten Abfällen behindert. Verfüllung der Hohlräume zur Minimierung der Umlösungen an den Kalilagern bei einem gleichzeitig ausreichenden Erhalt der Hohlräume zur Vermeidung unzulässiger Gasdrücke.

Die Mobilisierung von Radionukliden wird durch Löslichkeitsbegrenzungen und Sorption in den Einlagerungshohlräumen behindert. Die Ausbreitung kontaminierter Lösungen wird innerhalb des Grubengebäudes durch die Abdichtungen sowie nach einer Freisetzung aus der Salzstruktur durch die begrenzte Wegsamkeit im Hutgestein behindert.

Schlussfolgerungen hinsichtlich der Wirksamkeit der technischen Barrieren

Die Dichtwirkung der Schachtverschlüsse und die Stützwirkung des eingebrachten Versatzes leisten einen bedeutsamen Beitrag zur Erreichung der ungestörten Entwicklung des Endlagers. Die weiteren technischen Barrieren sind dann ohne Bedeutung.

Bei einem Zutritt von Wässern in die Resthohlräume der Grube behindern die Abdichtungen den Zutritt in die Einlagerungshohlräume. Nach einem Zutritt von Lösungen an die Abfälle werden die kontaminierten Lösungen durch die Abdichtungen in ihrer Ausbreitung behindert. Die Barrierenwirkung der Behälter und Abfallmatrizen ist vernachlässigbar. Die Wirksamkeit der Abdichtungen wird durch die Gebirgskonvergenz zwar verstärkt, jedoch durch die aufgelockerten Gebirgsbereiche begrenzt.

Schlussfolgerungen hinsichtlich der Wirksamkeit der Geosphäre

Bei einer ungestörten Entwicklung des Endlagers, d.h. ohne dass sich im Laufe der Zeit Wasserwegsamkeiten ausbilden, hindert das geringdurchlässige Hutgestein und die undurchlässige Salzstruktur den Zutritt von Wasser in die Grube.

Nach einer Freisetzung kontaminierter Lösungen aus der Salzstruktur erfolgt der weitere Transport im Hutgestein über geringmächtige eingelagerte Schichten, die nur zu geringen Verzögerungszeiten führen. Eine Verdünnung erfolgt erst beim Eintritt der kontaminierten Lösungen in die Sedimentabdeckung, wobei höchstens von Verdünnungen bis zur Erreichung des Salzgehalts von Trinkwasser auszugehen ist.

Wichtige Aspekte bei der Standortauswahl

Die Kriterien zur Auswahl des Standortes sind nicht eindeutig dokumentiert. Grundsätzlich erfolgte sie im Hinblick auf ein bereits vorhandenes, ausreichend grosses Hohlraumvolumen und wegen der nicht beabsichtigten Weiternutzung der Grube zu Produktionszwecken.

Die Salzstruktur sollte einen ausreichend grossen homogenen Steinsalzbereich aufweisen, damit Kalilager innerhalb des Salzstocks durch einen ausreichend grossen Sicherheitspfeiler von den Einlagerungsbereichen getrennt bleiben können.

Die Salzstruktur sollte einen ausreichend grossen homogenen Steinsalzbereich aufweisen, damit Auflockerungsbereiche zwischen den Hohlräumen vermieden werden.

Gering durchlässige Abdeckungen über der Salzstruktur sind wünschenswert. Sie sind erforderlich, wenn Möglichkeiten für Wegsamkeiten innerhalb der Salzstruktur bestehen.

Wichtige Aspekte bei der Standortcharakterisierung

Die Wegsamkeit im Hutgestein ist hinsichtlich des durchströmten Porenraums und der Retardation ausreichend zu charakterisieren. Andere Wegsamkeiten sollten mit ausreichender Sicherheit ausgeschlossen werden können.

Referenzen

- 1) R. Storck, B. Boese, J. Brenner, H.-J. Herbert, T. Kühle: Endlager Morsleben - Untersuchungen zur Entwicklung von Stilllegungskonzepten: Porenspeicherkonzept und Abdichtungskonzept. Bericht im Auftrag des BfS. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS - A - 2779, Braunschweig 2000.
- 2) S. Oswald, G. Resele, J. Lützenkirchen, M. Niemeyer: Endlager Morsleben – Untersuchungen zur Entwicklung von Stilllegungskonzepten: Konzept der weitgehenden Vollerfüllung. Colenco-Bericht 4651/11 im Auftrag des BfS. Colenco Power Engineering AG, Baden (Schweiz), April 2000.

PROSA	ECN, RIVM und RGD (Holland) 1993
--------------	-------------------------------------

Zielsetzung und Randbedingungen

Generische Studie zur Machbarkeit eines Endlagers für hochaktive und andere Abfälle [1]. Aktualisierung der VEOS-Studie [2] aus dem Jahr 1989 im Hinblick auf eine systematische Szenarienanalyse sowie eine probabilistische Analyse.

Abfälle

Alle Arten von wärme- und nicht wärmeproduzierenden Abfällen aus der Wiederaufarbeitung abgebrannter LWR-Brennelemente, Betriebsabfälle aus Reaktoren sowie Abfälle aus Krankenhäusern und Labors. Abfallmatrizen Glas und Zement. Direkte Endlagerung von Brennelementen wird nicht betrachtet.

Geologie

Es werden zwei hypothetische Standorte betrachtet: ein oberflächennaher Salzstock mit einem Salzspiegel in 230 m Teufe und ein tiefer Salzstock mit einem Salzspiegel in 800 m Teufe. Der Salzstock wird in beiden Fällen von Sedimentschichten aus Tonen und Sanden überlagert. Die Sedimentschichten sind von einer Kluffzone aufgrund einer Verwerfung durchzogen. Die Reihenfolge der Sedimentschichten ist in beiden Varianten gleich, die Mächtigkeiten sind jedoch unterschiedlich.

Standort

Es handelt sich um eine generische Studie, in der hydrogeologische Daten von niederländischen Regionen verwendet werden.

Sicherheitskonzept

Vollständige Isolation der eingelagerten Abfälle im Laufe der Zeit bei einer ungestörten Entwicklung des Endlagers aufgrund der Konvergenz des Salzgebirges. Bei einer gestörten Entwicklung aufgrund eines Zutritts von Lösungen wird deren Kontakt mit den Abfällen durch die Strömungswiderstände der Abdichtungen behindert. Die Mobilisierung von Radionukliden wird durch Behälter und Abfallmatrizen sowie durch Löslichkeitsbegrenzungen verzögert oder behindert. Die Ausbreitung kontaminierter Lösungen wird innerhalb des Grubengebäudes durch eingebrachten Versatz und durch Abdichtungen behindert. Nach einer Freisetzung aus dem Salzstock wird die Ausbreitung im Deckgebirge durch den geringen advektiven Transport durch die Tonschichten und durch Sorption behindert.

Schlussfolgerungen hinsichtlich der Wirksamkeit der technischen Barrieren

Der Versatz hat wegen seiner Kompaktion durch die Gebirgskonvergenz einen wesentlichen Einfluss auf die Isolation der eingelagerten Abfälle. Wegen der Druck- und Temperaturabhängigkeit der Konvergenz ist die Isolation mit zunehmender Tiefe des Endlagers grösser. Der Versatz reduziert ausserdem die Lösungsvolumina und erhöht dadurch die Rückhaltewirkung bei Löslichkeitsbeschränkungen.

Bei einem Zutritt von Lösungen in die Resthohlräume des Endlagers behindern die eingebrachten Versatzstoffe und Abdichtungen die Bewegungen der Lösungen. Die Dichtwirkungen dieser Materialien werden durch die Gebirgskonvergenz unterstützt.

Behälter und Abfallmatrizen haben bis auf die Glasmatrix einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Freisetzung aus dem Grubengebäude.

Schlussfolgerungen hinsichtlich der Wirksamkeit der Geosphäre

Die Barrierenwirkung des Salzstocks ist von zentraler Bedeutung hinsichtlich der ungestörten Entwicklung des Endlagers. Bei gestörter Entwicklung führen die Szenarien mit Lösungszutritten zu geringeren Strahlenexpositionen als diejenigen mit menschlichen Einwirkungen.

Durch die abdeckenden Sedimentschichten wird der Transport zur Biosphäre wirksam verzögert, so dass zusammen mit der Verdünnung der Schadstoffkonzentration das Schutzziel eingehalten wird. Die Verzögerung wird durch die geringe Geschwindigkeit durch die Tonschichten sowie durch die Kluffzonen in den Tonschichten erreicht. Beim tiefen Endlager ist diese Geschwindigkeit etwa einen Faktor 50 kleiner als beim oberflächennahen Endlager. Ein wichtiger Parameter ist der Klufffaktor, der das Verhältnis der Permeabilität in der Kluft zum umgebenden Gestein angibt. Sorption im Deckgebirge hat keinen wesentlichen Einfluss.

Die Mächtigkeit der Deckgebirgsschichten ist bei tiefem und bei oberflächennahem Endlager ausreichend gross, so dass die Konsequenzen bei einem Szenario mit Subrosion erst zu sehr späten Zeiten auftreten und damit die Schutzziele eingehalten werden.

Wichtige Aspekte bei der Standortauswahl

Es wurde noch kein Standort ausgewählt.

Eine abdeckende Tonformation über dem Salzstock wirkt sich günstig auf die Rückhaltung kontaminierter Lösungen aus. Dabei ist ein geringer Klufffaktor günstig, d. h. die Tonschicht sollte möglichst homogen sein. Die Teufe des Endlagers ist bei dieser Betrachtung nicht von Bedeutung.

Tiefe Salzstöcke sind wegen der schnelleren Konvergenzprozesse vorteilhafter als oberflächennahe. Sie sind auch bei Szenarien mit Subrosion vorteilhafter, da die Zeitspanne bis zur Freisetzung der Schadstoffe

grösser ist.

Standorte mit langsamen Subrosionsvorgängen sind vorteilhaft, insbesondere bei Endlagern in oberflächennahen Salzstöcken.

Wichtige Aspekte bei der Standortcharakterisierung

Der Aufbau des Deckgebirges aus durchlässigen Sanden und gering durchlässigen Tonformationen ist hinsichtlich des Transports vom Salzspiegel bis zur Biosphäre wichtig und sollte ausreichend bekannt sein. Die Permeabilitäten der Deckgebirgsschichten und der Kluffzone müssen dabei hinreichend genau bestimmt werden.

Daten zur Gebirgskonvergenz und zur Subrosion müssen hinreichend genau bestimmt werden.

Referenzen

- 1) J. Prji (editor), B.M. Block, G.M.H Lahij et al.: PROSA – Probabilistic Safety Assessment, Final report. OPLA-1A, Netherlands Research Foundation, Petten, 1993.
- 2) J. Prji et al.: VeiligheidsEvaluatie von Opbergconcepten in Steenzout, VEOS. Samenvatting en evaluatie. ECN/RIVM. Januari 1989.

SAM	Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit GmbH (GSF, Deutschland) 1991
------------	---

Zielsetzung und Randbedingungen

Aktualisierung der PSE-Studie aus 1984 im Hinblick auf die direkte Endlagerung von abgebrannten Brennelementen im Rahmen eines Forschungsprojekts zur Darstellung der sicherheitstechnischen Machbarkeit der direkten Endlagerung in Salzformationen. Für die Bewertung der Langzeitsicherheit wurde nur das Szenarium eines Lösungszutritts betrachtet. Menschliche Einwirkungen und andere Szenarien wurden nicht betrachtet.

Abfälle

Abgebrannter Brennstoff aus Leichtwasser- und Hochtemperaturreaktoren sowie verglaste hochaktiver Abfall und wärmeproduzierende Abfälle aus der Wiederaufarbeitung von LWR-Brennelementen. Variation des Anteils von Abfällen aus der Wiederaufarbeitung und der Brennelemente zur direkten Endlagerung.

Geologie

Salzstock mit einem Einlagerungshorizont in etwa 800 m Tiefe und mit sedimentärer Abdeckung von etwa 300 m Mächtigkeit.

Standort

Vorläufige Ergebnisse aus den geophysikalischen Untersuchungen und den Erkundungsbohrungen am Standort Gorleben auf dem Gebiet des Landes Niedersachsen.

Sicherheitskonzept

Vollständige Isolation der eingelagerten Abfälle im Laufe der Zeit bei einer ungestörten Entwicklung des Endlagers aufgrund der Konvergenz des Salzgebirges. Die ungestörte Entwicklung wird durch die Art der Auffahrung der Grube und eine entsprechende Auslegung des Endlagers mit hoher Wahrscheinlichkeit erreicht.

Bei gestörten Entwicklungen aufgrund eines Zutritts von Lösungen wird deren Kontakt mit den Abfällen durch die Strömungswiderstände der geotechnischen Barrieren und des Versatzes in der Grube behindert. Die Mobilisierung von Radionukliden wird durch Behälter und Abfallmatrizen sowie durch Löslichkeitsbegrenzungen verzögert oder behindert. Die Ausbreitung kontaminierter Lösungen wird innerhalb des Grubengebäudes durch die eingebrachten Abdichtelemente und Versatzstoffe sowie im

Deckgebirge durch die geringe Grundwasserbewegung und die Sorption behindert.

Schlussfolgerungen hinsichtlich der Wirksamkeit der technischen Barrieren

Die Verschlüsse der Schächte und die eingebrachten Versatzmaterialien leisten einen bedeutsamen Beitrag zur Erreichung der ungestörten Entwicklung des Endlagers. Die weiteren technischen Barrieren sind dann ohne Bedeutung.

Bei einem Zutritt von Lösungen in die Resthohlräume des Endlagers behindern die eingebrachten Abdichtelemente und Versatzstoffe die Bewegungen der Lösungen. Die Dichtwirkungen dieser Materialien werden durch die Konvergenz des Gebirges unterstützt. Die Konvergenz wird durch die erhöhten Temperaturen beschleunigt.

Die Rückhaltewirkung des Nahbereichs wird durch die geringen Lösungsvolumina und die Löslichkeitsbeschränkungen bewirkt. Die Lebensdauern der Behälter und die Mobilisierungsraten sind von geringerer Bedeutung.

Schlussfolgerungen hinsichtlich der Wirksamkeit der Geosphäre

Die Barrierenwirkung des Salzstocks ist von zentraler Bedeutung hinsichtlich der ungestörten Entwicklung des Endlagers.

Nach einer Freisetzung kontaminierter Lösungen aus dem Salzstock verursacht die Barrierenwirkung des Deckgebirges eine Verzögerung des Transports zur Biosphäre und eine Verdünnung der Schadstoffkonzentrationen. Auf der Basis von Süswasserberechnungen liegt die Verzögerungszeit bei wenigen tausend Jahren und die Verdünnungswirkung bei etwa vier Grössenordnungen.

Transurane und wenig mobile Spaltprodukte tragen nur wenig zu einer möglichen Strahlenexposition bei, weil sie im Deckgebirge stark sorbiert werden. Die Behinderung der Grundwasserbewegung durch die Versalzung des tiefen Grundwassers wurde noch nicht berücksichtigt.

Wichtige Aspekte bei der Standortauswahl

Die Kriterien zur Auswahl des Standortes sind nicht eindeutig dokumentiert. Grundsätzlich erfolgte sie im Hinblick auf die Grösse des Salzstocks und seiner vermuteten einfachen Innenstruktur.

Die Salzstruktur sollte einen ausreichend grossen homogen Steinsalzbereich aufweisen, damit durchlässige oder bei Verformungen möglicherweise durchlässig werdende Schichten innerhalb des Salzstocks durch einen ausreichend grossen Sicherheitspfeiler von den Einlagerungsbereichen getrennt bleiben können.

Aufbau und Struktur des Deckgebirges sowie die Durchlässigkeiten seiner Einheiten sollen zu langen Transportzeiten und hohen Verdünnungseffekten beitragen.

Wichtige Aspekte bei der Standortcharakterisierung

Der Aufbau des Deckgebirges aus durchlässigen Sanden und tonigen Zwischenlagen ist hinsichtlich der Barrierenwirkung des Deckgebirges wichtig und sollte ausreichend bekannt sein.

Die Grundwasserbewegung ist seit der letzten Eiszeit noch nicht in einem stationären Zustand. Zur Erkennung des Zustandes ist die Grundwasserzusammensetzung ausreichend genau zu untersuchen.

Referenzen

Buhmann, D.; Nies, A.; Storck, R.: Analyse der Langzeitsicherheit von Endlagerkonzepten für wärmeerzeugende radioaktive Abfälle. GSF-Bericht 27/91. GSF - Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit GmbH, Braunschweig 1991.

WIPP CCA	US Department of Energy (DOE, USA) 1996
-----------------	--

Zielsetzung und Randbedingungen

Die Sicherheitsanalyse von 1996 [1] wurde im Rahmen eines Antrags auf Zertifizierung (Compliance Certification Application – CCA) für den Beginn der Annahme von TRU-Abfällen in der WIPP (Waste Isolation Pilot Plant) eingereicht. Die Analyse war erforderlich, um die Einhaltung einer generellen Regel (general rule, 40 CFR Part 191) der amerikanischen Umweltschutzbehörde (Environmental Protection Agency EPA) und eines spezifischen Kriteriums für die WIPP, welches in der Regel 40 CFR Part 194 aufgeführt ist, zu belegen. Die Analyse stellte das Ergebnis von über 20 Jahren Arbeit aus Wissenschaft und Ingenieurwesen dar, die der Standortcharakterisierung und der sicheren Endlagerung von TRU-Abfällen in der WIPP gewidmet war.

Abfälle

Ungefähr 175'000 m³ generell schwachaktive Abfälle aus dem militärischen Bereich, bezeichnet als TRU-Abfälle, d.h. solche, die Transurane enthalten. TRU-Abfälle sind laut Definition Abfälle, die mehr als 100 nCi/g Alpha-Isotope mit einer Halbwertszeit >20 Jahre enthalten. TRU-Abfälle werden in direkt-handhabbare (contact-handled – CH) und fernhandhabbare (remote-handled – RH) Abfälle unterteilt. Der Übergang von TRU-CH zu TRU-RH liegt bei einer Kontaktstrahlenexposition von 200 mrem/h.

Die Land-Enteignungsverfügung für die WIPP (WIPP Land Withdrawal Act) gibt für die Abfallmenge eine standortspezifische Grenze von 175'000 m³ und für die RH-TRU Abfälle eine maximale Gesamtaktivität von 5.1 MCi vor.

Geologie

Die WIPP befindet sich im Delaware Basin, einem grossen Becken im südöstlichen New Mexico und Texas mit überwiegend permischen Kalken und Evaporiten, primär Riffkalke, Dolomit, Gips und Halit, überlagert von Ton-, Schluff- und Sandsteinen. Das Wirtgestein, die Salado Formation, besteht hauptsächlich aus Steinsalz (Halit)-Schichten mit einer Mächtigkeit von 200 bis 400 m und mit Einschaltungen (0.1 bis 1 m mächtig) aus Ton, Anhydrit und Kaliummineralien. In der Castille Formation im Liegenden wurden Lösungseinschlüsse mit Überdrücken angetroffen. In der Rustler Formation im Hangenden befinden sich einige Dolomitschichten mit erhöhter Permeabilität, wovon vor allem der Culebra Aquifer nennenswert ist.

Standort

Der WIPP Standort liegt 42 km östlich von Carlsbad im südöstlichen New Mexico, in einer überwiegend ariden Halbwüste. Das Endlager befindet sich in einer Tiefe von 655 m in einer mächtigen, geschichteten Steinsalzablagerung.

Der Standort wird bereits seit 1974 untersucht, eingeschlossen der Bau einer untertägigen Versuchseinrichtung. Die ersten Abfälle wurden in der WIPP im März 1999 angenommen.

Sicherheitskonzept

Die primäre Barriere bildet eine mächtige, räumlich ausgedehnte und relativ homogen geschichtete Steinsalzeinheit der Salado Formation, die seit ihrer Ablagerung vor ca. 240 Millionen Jahren erkennbar ungestört blieb.

Die Formation, die am WIPP Standort nahezu horizontal vorgefunden wird, enthält dicke identifizierbare Zwischenlagerungen, sogenannte Markierungsschichten, die nicht aus Halit bestehen. Das Endlager wird anhand einer dieser Markierungsschichten genau in einer konstanten stratigraphischen Fläche plaziert werden. Dies gewährleistet für das Steinsalz, in dem sich das Endlager befindet, sehr einheitliche Eigenschaften.

Das Endlager wird aus acht "Abfallfeldern" bestehen, wobei jedes aus sieben "Kammern" besteht, die jeweils 91 m lang, 10 m breit und 4 m hoch sind und 100 m von der nächsten Kammer entfernt liegen.

RH-TRU Abfälle können in horizontale Bohrlöcher in den Stößen der Kammern eingelagert werden. CH-TRU Abfälle werden direkt in der Kammer und, nach dem Füllen der Kammern, möglicherweise auch in den Hauptzugangsstrecken eingelagert.

Die Kammern, Felder und Zugangsstrecken, sowie die beiden Vertikalschächte, werden mit gering permeablen Abdichtbauwerken aus Beton, Salzgrus und Ton versiegelt. Die Zugangsstrecken werden mit Salzgrus verfüllt.

Kriechprozesse im Salzgestein werden die Hohlräume in den Feldern und in den Zugangsstrecken schliessen und dabei die Abfälle in der Formation isolieren.

Für die Abfallkammern ist ein Magnesiumoxyd-Versatz vorgesehen, um die chemische Zusammensetzung von Lösungen zu puffern, die während der Zeit eindringen, in der sich Hohlräume aufgrund der Kriechprozesse schliessen. Es wird erwartet, dass dies die Actinidenlöslichkeit in den Abfällen reduziert.

Unter ungestörten Bedingungen wird keine Radionuklidfreisetzung erwartet, ausser – möglicherweise – durch Ausstoss von Lösungen in die horizontalen Markierungsschichten. Einige gelöste Abfallbestandteile

könnten so aus dem überwachten Bereich entweichen, der als Umkreis von 5 km um das Endlager definiert ist. Für diese gelösten Abfallbestandteile gibt es jedoch keinen weiterführenden Weg zur Oberfläche.

Im Zertifizierungsantrag (CCA) liegt das Hauptinteresse auf der Möglichkeit von Bohraktivitäten durch das Endlager (z.B. für Erdöl, welches im Becken vorkommt). Um eine Radionuklidfreisetzung herbeizuführen, müssen ein bis zwei Bohrlöcher zudem einen Lösungseinschluss mit Überdruck antreffen, deren Vorkommen in der Castille Formation im Liegenden bekannt ist. Ferner könnte der Abbau von Anhydrit die Eigenschaften der Formationen über dem Endlager beeinträchtigen.

Erkenntnisse bezüglich der Wirksamkeit der technischen Barrieren und ihrer Abhängigkeit vom Standort

Den Abfallgebinden wird keine Barrierewirkung zugewiesen, sie werden durch Lösungen korrodiert und durch das Aufkriechen des Steinsalzes zerdrückt.

Dennoch werden unter ungestörten Bedingungen die Abfälle aufgrund der sehr geringen, praktisch verschwindenden Permeabilität des umgebenden Steinsalzes wirksam und vollständig im ursprünglichen Endlagerbereich zurückgehalten.

Die rheologischen Eigenschaften des Steinsalzes sind wichtig für die Bestimmung der Kriechrate, die zur Schliessung von Hohlräumen führt.

Erkenntnisse bezüglich der Wirksamkeit der Geosphäre

Unter ungestörten Bedingungen bewirkt die Salado Formation für den gesetzlich vorgeschriebenen Zeitraum von 10'000 Jahren eine 100% Rückhaltung, wahrscheinlich sogar für viele Millionen von Jahren. Gewisse horizontale Austritte werden stattfinden. Dies hängt von den ausgezeichneten Eigenschaften des Salzgesteines ab, wie sie in zahlreichen Tiefbohrungen und in untertägigen Vortrieben nachgewiesen wurden.

Eine Durchbohrung des Endlagers könnte einen Kurzschluss der Salado Formation zur Folge haben. Kontaminiertes Bohrklein, Splitter und Bohrspülung könnten so während der Bohrarbeiten an der Oberfläche abgelagert werden. Sollte zudem ein unter Überdruck stehender Lösungseinschluss angebohrt werden, könnte dies die Bohrlöcher offen halten und entsprechend zur längerfristigen Freisetzung von kontaminierter Lösung in die höher liegenden, höher permeablen Schichten, vor allem den Culebra Aquifer, führen.

Schlüsselparameter sind die Wahrscheinlichkeit für Lösungs-Vorkommen unterhalb des Endlagers sowie deren Eigenschaften, die Parameter zum Schadstofftransport in die Lösungen, die Eigenschaften des

Culebra Aquifers und deren räumliche Variabilität sowie die Häufigkeit von Bohrungen. Der letztgenannte Parameter, die Häufigkeit von Bohrungen, wurde anhand von Beobachtungen der vergangenen 100 Jahre im Delaware Basin auf Stufe Verordnung ("Regulation") festgelegt.

Schlüsselfragen hinsichtlich der Standortauswahl

Die Schlüsseleigenschaft aus der Sicht der Standortwahl ist das sehr ausgedehnte und relativ homogen geschichtete Salzgestein der Salado Formation, das über ungefähr 240 Millionen Jahre hinweg ungestört blieb.

Das Steinsalz verfügt über ausgezeichnete rheologische Eigenschaften, die den Bau von freitragenden Kammern erlauben, die lediglich einen minimalen Einsatz von Felsankern erfordern, um ihre Stabilität über mehrere 10 Jahre zu bewahren.

Der WIPP Standort wurde 1974 zu einer Zeit ausgewählt, in der die Erdöl/Salzlösung-Vorkommen unterhalb der Formationen im Delaware Basin als nicht bedeutend erachtet wurden. Technische Fortschritte in der Erdölgewinnung haben jedoch die Förderung dieser Vorkommen bewirkt und die Häufigkeit von Bohrungen im Delaware Basin in den vergangenen 20 Jahren stark erhöht.

Weitere Gesichtspunkte

Als die WIPP Anlage im März 1999 mit der Annahme von Abfällen begann, wurde sie zum ersten, speziell für diesen Zweck erbauten geologischen Endlager.

Neben den natürlichen und technischen Vorzügen des Standortes könnte der Erfolg hinsichtlich der Erlangung der Betriebsgenehmigung im Folgenden begründet liegen:

- die langjährigen Untersuchungen am Standort (mehr als 20 Jahre)
- die Wahl eines Standorts in einem Bergbaugebiet, wo die ursprünglichen untertägigen Forschungseinrichtungen und die damit verbundenen Erwerbsmöglichkeiten auf Sympathie trafen
- der langjährige Einbezug der örtlichen Bevölkerung durch Vermittlung von sehr ausführlicher Information sowie durch Einladung zur Beobachtung und Kommentierung der laufenden Arbeiten
- das Konzept eines "vorschreibenden" Regelwerkes, das der Genehmigungsbehörde die Verpflichtung auferlegt, die Anforderungen an die Endlager-Wirksamkeit zu spezifizieren und dem DOE eindeutige Anweisung zu geben, wie diese Anforderungen zu erfüllen sind
- die generell positive Einstellung des Staates von New Mexico.

Anmerkungen aus der Review relevant für die Standortwahl

Die WIPP Sicherheitsanalyse von 1996 wurde von einem gemeinsamen IAEA/NEA Peer Review Team [2] überprüft.

Das Review Team kam zum folgenden Schluss: "Der stetige Fokus des WIPP auf den ausgewählten Standort über einen Zeitraum von mehr als 20 Jahre erlaubte eine äusserst eingehende Untersuchung der lokalen und angrenzenden Geologie und Hydrogeologie" und "Die geologischen, hydrogeologischen und tektonischen Gegebenheiten liefern starke und mehrschichtige Beweise für die naturgegebene langfristige Stabilität und die Einschlussfähigkeit der Salado Formation." (Im Original: "The stable focus of the WIPP on the selected site over a period of more than 20 years has allowed a very thorough investigation of the local and adjacent geology and hydrogeology" und "the geological, hydrogeological and tectonic settings provide strong and multiple evidences of the natural long-term stability and isolation capacity of the Salado Formation.")

Referenzen

- 1) Title 40 CFR Part 191 Compliance Certification Application for the Waste Isolation Pilot Plant. DOE/CAO-1996-2184, October 1996, USDOE, Carlsbad Area Office, Carlsbad, New Mexico.
- 2) International Peer Review of the 1996 Performance Assessment of the US Waste isolation Pilot Plant (WIPP). Report of the NEA/IAEA International Review Group, April 1997.

VERSCHIEDENE WIRTGESTEINE

H12	Japanese Nuclear Cycle Research Institute (JNC, Japan) 2000
------------	--

Zielsetzung und Randbedingungen

Zweiter Zwischenbericht zu F&E als Beitrag zur HAA-Endlagerung in Japan. Aufzeigen der Machbarkeit für die sichere Endlagerung in Japan. Vorgesehen als technische Grundlage für die neue Antragsteller-Organisation (Numo, im Oktober 2000 gegründet).

Abfälle

Verglaste HAA aus der Wiederaufarbeitung von Brennstoffen aus Siedewasser- und Druckwasserreaktoren.

Geologie

Noch nicht festgelegt – die Daten für sedimentäre und kristalline Gesteine sowie die Verhältnisse einer Tiefebene wurden für den Referenzfall verwendet.

Standort

Generische Datengrundlage basierend auf Felslaborstandorten, verwendet für die Beurteilung von Schutzwirkung des Konzeptes und Machbarkeit.

Sicherheitskonzept

Vollkommener Einschluss im Abfallgebinde für 1000 Jahre, gefolgt von langsamer Lösung des Glases, Freisetzung von Radionukliden durch die Bentonitbarriere infolge Diffusion und langsamem Transport durch die Geosphäre. Die Schlüsselfunktion der Bentonitbarriere besteht im mechanischen Schutz der Kanister gegen geringfügige Gesteinsverschiebungen in den ersten 1000 Jahren. Der Schwerpunkt liegt auf der Wirksamkeit der technischen Barrieren und die Hauptrolle des Wirtgesteins ist die Bereitstellung eines stabilen, physikalisch wie auch geochemisch günstigen Milieus.

Erkenntnisse bezüglich der Wirksamkeit der technischen Barrieren und ihrer

Abhängigkeit vom Standort

Die gute Wirksamkeit des Nahfelds hängt von den geringen Löslichkeiten mehrerer dosisrelevanter Radionuklide ab, deren Freisetzung vom langsamen diffusiven Transport durch die Bentonitbarriere abhängig ist. Aufgrund des geringen Salzgehaltes im Grundwasser und der vorherrschenden

reduzierenden Bedingungen - verursacht durch Korrosionsprozesse von Stahlummantelungen - stellen sich im Bentonit günstige chemische Bedingungen hinsichtlich Löslichkeit und Sorption ein. Die Funktion des Bentonits als Filter für eventuell auftretende Kolloide ist ebenfalls ein wichtiger Faktor.

Niedrige Grundwasserflüsse im Bereich der technischen Barriere minimieren das Risiko der Bentoniterosion und der Einbusse an Quelldruck und unterstützt einen langsamen Transport durch Diffusion.

Die Lebensdauer der Kanister und die Glaskorrosionsrate sind für die Wirksamkeit der technischen Barrieren zweitrangig.

Erkenntnisse bezüglich der Wirksamkeit der Geosphäre

Da noch kein spezifischer potentieller Endlagerstandort festgelegt wurde, beruht die Sicherheitsanalyse auf generischen Kenngrößen aus den Tono- und Kamaishi-Felslabors, obwohl keiner der beiden Standorte die Kriterien eines geeigneten Endlagerstandorts erfüllt. Folglich wird die Wirksamkeit der Geosphäre gegenüber der eines gut charakterisierten, spezifischen Standortes als konservativ gering gewertet.

Die Ausdehnung der für die Radionuklide infolge Diffusion erreichbaren Wirtgesteinsmatrix übt einen starken Einfluss auf die Wirksamkeit der Geosphäre aus. In der H12 Studie tragen der relativ grosse benetzte Fließquerschnitt (50%) und die Matrixdiffusionstiefe (5 cm) zur guten Wirksamkeit der Geosphäre bei.

Die sehr hohe Verdünnung an der Grenzfläche Geosphäre-Biosphäre (ein Fluss, der als Trinkwasserquelle genutzt wird) stellt einen wesentlichen Faktor dar.

Schlüsselfragen hinsichtlich der Standortauswahl

Der Nachweis, dass am Standort keine Auswirkungen von Vulkanismus, tektonischen Aktivitäten (Bildung grosser Störzonen) und bedeutenden Hebungsraten auftreten werden, wird von zentraler Wichtigkeit sein.

Für Gesteinsformationen mit weniger geeigneten mechanischen Eigenschaften – dies sind Gesteine, in denen Tunnelstützeinrichtungen notwendig sind – wurden ingenieurtechnische Untersuchungen durchgeführt. Somit konnte die Auswahl an potentielltem Wirtgestein erweitert werden. Durch einen eigens entwickelten Zement mit geringem pH, sollen Probleme durch chemische Störungen minimiert werden.

Potentiell günstige Verdünnung in grossen Flüssen.

Die Wahrscheinlichkeit eines versehentlichen, menschlichen Eindringens wird durch die Standortwahl reduziert, indem wirtschaftlich interessante Rohstofflager vermieden werden. Geothermische Anlagen können jedoch nicht ausgeschlossen werden.

Fragestellungen in Hinblick auf die Standortcharakterisierung während der Standortauswahl

Standortspezifische Daten sollten eine realistischere Bewertung der Wirksamkeit der natürlichen Barriere erlauben.

Weitere Gesichtspunkte

Das in der Untersuchung berücksichtigte Inventar ist gross: 40'000 Abfallgebinde. Für die Berechnungen der Strahlenexposition wurde das gleichzeitige Versagen aller Kanister vorausgesetzt.

Referenzen

H12: Project to Establish the Scientific and Technical Basis for HLW Disposal in Japan. Japan Nuclear Cycle Development Institute JNC TN1410 2000-001 (Project Overview Report).

1st TRU Report	TRU Coordination Office (Japan Nuclear Cycle Development Institute und The Federation of Electric Power Companies, Japan) 2000
----------------------------------	---

Zielsetzung und Randbedingungen

Zwischenbericht F&E zur Endlagerung von langlebigen mittelaktiven Abfällen (einschl. TRU-Abfälle) in Japan; Machbarkeitsstudie für eine sichere Endlagerung in Japan; dient als technische Grundlage für die neue Antragsteller-Organisation, welche im Oktober 2000 gegründet wurde.

Abfälle

Langlebige mittelaktive Abfälle einschl. TRU-Abfälle, > 1GBq α /Tonne

Geologie

Noch nicht festgelegt – die Daten für kristalline und sedimentäre Wirtgesteine sowie die Verhältnisse einer Tiefebene wurden der Studie H12 als Referenzfall entnommen.

Standort

Generische Datengrundlage basierend auf Felslaborstandorten, verwendet für die Beurteilung von Schutzwirkung des Konzeptes und Machbarkeit.

Sicherheitskonzept

Einschluss in fester Abfallmatrix (Zement, Bitumen für einen begrenzten Zeitraum. Hoher pH-Wert, erwartete hohe Sorption und geringe Löslichkeit für die meisten Radionuklide aufgrund des zementbestimmten Milieus. Die tragenden zementhaltigen Bauteile (z.B. Kammernauskleidung) erfüllen keine Barrierenfunktion. Abfälle mit hohen Konzentrationen an gering sorbierenden, hoch löslichen Radionukliden (z.B. Jod) werden in Kavernen / Silos mit einer Diffusionsbarriere aus Bentonit eingelagert. Nach der Radionuklidfreisetzung durch die Bentonitbarriere infolge Diffusion oder aus den anderen Kammern/Silos infolge Diffusion / Advektion wird von einem langsamen Transport durch die Geosphäre unter dem Einfluss von hyperalkalinem Porenwasser ausgegangen, das aus der Wechselwirkung von Zement und Grundwasser entsteht.

Erkenntnisse bezüglich der Wirksamkeit der technischen Barrieren und ihrer**Abhängigkeit vom Standort**

Die Wirksamkeit des Nahfelds hängt vor allem vom Verhalten der Radionuklide ^{129}I und ^{14}C ab, die die berechnete Strahlenexposition dominieren. ^{14}C wird durch die kongruente Auflösung von Brennelement-Strukturteilen freigesetzt, d.h. die Freisetzungsrates kann durch die chemische Zusammensetzung des Grundwassers beeinflusst werden. Dieser Effekt ist wegen der überwiegenden Einflüsse des zementhaltigen Materials jedoch eher gering.

Für Abfälle mit ^{129}I und ^{14}C spielt die Bentonitbarriere der Kaverne / Silo eine wichtige Rolle, weil sie den Radionuklidtransport durch die übrigen, vergleichsweise sehr durchlässigen Nahfeldkomponenten auf eine reine Diffusion beschränkt. Auch die Funktion des Bentonits als Filter für eventuell auftretende Kolloide ist ein wichtiger Faktor.

Geringe Grundwasserflüsse im Bereich der technischen Barriere minimieren das Risiko der Bentoniterosion und unterstützen einen langsamen Transport durch Diffusion.

Die Ausdehnung der Auflockerungszone kann die Freisetzungsrates der Radionuklide aus den technischen Barrieren beeinflussen, da die Zone im Freisetzungsmodell für das Nahfeld als Verdünnungsvolumen (mixing tank) betrachtet wird. Für mobile Radionuklide wie ^{129}I und ^{14}C ist die Auflockerungszone allerdings zweitrangig.

Erkenntnisse bezüglich der Wirksamkeit der Geosphäre

Der Schwerpunkt der Sicherheitsanalyse lag auf der Wirksamkeit des Endlagerkonzepts, d.h. die Wirksamkeit des generischen Wirtgesteins wurde weniger eingehend untersucht.

Da noch kein spezifischer potentieller Endlagerstandort festgelegt wurde, beruht die Sicherheitsanalyse auf generischen Kenngrößen aus den Tono- und Kamaishi-Felslabors, obwohl keiner der beiden Standorte die Kriterien eines geeigneten Endlagerstandorts erfüllt. Folglich wird die Wirksamkeit der Geosphäre gegenüber der eines gut charakterisierten, spezifischen Standortes als konservativ gering gewertet.

Die berechnete Strahlenexposition war für Sedimentgesteine tendenziell niedriger als für Kristallingesteine. Dies war eine Folge der unterschiedlichen Transportmodelle und der höheren Wasserfließgeschwindigkeiten in den Klüften des Kristallingesteins im Vergleich zu jener im porösen Medium, das für das Sedimentmodell angenommen wurde.

Die Länge des Migrationspfades war ein signifikanter Faktor für die Strahlenexposition, da längere Migrationszeiten die Freisetzung von ^{14}C erheblich verringerten.

Die Dosisraten von ^{129}I und ^{14}C reagierten sehr empfindlich auf die Werte, die für die Geosphärensorption verwendet wurden. Für den Referenzfall waren die Sorptionswerte so gering, dass jede Erhöhung zu bedeutenden Änderungen führte. So ergab auch die Annahme der Bildung von C-S-H Gel (mit hohen Zementsorptionswerten) als Folge der hyperalkalinen Porenwasserfahne im Wirtgestein eine erhebliche Verringerung der berechneten Strahlenexposition.

Die sehr hohe Verdünnung an der Grenzfläche Geosphäre-Biosphäre (ein Fluss, der als Trinkwasserquelle genutzt wird) stellt einen wesentlichen Faktor dar.

Schlüsselfragen hinsichtlich der Standortauswahl

Der Nachweis, dass am Standort keine Auswirkungen von Vulkanismus, tektonischen Aktivitäten (Bildung grosser Störzonen) und bedeutenden Hebungsraten auftreten werden, wird von zentraler Wichtigkeit sein.

Potentiell günstige Verdünnung in grossen Flüssen.

Die Wahrscheinlichkeit eines versehentlichen, menschlichen Eindringens wird durch die Standortwahl reduziert, indem wirtschaftlich interessante Rohstofflager vermieden werden. Geothermische Anlagen können jedoch nicht ausgeschlossen werden.

Fragestellungen in Hinblick auf die Standortcharakterisierung während der Standortauswahl

Standortspezifische Daten sollten eine realistischere Bewertung der Wirksamkeit der natürlichen Barriere erlauben.

Eine Untersuchung der Sorptionseigenschaften des Wirtgesteins für die dosisrelevantesten Radionuklide (^{129}I und ^{14}C) ist angesichts der starken Abhängigkeit der berechneten Strahlenexposition von diesen Parametern besonders wichtig.

Referenzen

Progress Report on Disposal Concept for TRU Waste in Japan. Japan Nuclear Cycle Development Institute JNC TY1410 2000-002 & TRU TR-2000-02.

PAGIS/ PACOMA/ EVEREST	Diverse Antragsteller und Forschungseinrichtungen in Belgien, Deutschland, Frankreich, Grossbritannien und den Niederlanden, koordiniert von der EU PAGIS publiziert 1988, PACOMA publiziert 1990-91, EVEREST 1996
---------------------------------------	---

Zielsetzung und Randbedingungen

Das Ziel der PAGIS Studie (Performance Assessment of Geological Isolation Systems) war die Förderung einer Serie von Sicherheitsanalysen zur geologischen Endlagerung radioaktiver Abfälle, koordiniert unter EU-Mitgliedsstaaten [1]. Das Hauptaugenmerk der Studie galt verglasten hochaktiven Abfällen. Berücksichtigt wurden Referenz- und Alternativstandorte in vier generischen geologischen Verhältnissen – Ton, Granit, Steinsalz und Sedimente des Tiefseebodens.

In der PACOMA Studie (Performance Assessment of the Confinement of Medium-active and Alpha-bearing wastes) kamen in PAGIS entwickelte Methoden für die Analyse von anderen langlebigen Abfällen zur Anwendung [2]. Drei geologische Situationen wurden betrachtet – Ton, Granit und Steinsalz.

Die EVEREST Studie (Evaluation of Elements Responsible for the Effective engaged dose rates associated with the final Storage of radioactive waste) beschäftigte sich hauptsächlich mit der Entwicklung und Anwendung einer gemeinsamen Methodologie für die Untersuchung der Auswirkungen von Variabilität und Unsicherheiten auf die Strahlendosis [3]. Die Analyse der Auswirkungen von Klimaveränderungen war ebenfalls Gegenstand der Studie. Die gleichen drei generischen Situationen wie in PACOMA wurden betrachtet.

Abfälle

PAGIS: Verglaste Referenz-HAA auf der Basis einer Wiederaufarbeitung von LWR Brennstoff mit 33 bis 40 $\text{GW}_{\text{th}}/\text{tSM}$ (Abbrand) durch COGEMA und 30 Jahren Zwischenlagerung vor der Endlagerung. Referenzinventare von HAA aus der Wiederaufarbeitung von 8'200 tSM für Ton, 48'000 tSM für Granit, 70'000 tSM für Steinsalz und 100'000 tSM für Sedimente des Tiefseebodens.

PACOMA: Referenzinventare für mittelaktive Abfälle, basierend auf geschätzten Abfallmengen in Belgien und Grossbritannien (Ton), Frankreich (Granit) und Deutschland (Steinsalz).

EVEREST: HAA und MAA Inventare auf der Grundlage von erwarteten nationalen Endlagerkapazitäten in Belgien, Frankreich, Deutschland und den Niederlanden. Die Kapazitäten variieren in Abhängigkeit von der Wiederaufarbeitung von 3'000 tSM (Niederlande) bis 100'000 tSM (Frankreich).

Geologie und Standorte

In PAGIS wurden vier generische geologische Situationen betrachtet – Ton, Granit, Steinsalz und Sedimente des Tiefseebodens. Die Option Sedimente des Tiefseebodens wurde weder in PACOMA noch in EVEREST betrachtet. Informationen zu den Standorten und Erkenntnisse zur Option Sedimente des Tiefseebodens werden in diesem Steckbrief nicht dargelegt.

In der PAGIS-Studie wurde zunächst eine grosse Anzahl von Standorten aus dem Europäischen Katalog betrachtet. Für die Hauptstudie wurden ein Referenzstandort und ein oder mehrere alternative Standorte berücksichtigt. Der grösste Anteil des Aufwands für die Analysen galt dem Referenzstandort.

PAGIS	Referenzstandort	Alternative(r) Standort(e)
Ton	Boom Ton bei Mol (B)	Oxford-Ton bei Harwell (GB)
Granit	Granitaufschluss bei Auriat (F)	Küstennaher Granit bei Barfleur (F)
		Granit unter Sedimenten (GB)
Steinsalz	Salzstock Gorleben (D)	Geschichtetes Steinsalz im Rhonetal (F)

Für PACOMA wurden die gleichen Referenzstandorte bearbeitet. Nur für den alternativen Standort Steinsalz wurde ein anderer Standort, nämlich ein kleiner Salzstock in den Niederlanden, ausgewählt.

Zum Zeitpunkt der EVEREST Studie hatte die Standortwahl – besonders in Frankreich – Fortschritte gemacht. Zudem beteiligten sich auch andere Organisationen, so dass in der EVEREST Studie die folgenden Standorte bearbeitet wurden:

- **Ton:** Boom Ton bei Mol (B); Toniger Mergel im Pariser Becken (F)
- **Steinsalz:** Salzstock Gorleben (D); Geschichtetes Steinsalz in Frankreich; generischer Salzstock in den Niederlanden
- **Granit:** "Generischer" Granitaufschluss (auf der Grundlage von Auriat).

Sicherheitskonzept

In sämtlichen Fällen wurde den technischen Barrieren im Vergleich zur Geosphärenbarriere eine relativ geringe Rolle zugeteilt. Für die hochaktiven Abfälle wurden die langsame Auflösung/Auslaugung des Glases und die begrenzte Löslichkeit einiger Radionuklide als Hauptsicherheitsfunktionen der technischen Barriere betrachtet.

Erkenntnisse bezüglich der Wirksamkeit der technischen Barrieren und ihrer Abhängigkeit vom Standort

Die Wirksamkeit der technischen Barriere ist in der PAGIS/PACOMA/EVEREST Studie nicht wesentlich in Erscheinung getreten.

Ein wichtiger Gesichtspunkt für die Option im Steinsalz war die Einschränkung bei der räumlichen Auslegung eines Endlagers aufgrund der Wirtgesteinseigenschaften. Die geringste Einengung ergab sich für den grossen Salzstock Gorleben, wo die mittelaktiven Abfälle in grossen vertikalen Silos eingelagert wurden. Die hochaktiven und langlebigen mittelaktiven Abfälle wurden in vertikale Tiefbohrungen eingelagert, die aus Stollen auf gleicher Höhe abgeteuft wurden. Im kleineren Salzstock, der als Standort in den Niederlanden bearbeitet wurde, war das Endlager auf zwei Stockwerken angelegt. Die Kammern für die mittelaktiven Abfälle lagen oberhalb der HAA-Stollen, von denen aus die hochaktiven Abfälle in Bohrlöchern eingelagert wurden. In der geschichteten Steinsalzformation wurde eine Auslegung betrachtet, bei der die hochaktiven wie auch die mittelaktiven Abfälle in Bohrlöchern eingelagert wurden. Diese hatten jedoch eine geringere Teufe (ca. 80 m) als jene, die für Gorleben vorgeschlagen wurden (ca. 300 m).

Erkenntnisse bezüglich der Wirksamkeit der Geosphäre

Die Erkenntnisse stammen hauptsächlich aus der EVEREST Studie, die als die fortgeschrittenste Analyse erachtet werden kann.

Für den Ton waren die wichtigsten Parameter

- die effektive Mächtigkeit der Wirtgesteinsschicht und die Diffusionskoeffizienten
- die Retardationsfaktoren (Parameter der Sorption) für die ausschlaggebenden Radionuklide.

Die Parameter des regionalen Grundwasserfließsystems (hydraulische Bedingungen) waren nur in manchen Fällen wichtig, speziell bei solchen mit Klimaveränderungen.

Für das Steinsalz waren im ungestörten Fall die Rate der Beckenhebung bzw. des Diapirismus sowie der Subrosion wichtig. Der Zufluss von Salzlösung könnte wichtig sein, falls in der Formation bedeutende Mengen an Salzlösung vorhanden sind.

Für den Granit waren die wichtigsten Parameter die hydraulische Leitfähigkeit und die Retardationsfaktoren (Parameter der Sorption) für die ausschlaggebenden Radionuklide. Unentdeckte Störungen könnten wichtig sein ebenso wie die Lage eines Grundwasserentnahmebrunnens (falls vorhanden).

Schlüsselfragen hinsichtlich der Standortauswahl

Für Standorte im Ton werden die Mächtigkeit und Qualität der Tonschicht als die wichtigsten Faktoren bezeichnet. Die hydraulische Leitfähigkeit angrenzender Aquifere und die Möglichkeit, aus diesen Wasser zu fördern, könnten ebenfalls wichtig sein.

Für Standorte im Steinsalz sind die Geometrie und Homogenität der Steinsalzformation wichtig. Grössere

und weniger gestörte Salzstöcke werden bevorzugt. Eine ausreichende Mächtigkeit der Überdeckung ist erforderlich, um die Steinsalzformation vor langfristigen Veränderungen zu schützen.

Für Standorte in Granit sind die Gesteinsqualität und die Art der Klüftung wichtig. Ein günstiges regionales, hydraulisches Regime könnte ebenfalls wichtig sein.

Fragestellungen in Hinblick auf die Standortcharakterisierung während der Standortauswahl

Schlussfolgerungen für die Standortwahl oder die Standortcharakterisierung wurden in den PAGIS/PACOMA/EVEREST Studien nicht diskutiert. Auch standen für die verschiedenen berücksichtigten Wirtgesteine und Standorte standortspezifische Daten von sehr unterschiedlichem Detaillierungsgrad zur Verfügung. Lediglich für die Analysen des Boom Tons bei Mol und des Salzstocks Gorleben war das Datenniveau genügend, um die Untersuchungen als standortspezifisch einzustufen. Dies veranschaulicht die Schwierigkeiten beim Vergleich von Standorten, für die Daten von sehr unterschiedlichem Niveau vorliegen.

Referenzen

- 1) PAGIS: Performance Assessment of Geological isolation Systems for Radioactive Waste: Summary. CEC Nuclear Science and Technology Report EUR11775 EN, 1988.
- 2) PACOMA: Vier Hauptstudien für die Analyse von einer Tonformation in Belgien, EUR 13042 EN, 1990; einer Tonformation in Grossbritannien, EUR 13143 EN, 1991; der Steinsalzooption, EUR 13634 EN, 1991; Granitformationen in Frankreich, EUR 12993 FR, 1990.
- 3) Evaluation of elements responsible for the effective engaged dose rates associated with the final storage of radioactive waste: EVEREST project: Summary Report. EC Nuclear Science and Technology. EUR 17122 EN, 1996.