



Aktennotiz

Datum: 24.05.2021

Seiten: 56

Anhänge: 4

Beilagen: -

Verteiler intern:

Verteiler extern:

Sachbearbeiter:

Visum

Visum Vorgesetzte

Klassifizierung keine
Aktenzeichen 33KRM.PIL
Referenz ENSI 33/809

Schlussbericht zum AGNEB-Projekt «Auslegung und Inventar des Pilotlagers»

Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Auftrag

Ziel des Projekts «Auslegung und Inventar des Pilotlagers» war es, einen systematischen Überblick zu vermitteln, welche Prozesse in einem geologischen Tiefenlager ablaufen können und ob diese während der Beobachtungsphase überwachbar sind. Anhand der ablaufenden Prozesse im geologischen Tiefenlager wurden mögliche Konzepte zur Auslegung und zum Inventar des Pilotlagers diskutiert. Das Projekt sollte Grunderkenntnisse zum Bau und zur Überwachung (Monitoring) eines Pilotlagers erarbeiten. Grundlage der Diskussion im Projekt bildete der berücksichtigte Stand von Wissenschaft und Technik. Das Projekt beinhaltete eine Bestandsaufnahme. Ausserdem sollte es aufzeigen, ob Handlungsbedarf für weitere Anforderungen an ein Pilotlager eines geologischen Tiefenlagers besteht, um diesen in der Neuausgabe der Richtlinie ENSI-G03 zu berücksichtigen. Der Bericht dient nicht dazu, konkrete Handlungsanweisungen abzuleiten, sondern grundsätzliche Themen und Gesichtspunkte zu beleuchten.

Prozesse im geologischen Tiefenlager

Mit dem Pilotlager wird das Verhalten des Gesamtsystems aus technischen und natürlichen Barrieren sowie des radioaktiven Abfalls überwacht (Kapitel 4). Dabei ist die Überwachung auf Grund der begrenzten Beobachtungszeit auf die Anfangsphase des Tiefenlagers beschränkt. Die während der Beobachtungszeit von einigen Dekaden im Pilotlager auftretenden Prozesse, die für eine Beobachtung berücksichtigt werden könnten, umfassen den Wärmeeintrag und die Wärmeausbreitung in den technischen Barrieren und im Wirtgestein (HAA), die Entsättigung und Wiederaufsättigung, den Anstieg des



Klassifizierung:
Aktenzeichen/Referenz:
Titel:
Datum / Sachbearbeiter:

keine
33KRM.PIL / ENSI 33/809
Schlussbericht zum AGNEB-Projekt «Auslegung und Inventar des Pilotlagers»
24.05.2021 / [REDACTED]

Porenwasserdrucks (HAA), die Veränderung der Auflockerungszone, die Konvergenz der Lagerstollen, die Spannungsveränderungen, die Gasbildung sowie das Selbstabdichtungsverhalten der EDZ und des Bentonits. Im verfügbaren Zeitraum voraussichtlich nicht oder kaum auftreten werden der Gastransport in den technischen und natürlichen Barrieren, das Behälterversagen, die mit dem Behälterversagen einhergehende Freisetzung von Radionukliden und deren Transport sowie die Entwicklung der geochemischen Bedingungen.

Im Überwachungskonzept für das Pilotlager ist es notwendig, unerwartete Ereignisse und Entwicklungen in geeigneter Form zu berücksichtigen (Kapitel 4). Dabei geht es insbesondere um Ereignisse, die zwar aufgrund der begrenzten Beobachtungsphase im Pilotlager als nicht beobachtbar während dessen Betriebs eingeordnet sind (z. B. auf Grund ihres prognostizierten späteren zeitlichen Auftretens), deren früheres Eintreten aber eine Überprüfung der Funktionstüchtigkeit der technischen Barrieren erforderlich machen würde. Für die Überwachung unerwarteter Entwicklungen im Pilotlager kann mit dem Überwachungskonzept eine Auswahl von Überwachungsindikatoren vorgeschlagen werden, die, soweit technisch möglich, gemessen werden sollen. Dazu können aus Sicht des ENSI z. B. die Temperatur, die Radionuklidkonzentration oder der Porenwasserdruck gehören. Das integrale Überwachungskonzept sollte bezüglich unerwarteter Entwicklungen durch Regeln für den Umgang mit beobachteten Abweichungen ergänzt werden (ENSI 33/808).

Dagegen bieten die Testbereiche die Möglichkeit, die relevanten Prozesse für die Langzeitsicherheit am Standort vertieft zu untersuchen (Kapitel 4). Mit den dort durchgeführten Experimenten können alle zeitlichen Entwicklungsphasen des Tiefenlagers berücksichtigt werden. Dabei muss nicht zwangsweise das Gesamtsystem, sondern es kann das Verhalten einzelner Komponenten des Tiefenlagers betrachtet werden. Damit ergänzen sich die Erkenntnisse aus der Überwachung des Pilotlagers und der Überwachung der Testbereiche. Es ist daher zu prüfen, ob ausgewählte Experimente in den Testbereichen etwa gleich lang wie das Pilotlager durchgeführt werden sollten, um vor dem Verschluss einen möglichst umfangreichen Datensatz zu den für die Langzeitsicherheit relevanten Prozessen zu sammeln.

Gemäss Art. 68 Kernenergieverordnung wird die Dauer der Beobachtungsphase erst nach Abschluss der Einlagerung der Abfälle festgelegt. Für Planungszwecke wird gemäss Art. 3 SEFV in den Kostenstudien von 50 Jahren ausgegangen (Kapitel 4). Bei einer Beobachtungsphase dieser Länge können im Pilotlager über 70 Jahre Daten gewonnen werden. Erst bei einer Verlängerung um mehrere hundert Jahre wäre theoretisch ein signifikanter zusätzlicher Erkenntnisgewinn möglich. Dies geht aber auch mit einer potenziellen Gefährdung der Langzeitsicherheit einher, wie es im Expertenbericht ENSI 33/698 erläutert wird.

Auslegung

Für die Platzierung des Pilotlagers muss eine Abwägung zwischen zwei gegensätzlich wirkenden Zielen erfolgen, einerseits die Gewährleistung der Übertragbarkeit der Entwicklung im Pilotlager auf das Hauptlager und andererseits die Vermeidung einer negativen Beeinflussung des Hauptlagers durch Entwicklungen im Pilotlager (Kapitel 5). Unter Berücksichtigung der gesetzlichen Vorgaben sollte eine Distanz des Pilotlagers zum Hauptlager gewählt werden, mit der eine signifikante Beeinflussung der Messwerte im Pilotlager durch Prozesse des Hauptlagers vermieden werden kann. Das Pilotlager soll aber auch nicht zu weit entfernt liegen, um die Übertragbarkeit auf das Hauptlager sicherzustellen. Ein geeigneter Abstand des Pilotlagers vom Hauptlager ist im Zuge der weiteren Realisierung des Tiefenlagers zu begründen. Zum jetzigen Zeitpunkt sind keine zusätzlichen Anforderungen an ein Pilotlager bezüglich dessen Anordnung in Bezug zum Hauptlager, des Zugangs und des zeitlichen Ablaufs der Realisierung des Tiefenlagers erforderlich.



Klassifizierung:	keine
Aktenzeichen/Referenz:	33KRM.PIL / ENSI 33/809
Titel:	Schlussbericht zum AGNEB-Projekt «Auslegung und Inventar des Pilotlagers»
Datum / Sachbearbeiter:	24.05.2021 / [REDACTED]

Inventar

Eine definitive Auswahl des Abfallinventars für das Pilotlager ist zum jetzigen Stand der Projektentwicklung nicht stufengerecht und ist stattdessen im Zuge der weiteren Realisierung des Tiefenlagers zu begründen. Dabei ist eine Abwägung zwischen der Repräsentativität des Inventars und der Übertragbarkeit auf das Hauptlager zu treffen. Wenn man der Strategie folgt, Abfälle, bei denen Prozesse im Rahmen des Beobachtungszeitraums schneller oder stärker auftreten für das Pilotlager auszuwählen, dann würden sich bezüglich des Inventars des Pilotlagers für hochaktive Abfälle Lagerbehälter mit hoher Wärmeleistung anbieten (Kapitel 6). Dies würde eher eine Wärmeentwicklung ähnlich zum Hauptlager erwarten lassen. Für das Pilotlager für schwach- und mittelaktive Abfälle ist eine Auswahl der Abfälle schwieriger, da sie eine hohe Diversität aufweisen. Eine Möglichkeit wäre, SMA mit schnell korrodierenden metallischen Materialien oder SMA mit hohem Anteil an leicht abbaubaren organischen Materialien einzulagern. Eine alternative Strategie wäre die Auswahl verschiedener Abfälle, welche die Zusammensetzung der Abfälle widerspiegeln. Bei der weiteren Realisierung des Tiefenlagers ist zu begründen, ob Wechselwirkungen zwischen unterschiedlichen Abfallsorten vermieden werden sollten.

Erkenntnisse für die Neuauflage der Richtlinie ENSI-G03

Die bestehenden Regelungen der Richtlinie ENSI-G03 haben sich mit dem integralen Überwachungskonzept bzw. -programm als ausreichend erwiesen. Ergänzungen wurden im Erläuterungsbericht der Richtlinie ENSI-G03 hinsichtlich der Informationen der Öffentlichkeit eingefügt. Bis zum Abschluss von Etappe 3 (voraussichtlich etwa 2029) sind die Bestimmungen der Richtlinie ENSI-G03 ausreichend für die weiteren Planungsschritte der Nagra. Im Zuge der weiteren Arbeiten am Tiefenlager kann sich ein Handlungsbedarf herauskristallisieren, der zum gegebenen Zeitpunkt entsprechend aufgegriffen wird. Anlass dazu kann z. B. die Überprüfung des integralen Überwachungskonzepts oder das alle 5 Jahre einzureichende Entsorgungsprogramm bieten, in dem Zwischenschritte der Weiterentwicklung des Tiefenlagerkonzepts dokumentiert werden.



Klassifizierung: keine
Aktenzeichen/Referenz: 33KRM.PIL / ENSI 33/809
Titel: Schlussbericht zum AGNEB-Projekt «Auslegung und Inventar des Pilotlagers»
Datum / Sachbearbeiter: 24.05.2021 / [REDACTED]

Inhalt

Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	1
1 Einleitung	5
2 Rechtliche Grundlagen und Vorgaben zur Überwachung	8
3 Tiefenlagerkonzept der Nagra in Etappe 2	11
4 Prozesse im geologischen Tiefenlager bzw. im Pilotlager	15
4.1 Funktionen von Pilotlager und Testbereichen	15
4.2 Systematischer Überblick über sicherheitsrelevante Prozesse im geologischen Tiefenlager für hochaktive Abfälle	15
4.3 Systematischer Überblick über sicherheitsrelevante Prozesse im geologischen Tiefenlager für schwach- und mittelaktive Abfälle	19
4.4 Identifikation der im Pilotlager auftretenden Prozesse	20
4.5 Identifikation von Prozessen, die in den Testbereichen untersucht werden können	23
4.6 Berücksichtigung unerwarteter Entwicklungen im Pilotlagers	23
4.7 Überwachung: Überblick über den aktuellen Stand von Messmethoden	24
4.8 Fazit	25
5 Auslegung des Pilotlagers	27
5.1 Einflussfaktoren für die Anordnung in Bezug zum Hauptlager	27
5.2 Design des Pilotlagers und der Testbereiche	28
5.3 Fazit	29
6 Auswahl der Abfälle für das Pilotlager	31
6.1 Einfluss der Abfälle auf die Prozesse im gTL	31
6.2 Mögliche Strategien für die Auswahl der Abfälle für das Pilotlager	33
6.2.1 Pilotlager für hochaktive Abfälle	33
6.2.2 Pilotlager für schwach- und mittelaktive Abfälle (SMA)	34
6.3 Fazit	34
7 Beantwortung der Fragen an das Projekt	35
Literatur	38
Anhang 1: Bestimmungen der KEV zum Pilotlager	42
Anhang 2: Vorgaben gemäss Richtlinie ENSI-G03 zum Pilotlager	43
Anhang 3: Vorgehen der Nagra bei der Realisierung des Pilotlagers gemäss des Entsorgungsprogramms 2016	48
Anhang 4: Forschungsaktivitäten der Nagra zum Pilotlager (NTB 16-02)	53



Klassifizierung: keine
Aktenzeichen/Referenz: 33KRM.PIL / ENSI 33/809
Titel: Schlussbericht zum AGNEB-Projekt «Auslegung und Inventar des Pilotlagers»
Datum / Sachbearbeiter: 24.05.2021 / [REDACTED]

1 Einleitung

Ausgangslage

Ein geologisches Tiefenlager für radioaktive Abfälle besteht gemäss Art. 64 Kernenergieverordnung (KEV) aus einem Hauptlager, aus einem Pilotlager und aus Testbereichen. Das Pilotlager enthält einen kleinen, aber repräsentativen Anteil des Lagerinventars. Im Pilotlager ist das Verhalten der Abfälle, der Verfüllung und des Wirtgesteins bis zum Ablauf der Beobachtungsphase zu überwachen. Die Ergebnisse dienen der Erhärtung des Sicherheitsnachweises und müssen auf das Hauptlager übertragbar sein. Neben den Beobachtungen im Pilotlager tragen auch Beobachtungen im Lager und in dessen Umfeld, Experimente in den Testbereichen, Laboruntersuchungen, Studien und die Verfolgung von Wissenschaft und Technik zum Sicherheitsnachweis bei.

Die Schweiz ist zurzeit das einzige Land, das in der Gesetzgebung ein Pilotlager in dieser Form als Bestandteil eines geologischen Tiefenlagers vorschreibt. In der Richtlinie ENSI-G03 von 2009 wurden bereits Vorgaben zur Überwachung (Monitoring) und zum Pilotlager formuliert sowie im dazugehörigen Erläuterungsbericht Überlegungen zu den zu überwachenden Prozessen bzw. Parametern beschrieben. Im Rahmen des Projekts sollte diskutiert werden, ob die Vorgaben der Richtlinie zu ergänzen oder zu konkretisieren sind.

Projektziele

Ziel des Projekts «Auslegung und Inventar des Pilotlagers» war es, einen systematischen Überblick zu vermitteln, welche Prozesse in einem geologischen Tiefenlager ablaufen können und ob diese während der Beobachtungsphase überwachbar sind. Anhand der ablaufenden Prozesse im geologischen Tiefenlager wurden mögliche Konzepte zur Auslegung und zum Inventar des Pilotlagers diskutiert. Das Projekt sollte Grunderkenntnisse zum Bau und zur Überwachung (Monitoring) eines Pilotlagers erarbeiten. Dabei wurden unter anderem folgende Fragen diskutiert:

- a) Welche Funktionen hat das Pilotlager?
- b) Welche Prozesse und Eigenschaften können innerhalb welcher Zeiträume im Pilotlager beobachtet werden, die zu belastbaren Aussagen auch über das Hauptlager führen (Übertragbarkeit)?
- c) Welche Prozesse und Eigenschaften müssen beobachtet werden, um unerwartete Entwicklungen frühzeitig erkennen zu können?
- d) Wie ist bei gegebenem Inventar des Hauptlagers das repräsentative Inventar des Pilotlagers zu wählen?
- e) Welche Wechselwirkungen zwischen unterschiedlichen Abfallsorten müssen im Pilotlager vermieden werden, damit für das Hauptlager belastbare Aussagen gemacht werden können?
- f) Sind aufgrund der geforderten räumlichen und hydraulischen Trennung vom Hauptlager zusätzliche Anforderungen an ein Pilotlager zu stellen?
- g) Sind an den Zugang zum Pilotlager und die Auslegung des Pilotlagers zusätzliche räumliche Anforderungen zu stellen?
- h) Sind an die Auslegung des Pilotlagers im Hinblick der zeitlichen Abfolge der Realisierung eines Tiefenlagers zusätzliche Anforderungen zu stellen?



Klassifizierung: keine
Aktenzeichen/Referenz: 33KRM.PIL / ENSI 33/809
Titel: Schlussbericht zum AGNEB-Projekt «Auslegung und Inventar des Pilotlagers»
Datum / Sachbearbeiter: 24.05.2021 / [REDACTED]

- i) Inwieweit können Artefakte eine Rolle spielen? (z. B. Beeinflussung der Prozesse durch Sensoren und deren Zuleitungen)?

Grundlage der Diskussion im Projekt bildete der berücksichtigte Stand von Wissenschaft und Technik. Das Projekt beinhaltete eine Bestandsaufnahme zu den genannten Themen. Ausserdem sollte es aufzeigen, ob Handlungsbedarf für weitere Anforderungen an ein Pilotlager eines geologischen Tiefenlagers besteht und wann allfällige weitere Abklärungen im Rahmen der Realisierung eines Tiefenlagers notwendig sein werden.

Projektorganisation

Das Projekt wurde im Rahmen des Forschungsprogramms Radioaktive Abfälle der Arbeitsgruppe des Bundes für die nukleare Entsorgung initiiert. Es wurde vom ENSI geleitet und durchgeführt. Die Erkenntnisse und Ergebnisse basieren auf ausgewählten Berichten, aber vor allem auf Expertenbefragungen. Je nach Thema wurden nationale und internationale Experten im Rahmen von Fachsitzungen befragt. Zur Beantwortung der oben genannten Fragen wurden zwischen 2011 bis 2014 acht Fachsitzungen mit verschiedenen Themenschwerpunkten durchgeführt:

- Gesetzliche Grundlagen und behördliche Vorgaben zum Pilotlager und zu den Testbereichen;
- Überlegungen der ehemaligen Expertengruppe Entsorgungskonzepte für radioaktive Abfälle EKRA zu den Testbereichen und zum Pilotlager;
- Erfahrungen aus Langzeitexperimenten und der Überwachung von Stauanlagen;
- relevante Prozesse für ein Pilotlager in einem geologischen Tiefenlager;
- verschiedene Funktionen des Pilotlagers und der Testbereiche;
- Platzierung und Auslegung eines Pilotlagers im Tiefenlager;
- Information und Einbezug der Bevölkerung beim Überwachen eines Pilotlagers; sowie
- Erkenntnisse aus dem EU-Projekt «MoDeRn».

An den Fachsitzungen nahmen Vertreter

- des Eidgenössischen Nuklearsicherheitsinspektorats ENSI;
- der Arbeitsgruppe Sicherheit Kantone AG SiKa;
- der ehemaligen Expertengruppe Entsorgungskonzepte für radioaktive Abfälle EKRA;
- der Landesgeologie (swisstopo; Felslabor Mont Terri);
- der Ingenieurgeologie ETH Zürich; und
- der Nationalen Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle Nagra

teil. Zu spezifischen Themen wurden weitere Experten aus dem In- und Ausland eingeladen.

Der vorliegende Bericht fasst die Bestandsaufnahme des Projektteams des ENSI durch die Expertenbefragung zum Projekt «Auslegung und Inventar des Pilotlagers» zusammen und gibt einen Ausblick für weitere Schritte. Allfälligen Handlungsbedarf wird das ENSI im Rahmen seiner Aufsichtstätigkeit umsetzen. Die Arbeiten im Projekt beruhen im Wesentlichen auf Berichten der Nagra aus Etappe 1 und dem Anfang der Etappe 2. Die Berichte der Nagra zu ihrem Vorschlag in Etappe 2 des Sachplanverfahrens wurden teilweise berücksichtigt.



Klassifizierung:	keine
Aktenzeichen/Referenz:	33KRM.PIL / ENSI 33/809
Titel:	Schlussbericht zum AGNEB-Projekt «Auslegung und Inventar des Pilotlagers»
Datum / Sachbearbeiter:	24.05.2021 / [REDACTED]

Das Projekt «Auslegung und Inventar des Pilotlagers» (Projekt Pilotlager) war mit den Projekten «Monitoringkonzept und -einrichtungen» (ENSI 33/412, Projekt Monitoring) und «Lagerauslegung» (ENSI 33/503 Rev.1) eng verknüpft. Das Projekt Pilotlager lieferte dem Projekt Monitoring Grundlagen wie z. B. bzgl. Prozessverständnis und zu erfassende Parameter im Pilotlager, wohingegen das Projekt Monitoring auf den internationalen Stand der Techniken und konzeptionelle Überlegungen zum Monitoring im Pilotlager fokussierte. Das Pilotlager wurde in diesen drei Projekten als kleiner Teil des Gesamtlagers angesehen, die Auslegung des Pilotlagers (geologische und hydrologische Verhältnisse, Grösse der Lagerstollen/-kavernen, Verfüllmaterialien der Lagerstollen/-kavernen) musste dazu mit derjenigen des Hauptlagers vergleichbar sein. Diese Informationen wurden im Projekt «Lagerauslegung» erarbeitet und waren eine wichtige Grundlage für das Projekt Pilotlager.

Berichtsstruktur

Der Bericht soll eine erste Auslegeordnung zum Thema Pilotlager bilden. Im Bericht wurden, basierend auf den vorliegenden Berichten der Nagra bis ins Jahr 2016, Punkte zusammengetragen, die relevant für die Charakterisierung des Pilotlagers und seine spätere Ausgestaltung sein können. Ausserdem sollte ein etwaiger Regulierungsbedarf identifiziert werden, um diesen in der Neuausgabe der Richtlinie ENSI-G03 zu berücksichtigen. Der Bericht dient nicht dazu, konkrete Handlungsanweisungen abzuleiten. Die Erkenntnisse aus Modern2020 sind in das Projekt «Monitoringkonzept und -einrichtungen 2» (ENSI 33/808) eingeflossen und wurden daher hier nicht zusätzlich berücksichtigt.

Der Bericht geht in den folgenden Kapiteln auf die rechtlichen Grundlagen (Kap. 2), das Tiefenlagerkonzept der Nagra (Kap. 3), die Prozesse im geologischen Tiefenlager bzw. im Pilotlager (Kap. 4), die Auslegung des Pilotlagers (Kap. 5) und die Auswahl der Abfälle für das Pilotlager (Kap. 6) ein. Die im Projekt zu beantwortenden Fragen werden in Kapitel 7 zusammengefasst.



Klassifizierung:
Aktenzeichen/Referenz:
Titel:
Datum / Sachbearbeiter:

keine
33KRM.PIL / ENSI 33/809
Schlussbericht zum AGNEB-Projekt «Auslegung und Inventar des Pilotlagers»
24.05.2021 / [REDACTED]

2 Rechtliche Grundlagen und Vorgaben zur Überwachung

Ein geologisches Tiefenlager besteht aus dem Hauptlager zur Aufnahme der radioaktiven Abfälle, aus einem Pilotlager und aus Testbereichen (Art. 64 KEV).

Testbereiche

Gemäss Art. 65 KEV sind in den Testbereichen die sicherheitsrelevanten Eigenschaften des Wirtgesteins zur Erhärtung des Sicherheitsnachweises standortspezifisch vertieft abzuklären. Zusätzlich sind vor Inbetriebnahme des Tiefenlagers die sicherheitsrelevanten Techniken zum Einbringen des Verfüllmaterials, das Entfernen des Verfüllmaterials zwecks allfälliger Rückholung von Abfallgebinden und die Rückholung von Abfallgebinden zu erproben sowie die Funktionstüchtigkeit dieser Techniken nachzuweisen. Während des Betriebs des Tiefenlagers ist in den Testbereichen die Versiegelung von Kavernen und Stollen zu erproben und deren Funktionstüchtigkeit nachzuweisen.

Pilotlager

Gemäss Art. 66 KEV ist im Pilotlager das Verhalten der Abfälle, der Verfüllung und des Wirtgesteins bis zum Ablauf der Beobachtungsphase zu überwachen. Bei der Überwachung sind im Hinblick auf den Verschluss Daten zur Erhärtung des Sicherheitsnachweises zu ermitteln. Die Ergebnisse der Überwachung müssen auf die Vorgänge im Hauptlager übertragbar sein. Sie bilden eine Grundlage für den Entscheid über den Verschluss des Tiefenlagers. Bei der Auslegung des Pilotlagers sind folgende Grundsätze zu beachten:

- Die geologischen und hydrogeologischen Verhältnisse müssen mit denjenigen des Hauptlagers vergleichbar sein.
- Das Pilotlager muss vom Hauptlager räumlich und hydraulisch getrennt sein.
- Die Bauweise des Pilotlagers und die Art der Einlagerung der Abfälle und der Verfüllung müssen dem Hauptlager entsprechen.
- Das Pilotlager muss eine repräsentative kleine Menge von Abfällen enthalten.

In der Richtlinie ENSI-G03 vom Dezember 2020 ist zusätzlich festgehalten, dass das Pilotlager vor der Einlagerung der Abfälle ins Hauptlager beschickt und verfüllt werden muss und dass die Entwicklung im Pilotlager (inkl. Störfälle) die Betriebs- und Langzeitsicherheit des Hauptlagers nicht beeinflussen darf und umgekehrt. Ebenfalls muss eine Umlagerung der Abfälle in einen separaten Lagerstollen bzw. eine separate Lagerkaverne möglich sein, wenn am Ende der Beobachtungsphase aufgrund unvorhergesehener Vorgänge oder infolge geplanter Eingriffe das Pilotlager den Voraussetzungen des Sicherheitsnachweises nicht mehr genügt.

Aufgaben des Betreibers und der Aufsichtsbehörde gemäss KEG/KEV

Gemäss Art. 30 KEV muss die Betriebsorganisation von Kernanlagen so gestaltet sein, dass die Verantwortung für den Betrieb der Anlage in allen Betriebszuständen, für die Instandhaltung und Überprüfung der Anlage, für den Strahlenschutz und die radioaktiven Abfälle, für die Notfallplanung und die Notfallbereitschaft sowie für die Überwachung und die Bewertung der nuklearen Sicherheit durch die Organisation selbst wahrgenommen werden kann.

Das ENSI ist die Aufsichtsbehörde in Bezug auf nukleare Sicherheit und Sicherung (Art. 6 KEV). Das ENSI beaufsichtigt die schweizerischen Kernanlagen und damit auch ein zukünftiges geologisches Tiefenlager. Sein Aufsichtsbereich reicht von der Projektierung über den Betrieb bis zum Verschluss des



Klassifizierung:	keine
Aktenzeichen/Referenz:	33KRM.PIL / ENSI 33/809
Titel:	Schlussbericht zum AGNEB-Projekt «Auslegung und Inventar des Pilotlagers»
Datum / Sachbearbeiter:	24.05.2021 / [REDACTED]

Tiefenlagers. Das ENSI wacht darüber, dass der Betreiber seine Verantwortung für ein sicheres Tiefenlager wahrnimmt und die gesetzlichen und behördlichen Anforderungen an ein Tiefenlager umgesetzt werden. Zusätzlich kann das ENSI bei Bedarf eigene zusätzliche Messungen im Pilotlager und radiologische Umweltüberwachungen durchführen (analog zu MADUK in der Umgebung der Kernkraftwerke).

Stufenweise Entwicklung des Überwachungsprogramms für das Pilotlager

Für die Rahmenbewilligung hat der Gesuchsteller das Konzept für die Beobachtungsphase und den Verschluss einzureichen (Art. 23 KEV). Für die Baubewilligung hat er das Projekt für die Beobachtungsphase und den Plan für den Verschluss einzureichen (Art. 24 KEV). Der Inhaber einer Betriebsbewilligung hat das Projekt für die Beobachtungsphase und den Plan für den Verschluss alle zehn Jahre zu überprüfen und nachzuführen (Art. 42 KEV). Der Eigentümer eines Tiefenlagers hat im aktualisierten Projekt für die Beobachtungsphase die nach Abschluss der Einlagerungen vorgesehenen Massnahmen zur Überwachung des Tiefenlagers zu umschreiben. Dabei hat er auch die Dauer der Beobachtungsphase vorzuschlagen (Art. 68 Abs. 1 KEV). Das Departement ordnet die Überwachung an und legt die Dauer der Beobachtungsphase fest. Es kann diese bei Bedarf verlängern (Art. 68 Abs. 2 KEV).

Ein integrales Überwachungskonzept ist gemäss ENSI 33/649 erstmalig mit dem Rahmenbewilligungsgesuch einzureichen. Gemäss Richtlinie ENSI-G03 ist für die Bau-, Betriebs- und gegebenenfalls Nachverschlussphase eines geologischen Tiefenlagers stufengerecht ein integrales Überwachungsprogramm zu erstellen. Die Überwachung ist für jeden Überwachungsaspekt stufengerecht an die jeweilige Phase anzupassen. Dabei erfolgt der Übergang vom Überwachungskonzept über das Überwachungsprogramm bis zur Überwachung themenspezifisch, schrittweise und stufengerecht. Das integrale Überwachungskonzept bzw. -programm muss von den Entsorgungspflichtigen periodisch sowie zu den Bewilligungsgesuchen des geologischen Tiefenlagers auf seine Eignung hin geprüft, nach Bedarf aktualisiert und dem ENSI eingereicht werden. Darin sind Messungen zur zeitlichen Entwicklung des Pilotlagers und seines geologischen Umfeldes vorzusehen, sodass Aussagen möglich sind

- a) über die sicherheitsrelevanten Zustände und Vorgänge in einem Pilotlager und in dessen geologischem Umfeld;
- b) über die frühzeitige Erkennung von Entwicklungen;
- c) über die Wirksamkeit des Barrierensystems;
- d) zur Erhärtung des Sicherheitsnachweises.

Aufgabenverteilung bei der Überwachung

In diversen IAEA-Dokumenten als auch in den WENRA Safety Reference Levels (WENRA 2014) wird die Verantwortung für die Überwachung zwischen Betreiber und Behörde genau definiert. Dabei liegt die Hauptaufgabe der Überwachung beim Betreiber des Tiefen- bzw. Pilotlagers. Dieser muss ein geeignetes Überwachungsprogramm entwickeln und dieses während des Baus, des Betriebs und des Verschlusses durchführen sowie gegebenenfalls immer wieder an neue Befunde anpassen (WENRA SRL 2.1.8 und SRL 2.4.2 sowie IAEA 2014a). Das Überwachungsprogramm muss auf den Lagerstandort, an dem das Lager gebaut wird, angepasst sein (SRL WENRA SRL 2.3.11). Am Standort selbst müssen sogenannte Nullmessungen getätigt werden, um den Ist-Zustand des Systems und somit etwaige Veränderungen des Systems durch den Bau und Betrieb des Lagers festzustellen zu können (WENRA SRL 2.2.2 und SRL 2.4.1, IAEA 2016 und IAEA 2011, IAEA 2014a). Der Betreiber muss Vorsorge dafür treffen, dass Unterhalt, Tests, Inspektionen und die Überwachung der gesamten Konstruktion des Lagers sowie aller Bauteile über den gesamten Überwachungsprozess gewährleistet sind,



Klassifizierung: keine
Aktenzeichen/Referenz: 33KRM.PIL / ENSI 33/809
Titel: Schlussbericht zum AGNEB-Projekt «Auslegung und Inventar des Pilotlagers»
Datum / Sachbearbeiter: 24.05.2021 / [REDACTED]

ebenso wie der Erhalt der Daten (WENRA SLR SRL 2.3.10 und IAEA 2014a). Zusätzlich muss der Betreiber der Behörde regelmässig Bericht über die Messergebnisse erstatten (IAEA 2014a).

Die Behörde ist verpflichtet, sicherzustellen, dass eine Überwachung durchgeführt werden kann und auch durchgeführt wird (IAEA 2014a). Sie muss das gesamte Überwachungsprogramm prüfen und freigeben, inkl. der Prüfung ausreichend vorhandener finanzieller Mittel (IAEA 2014b und IAEA 2014a). Ihr obliegt die Überprüfung der Messdaten durch eigene Experten (IAEA 2014a). Diese Aufgaben dürfen nur an Drittpersonen ausgelagert werden, wenn der Vergabeprozess transparent und fair ist und die gewählte Institution alle Voraussetzungen erfüllt (IAEA 2014a). Auch externe Organisationen können für Überwachungen herangezogen werden, beispielsweise könnten externe Organisationen zum Sammeln und Speichern von Daten der Überwachung herangezogen werden. Die nationale Behörde könnte ausserdem mit der lokalen Bevölkerung zusammenarbeiten, um so mehr Transparenz zu schaffen (IAEA 2014a und NEA 2014). Diese international vorgegebene Aufgabenverteilung wird im Schweizer Regelwerk abgebildet.



Klassifizierung:	keine
Aktenzeichen/Referenz:	33KRM.PIL / ENSI 33/809
Titel:	Schlussbericht zum AGNEB-Projekt «Auslegung und Inventar des Pilotlagers»
Datum / Sachbearbeiter:	24.05.2021 / [REDACTED]

3 Tiefenlagerkonzept der Nagra in Etappe 2

Die folgende Darstellung stützt sich auf die Unterlagen der Nagra zur Nachforderung des ENSI in Etappe 2 SGT (NAB 16-41, NAB 16-42, NAB 16-43, NAB 16-44, NAB 16-45, NAB 16-46, NAB 19-19). Das darin erläuterte Lagerkonzept ist schematisch und konzeptionell und wird im Folgenden nicht beurteilt, sondern die Angaben der Nagra werden als Grundlage übernommen. Das Lagerkonzept wird regelmässig im Entsorgungsprogramm (Art. 32 KEG) weiterentwickelt und dargestellt sowie seitens ENSI geprüft.

Es wird unterschieden zwischen einem Lager für hochradioaktive Abfälle (HAA, einschliesslich abgebrannter Brennelemente), welches auch die langlebigen mittelaktiven Abfälle (LMA) beinhaltet, und einem Lager für schwach- und mittelaktive Abfälle (SMA). Die detaillierte Zuteilung der Abfälle auf diese beiden Lager wird erst mit den Rahmenbewilligungen für diese Lager festgelegt («Inventar und maximale Lagerkapazität», Art. 14 KEG).

Das Lager wird von der Oberfläche aus durch eine Kombination von Schächten und/oder Rampen erschlossen, wobei die Anzahl Rampen gemäss Darstellungen der Nagra von Null bis Zwei und die Anzahl der Schächte von Zwei bis Drei variiert (NAB 16-41). Mindestens ein Zugang wird bis zum Lagerverschluss offenbleiben, wohingegen nach Ende der Einlagerung alle nicht mehr für die Bewetterung, Beobachtung oder allfällige Rückholung benötigten Zugangsbauwerke verfüllt und versiegelt werden. Durch die verbleibenden offenen Zugangsbauwerke wird sichergestellt, dass während der gesamten Beobachtungsphase bis zum Verschluss die Experimente in den Testbereichen und die Messgeräte im Kontrollstollen des Pilotlagers zugänglich bleiben und eine allfällige Rückholung ohne grossen Aufwand (Art. 37 KEG) möglich ist.

Schächte und Rampen enden in der Nähe voneinander (zentraler Bereich gemäss NAB 19-19). Ob es sicherheitstechnisch sinnvoll ist, zwischen Schacht- und Rampenfuss einerseits und den Einlagerungsbereichen (Pilot-/Hauptlager) andererseits einen grösseren horizontalen Abstand vorzusehen, ist Gegenstand aktueller Abklärungen seitens der Nagra. Im Minimum muss entlang dieser horizontalen Strecken Platz genug vorhanden sein, um horizontale Siegel zu setzen und gegebenenfalls auf Störfälle (Wassereintritt, Absturz eines Abfallbehälters) reagieren zu können. Im Maximum werden vermutlich Aspekte bzgl. Lüftung, Brandschutz und Fluchtweglängen ausschlaggebend sein.

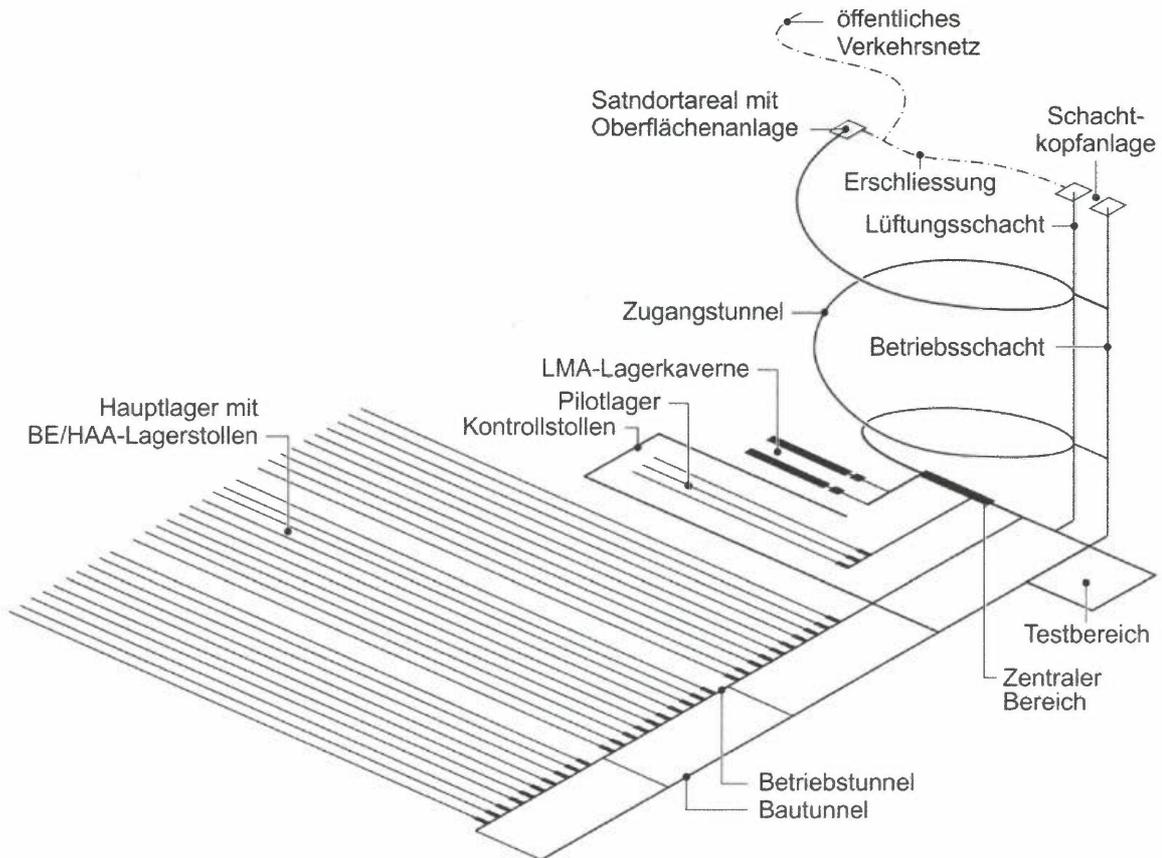
Der HAA-Lagerbereich liegt in einem Tiefenfenster von etwa 500 bis 900 m Tiefe (NAB 16-41). Dieses Tiefenfenster hat die Nagra aus den Rahmenbedingungen (a) zur Länge des Betrachtungszeitraums (1 Million Jahre), (b) zum Schutz des Lagers vor Prozessen der Dekompaktion, (c) zum Schutz vor Erosion/glazialen Tiefenerosion (obere Grenze) und (d) zur bautechnischen Machbarkeit (untere Grenze) abgeleitet. Ausgehend vom Schachtfuss wird ein horizontaler Bautunnel erstellt (Figur 1). Parallel dazu verläuft der Betriebstunnel, von dem die BE/HAA-Lagerstollen des Hauptlagers abzweigen («Kammstruktur»). Letztere werden nach und nach erstellt, sodass immer ein Lagerstollen bereitsteht, wenn ein benachbarter Lagerstollen bereits mit Abfällen beschickt, verfüllt und versiegelt worden ist. Zwischen Betriebstunnel und Bautunnel ist gegebenenfalls ein weiterer, parallel dazu verlaufender Lüftungstunnel vorgesehen. Die Zugänge zum Pilotlager und zum Kontrollstollen liegen gemäss Fig. 1 nahe dem unteren Ende der Rampe (sofern eine Rampe vorgesehen wird, wird die Einlagerung der Abfälle über diese vorgesehen). Die Lagerkavernen des LMA-Lagerteils werden räumlich voneinander getrennt angeordnet, um eine gegenseitige Beeinflussung der LMA- und HAA-Lagerteile zu vermeiden.

Sowohl die Lagerstollen des HAA-Haupt- und Pilotlagers als auch die Lagerkavernen des LMA-Lagerteils werden sich am lokalen Spannungsfeld und dem Einfallen der Schichten des Wirtgesteins ausrichten, d. h. wenige Grade gegen SE bis SSE geneigt sein.



Klassifizierung:
Aktenzeichen/Referenz:
Titel:
Datum / Sachbearbeiter:

keine
33KRM.PIL / ENSI 33/809
Schlussbericht zum AGNEB-Projekt «Auslegung und Inventar des Pilotlagers»
24.05.2021 / [REDACTED]



Figur 1 Schematische Skizze des HAA-Lagers (Quelle: NAB 16-41)

Die Nagra geht davon aus, dass die BE/HAA-Lagerstollen (Figur 1) komplett mit einer Innenschale aus Spritzbeton gesichert werden. Das jeweilige Stollenprofil soll alle ca. 10 Einlagerungsbehälter durch eine Versiegelungszone unterbrochen werden, um etwaige Transportwege entlang der Stolleninnen- auskleidungen zu unterbinden (NAB 16-41, Fig. 2.4-5).

Die Einlagerung der HAA-Abfälle erfolgt in horizontalen kreisrunden Lagerstollen von 3,2 m Aussendurchmesser. Die Abfälle werden in massiven Stahlbehältern eingeschweisst und diese nach Transport mittig in den Lagerstollen platziert. Zu diesem Zweck wird jeder Behälter auf einen Sockel aus kompaktierten Bentonitblöcken gestellt und der Resthohlraum mit granulearem Bentonit verfüllt (NAB 16-41, Fig. 2.4-5). Mit der Abfallmatrix (UO₂-Pellets), den Hüllrohren der abgebrannten Brennelemente (bzw. bei den HAA aus der Wiederaufarbeitung der Glasmatrix), dem Endlagerbehälter, der Bentonit-Stollenverfüllung und dem tonreichen Wirtgestein (Opalinuston) wird das gesetzlich geforderte passive Mehrfachbarrierensystem (Art. 3c KEG) umgesetzt. Die Geosphäre ist dabei die wichtigste Barriere.

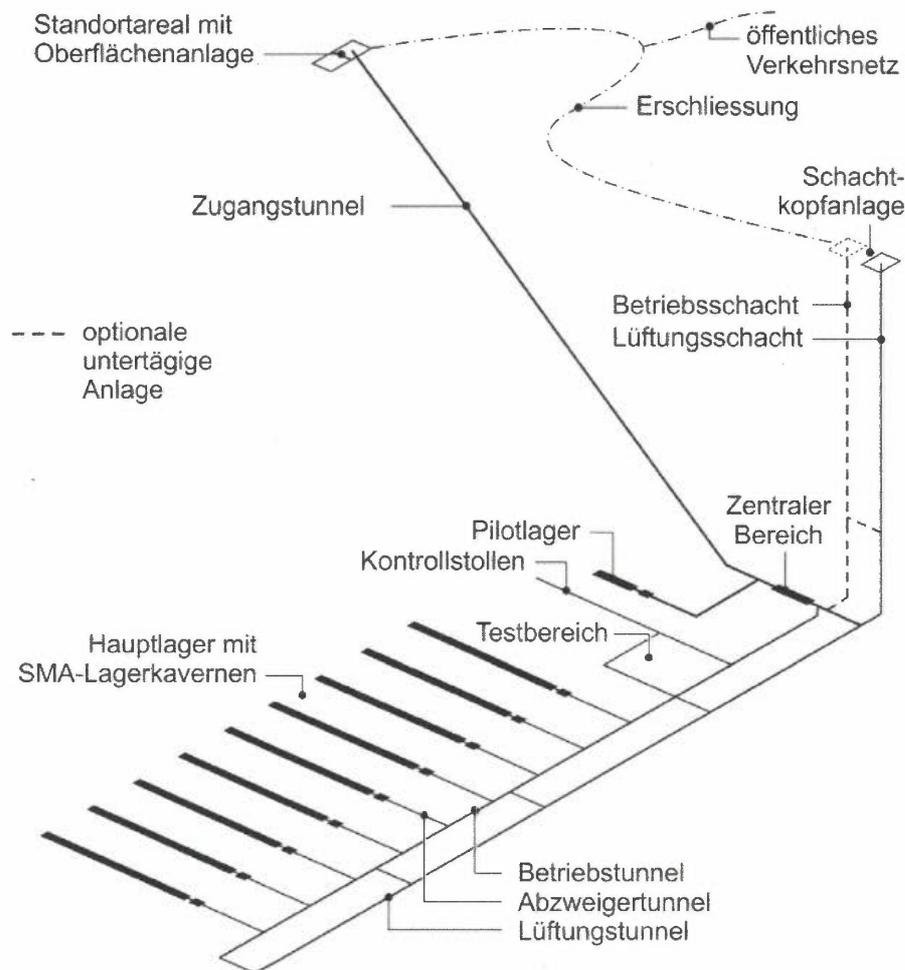
Das SMA-Lager ist in einer Tiefe von 300 bis maximal 800 m Tiefe geplant (Tiefenfenster aus Etappe 1 SGT, NTB 08-05). Auch dieses Tiefenfenster ist Konsequenz aus den Vorgaben zum Schutz des Lagers vor Prozessen der Dekompaktion, der (im Betrachtungszeitraum von 100'000 Jahren weniger wirksamen) flächenhaften Erosion und glazialen Tiefenerosion einerseits und zur bautechnischen Machbarkeit (Lagerung in grossen Kavernen gegenüber kleinen Lagerstollen) andererseits. Vom Schachtfuss geht



Klassifizierung:
Aktenzeichen/Referenz:
Titel:
Datum / Sachbearbeiter:

keine
33KRM.PIL / ENSI 33/809
Schlussbericht zum AGNEB-Projekt «Auslegung und Inventar des Pilotlagers»
24.05.2021 / [REDACTED]

ein horizontaler Bautunnel ab (Figur 2), der, mit diversen Querschlägen versehen, parallel zum Betriebs-tunnel verläuft. Von diesem zweigen die SMA-Lagerkavernen des Hauptlagers ab, die im Unterschied zum HAA-Lager alle vor Beginn der Einlagerung aufgefahren werden sollen. Testbereiche und Pilotlager werden vom Hauptlager getrennt angeordnet. In der Nähe des Pilotlagers wird ein Kontrollstollen vorgesehen, in dem die Messinstrumente während der Beobachtungsphase abgelesen und gewartet werden können.



Figur 2 Schematische Skizze des SMA-Lagers (Quelle: NAB 16-41).

Die SMA-Lagerkavernen (Figur 2) können massiv mit Stützmitteln ausgekleidet werden, da für die spätere Verfüllung dieser Hohlräume ohnehin ein Zementmörtel vorgesehen ist (NAB 16-41). Der Innendurchmesser der Kavernen wird durch die Nagra im Rahmen eines Optimierungsprozesses an die Standfestigkeit des Gebirges angepasst werden. So können je 4, 6, 9 oder noch mehr Betoncontainer (LC-86H) mit je zwölf eingegossenen 200-l-Fässern auf- und nebeneinander platziert werden (die HAA müssen aufgrund der Wärmeproduktion auf einer grösseren Fläche verteilt werden). Nach erfolgter Einlagerung wird die Kaverne mit Zementmörtel verfüllt. Auch hier wird mit der Abfallmatrix, dem Gebinde, dem Betoncontainer, der Zementmörtel-Kavernenverfüllung und dem tonreichen Wirtgestein das gesetzlich geforderte Mehrfachbarrierensystem (Art. 3c KEG) umgesetzt. In beiden Lagerkonzepten (Figuren 1 und 2) ist ein räumlich vom Hauptlager getrenntes Pilotlager (Art. 66 KEV) vorgesehen. Der



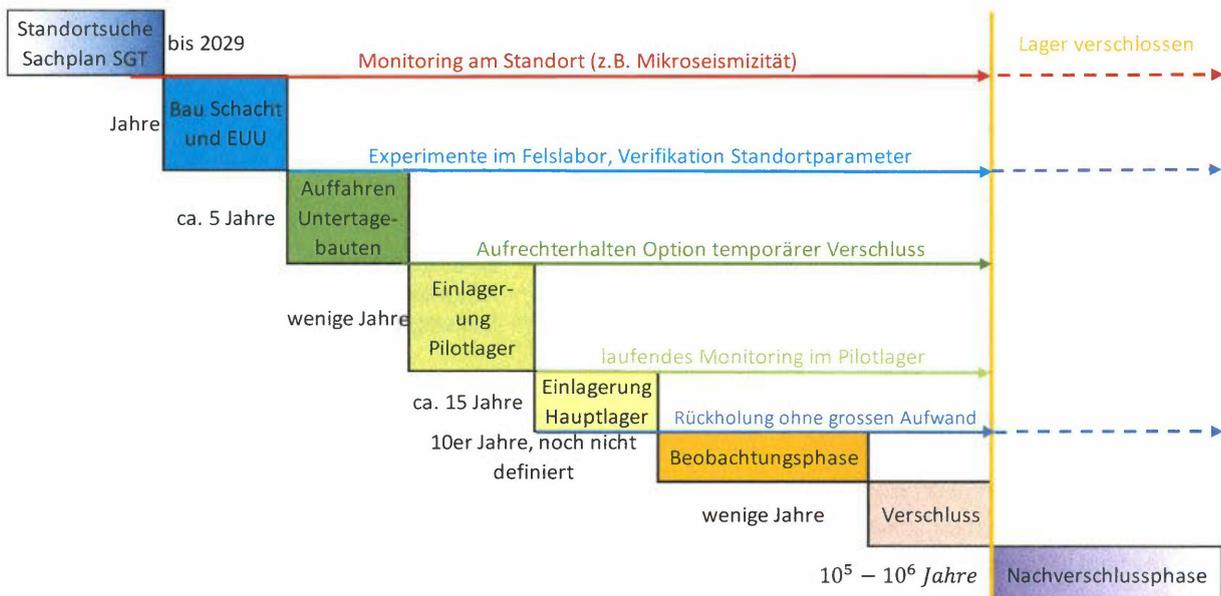
Klassifizierung:
Aktenzeichen/Referenz:
Titel:
Datum / Sachbearbeiter:

keine
33KRM.PIL / ENSI 33/809
Schlussbericht zum AGNEB-Projekt «Auslegung und Inventar des Pilotlagers»
24.05.2021 / [REDACTED]

notwendige Abstand für die hydraulische Trennung ist standortspezifisch bis zur Baubewilligung abzuklären.

Die Idee eines überwachten Lagerteils zur Verifikation der im geologischen Tiefenlager ablaufenden Prozesse (und damit der für das Lager geführten Sicherheitsnachweise) wurde auch in die Lagerauslegung in Frankreich aufgenommen. Im französischen Lagerkonzept wurde aufgrund einer öffentlichen Debatte bei der Lagerentwicklung eine industrielle Pilotphase hinzugefügt (Andra 2016). Diese Pilotphase wird zunächst inaktive Handhabungsversuche umfassen, anschliessend Handhabungsversuche mit einer beschränkten Anzahl von Abfallgebinden mit tatsächlichen Abfällen und schlussendlich eine dritte Phase, in welcher der Übergang zum normalen Einlagerungsbetrieb vollzogen wird. Aus dieser Pilotphase verspricht sich die Andra Rückschlüsse, ob die vorgesehenen organisatorischen Massnahmen und die vorgesehene Ausrüstung tatsächlich zu den notwendigen Eigenschaften der geplanten Einlagerung, Verfüllung und Versiegelung der Einlagerungsbereiche führen. Weiter soll die technische Machbarkeit des französischen Rückholungskonzepts demonstriert werden. Der Routinebetrieb des französischen Endlagers wird erst nach erfolgter und ausgewerteter Pilotphase beginnen.

Im schweizerischen Lagerkonzept ist vorgesehen, dass entsprechende Handhabungsversuche zur Einlagerung und Verfüllung in den Testbereichen (Testbereiche am Standort) stattfinden und auch die Technik zur Rückholung der Abfälle vorgängig zur ersten Einlagerung erprobt und deren Funktionstüchtigkeit nachgewiesen werden muss. Zwischen dem Beginn der erdwissenschaftlichen Untersuchungen untertag und der ersten Einlagerung werden mehrere Jahre vergehen (Figur 3). Für die Gesamtdauer der Datenerhebung im Pilotlager (während des Einlagerungsbetriebs, der Beobachtungsphase und ggf. während des Beginns der Verschlussarbeiten) wird derzeit von etwa 50 bis 100 Jahren ausgegangen (NTB 16-01).



Figur 3 Phasen der Entwicklung eines geologischen Tiefenlagers von der Bestimmung des Standorts bis zur Nachverschlussphase (verändert nach ENSI 33/172).



Klassifizierung:
Aktenzeichen/Referenz:
Titel:
Datum / Sachbearbeiter:

keine
33KRM.PIL / ENSI 33/809
Schlussbericht zum AGNEB-Projekt «Auslegung und Inventar des Pilotlagers»
24.05.2021 / [REDACTED]

4 Prozesse im geologischen Tiefenlager bzw. im Pilotlager

Das Ziel des Kapitels ist die Identifizierung der im Rahmen der Beobachtungsphase auftretenden Prozesse. Konkrete Parameter, die im Pilotlager zu beobachten sind, werden nicht vorgegeben. Die Nagra wird im Rahmen des integralen Überwachungskonzepts (Kap. 4.6) zu beobachtende Parameter vorschlagen und im Zuge der Realisierung des Tiefenlagers weiter konkretisieren. Das ENSI prüft diese Vorschläge.

4.1 Funktionen von Pilotlager und Testbereichen

Die Erkenntnisse aus der Überwachung des Pilotlagers und den Beobachtungen in den Testbereichen ergänzen sich. Der Zielhorizont des Pilotlagers liegt vor allem auf der Beobachtung der Einlagerungsphase und des Anfangszustands des Tiefenlagers innerhalb der Beobachtungsphase. Diese ist durch sich zeitlich verändernde Prozesse geprägt. Insbesondere spielen die Spannungumlagerungen, der Wärmeeintrag (insbesondere im HAA-Lager), die Aufsättigung der Verfüllung sowie die zu Beginn herrschenden oxidierenden Bedingungen eine Rolle. Dagegen können die Testbereiche genutzt werden, um standortspezifisch die relevanten Prozesse für die Langzeitsicherheit, wie z. B. Korrosion, Gasbildung und -freisetzung oder Radionuklidtransport, und ihre Auswirkungen auf die technischen und natürlichen Barrieren unter Lagerbedingungen zu untersuchen. Dafür sind auch Langzeitexperimente mit unterschiedlich komplexen Systemen erforderlich.

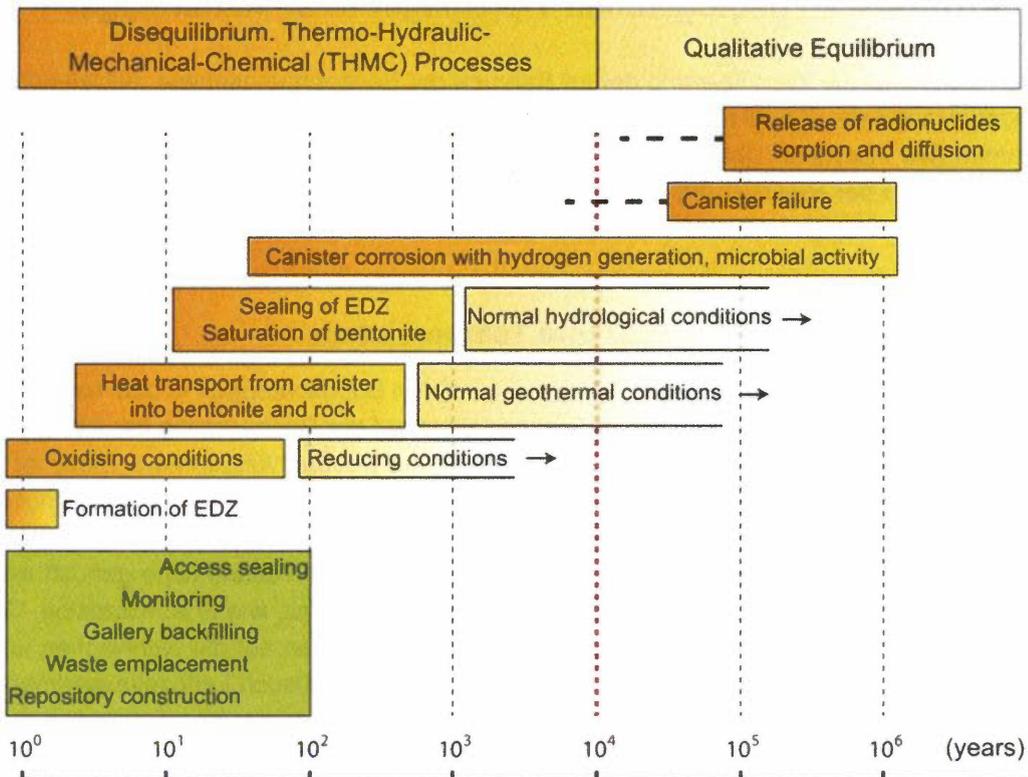
4.2 Systematischer Überblick über sicherheitsrelevante Prozesse im geologischen Tiefenlager für hochaktive Abfälle

Die Analyse der sicherheitsrelevanten Prozesse im geologischen Tiefenlager für hochaktive Abfälle (HAA) über den Betrachtungszeitraum von 1 Million Jahren basiert auf bereits vorliegenden Unterlagen und Daten. Dazu gehören phänomenologische Beschreibungen, die den Ausgangspunkt der Sicherheitsanalysen bilden und eine wertvolle Grundlage für die Evaluation der für das Pilotlager relevanten Phänomene darstellen. Sie beschreiben das Gesamtsystem, enthalten aber auch Beschreibungen zu Teilkomponenten (z. B. Abfälle, Behälter, Verfüllmaterial). Eine systematische Evaluation von Prozessen erfolgte z. B. in den FEP-Listen des Entsorgungsnachweises (NTB 02-23), im Pamina-Projekt (NAB 07-38), in Dokumenten bei der Erarbeitung der Indikatoren für SGT Etappe 1 (NTB 08-05) oder im technischen Bericht über «Relevante Prozesse & Parameter» (NTB 10-01). Zusätzlich wurden durch die Nagra Modellrechnungen durchgeführt (ENSI 33/189), welche die kurz-, mittel- und langfristigen Phasen des Tiefenlagers abdecken und sich mit der Temperaturentwicklung, der Aufsättigung/Veränderung des Wassergehalts, der Gasfreisetzung, der Entwicklung von Drücken und Spannungen, der Entwicklung der geochemischen Bedingungen und des Stofftransportes im Nahfeld und im Wirtgestein beschäftigen. Die Nagra weist darauf hin, dass die im Pilotlagerprojekt gezeigten Resultate auf überschlägigen Abschätzungen auf der Grundlage von generischen Lagerkonzepten basieren. Weitere Informationen dazu wurden im Rahmen des Vorschlags der Nagra für Etappe 2 präsentiert und können z. B. in NTB 12-01, NTB 14-11, NTB 14-13, NTB 14-14, NTB 16-03, NAB 16-07 und NAB 16-08 gefunden werden. Ergänzend dazu wird auf Daten und Ergebnisse aus Experimenten in Felslaboren zurückgegriffen. Dazu gehören z. B. Experimente zur Radionuklidrückhaltung/-transport, zum Einfluss von Zementporenwässern auf den Opalinuston, zur Gasfreisetzung, zur Versiegelung, zum Einfluss einer Temperaturerhöhung und zum Gebirgsverhalten. Untersuchungen und Modellierungen wurden für Abfälle, technische Barrieren sowie das Wirtgestein durchgeführt.



Klassifizierung:
Aktenzeichen/Referenz:
Titel:
Datum / Sachbearbeiter:

keine
33KRM.PIL / ENSI 33/809
Schlussbericht zum AGNEB-Projekt «Auslegung und Inventar des Pilotlagers»
24.05.2021 / [REDACTED]



Figur 4 Schematische Darstellung der sich in einem HAA-Lager verändernden Bedingungen über die Zeit (Bossart 2017). Die orangene Linie illustriert den Beginn der Radionuklidenausbreitung.

Der für HAA zu berücksichtigende Betrachtungszeitraum von 1 Million Jahren gliedert sich in eine transiente Phase, die etwa die ersten 10'000 Jahre in Anspruch nehmen wird, und in eine sich anschließende Gleichgewichtsphase. Die transiente Phase ist durch sich mit der Zeit verändernde und gegenseitig beeinflussende thermische, hydraulische, mechanische und chemische Prozesse gekennzeichnet. Dagegen spielen in der Gleichgewichtsphase im Wesentlichen nur noch chemische und hydraulische Prozesse unter sich gering verändernden Randbedingungen eine Rolle. Fig. 4 veranschaulicht die mögliche zeitliche Veränderung der Bedingungen in einem geologischen Tiefenlager für hochaktive Abfälle. Die basierend auf den erwähnten Unterlagen sowie von ENSI 33/172 abgeleitete phänomenologische Beschreibung der relevanten Prozesse für das HAA-Lager erfolgt für einzelne Zeitabschnitte des Betrachtungszeitraums.

0 – 20 Jahre:

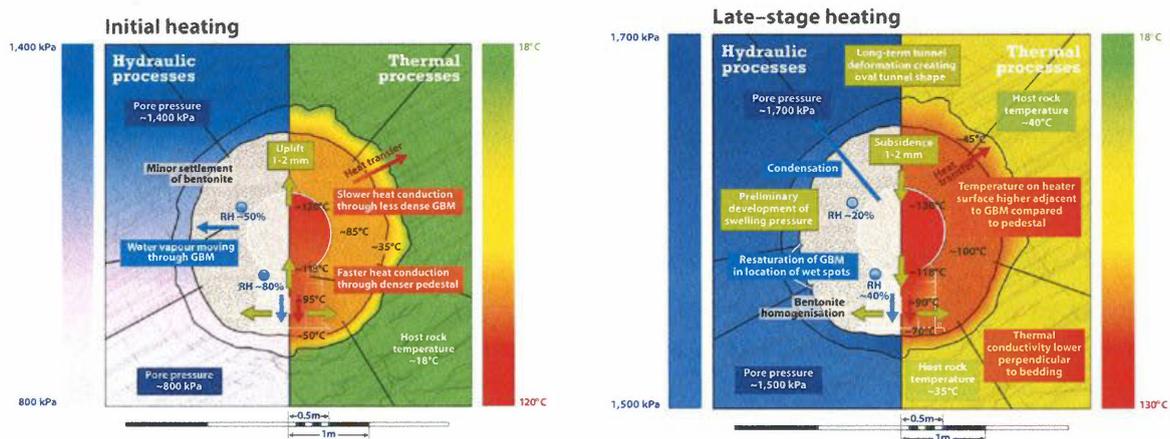
In den ersten 20 Jahren nach Betriebsaufnahme im Tiefenlager erfolgen laut Nagra der Ausbruch der Stollen, die Einlagerung des hochaktiven Abfalls und die Verfüllung sowie Versiegelung parallel (NTB 16-01). Für das Referenzprojekt des Entsorgungsnachweises geht die Nagra für das HAA-Lager von einer Lagertiefe von 650 m u. Terrain und einer Felstemperatur von 37 °C aus (NTB 01-04).

Durch Spannungsumlagerungen muss in dieser Tiefe je nach Spannungsverhältnissen, geomechanischen Gebirgseigenschaften und Ausbau mit einer Konvergenz der Stollen im Zentimeter- bis Dezimeterbereich gerechnet werden. Die Stollen bleiben für etwa 1-2 Jahre offen. Während dieser Zeit kann es zu einer Veränderung der Auflockerungszone (Excavation Damaged Zone, EDZ) kommen. Nach Einlagerung der Behälter werden die Lagerstollen umgehend verfüllt und versiegelt. Infolge Drainage



Klassifizierung: keine
Aktenzeichen/Referenz: 33KRM.PIL / ENSI 33/809
Titel: Schlussbericht zum AGNEB-Projekt «Auslegung und Inventar des Pilotlagers»
Datum / Sachbearbeiter: 24.05.2021

aufgrund der durch den Ausbruch verursachten Druckabsenkung kommt es in der Umgebung der Stollen zu einer gewissen Entsättigung. Die geochemischen Veränderungen der Geosphäre werden als vernachlässigbar angesehen. In dieser Phase kommt es nur zu einer geringen Behälterkorrosion wegen des geringen Wassergehaltes des Bentonits im Kontakt mit dem Behälter. Die Temperaturen im Bentonit steigen um die Behälter rasch an: Nach 3-5 Jahren werden an der Behälteroberfläche etwa 130 °C erreicht. Nach etwa 10 Jahren hat sich die Temperatur im Zentrum der Bentonitverfüllung (Hälfte der Distanz zwischen Behälter und Tunnelwand) auf etwa 90 bis 100 °C erhöht. Die Temperatur im Wirtgestein, einen halben Meter entfernt vom Bentonit, steigt nach etwa 20 Jahren um 35 bis 40 K auf ca. 75 °C. In der Mitte zwischen zwei Stollen (d. h. einer Distanz zum Stollen von 20 m) wird mit einer Temperaturerhöhung um 15 K, d. h. mit ca. 52 °C gerechnet. Dabei wird die Wärmeausbreitung stark von dem sich mit der Zeit verändernden Wassergehalt des Bentonits abhängig sein. Die folgende zeitliche Einordnung der relevanten Prozesse bezieht sich auf das Wirtgestein Opalinuston. Die geschilderten Prozesse werden im Felslabor Mont Terri mittels des vollmassstäblichen Langzeitexperiments Full-scale-Heizexperiment FE untersucht und mittels thermo-hydraulischen Modellierungen analysiert. Figur 5 stellt die dort gefundenen Veränderungen im Nahfeld der Heizelemente dar, die vom Prinzip her so auch im Tiefenlager erwartet werden.



Figur 5 Illustration der thermischen, hydraulischen und mechanischen Prozesse im Nahfeld eines Tiefenlagerbehälters basierend auf Daten des FE-Experiments für a) die ersten zwei Monate und b) nach etwa 18 Monaten (NTB 15-02).

20 – 100 Jahre:

Nachdem das Temperaturmaximum an der Behälteroberfläche schon nach wenigen Jahren erreicht wird, nimmt in dieser Phase die Temperatur an der Behälteroberfläche bei eingelagerten Brennelementen bereits wieder auf etwa 100 °C ab. Dazu trägt auch die höhere Wärmeleitfähigkeit durch die Aufsättigung des Bentonits bei (thermisch-hydraulisch-mechanisch [THM]-gekoppelte Prozesse). Damit einher gehen das Quellen des Bentonits sowie eine zunehmend auch anaerobe Behälter-Korrosion durch den Verbrauch des vorhandenen Sauerstoffs. Für die Aufsättigung des granularen Bentonits rechnet die Nagra mit einer Dauer von Dekaden bis mehrere 100 Jahre (NAB 09-25). Bei den Bentonitblöcken würde diese etwas schneller erfolgen (höherer initialer Wassergehalt in den Bentonit-Blöcken als im granularen Bentonit). Allerdings dauert die vollständige Aufsättigung um die Kanister herum sowie der Aufbau des Porendrucks im Bentonit-Nahfeld auf natürliche Werte (Formationsdruck) viele hunderte bis tausende von Jahren. Erhöhte Temperaturen im Bentonit nahe dem Behälter können zu schwacher Zementation führen und dadurch den Quelldruck etwas reduzieren. Die maximalen Temperaturen im



Klassifizierung:
Aktenzeichen/Referenz:
Titel:
Datum / Sachbearbeiter:

keine
33KRM.PIL / ENSI 33/809
Schlussbericht zum AGNEB-Projekt «Auslegung und Inventar des Pilotlagers»
24.05.2021 / [REDACTED]

Wirtgestein erreichen etwa 80 bis 90°C in direkter Umgebung der Stollen. Die langsame Aufsättigung, die erhöhten Temperaturen, die Spannungsumverteilung und durch den Ausbruch verursachte Klüfte führen zu Desintegration und zu beschleunigtem Kriechen des Opalinustons in der Auflockerungszone. Die Selbstabdichtung der Auflockerungszone beginnt aus Sicht der Nagra mit dem Einbringen der Stützmittel. Der Grossteil der Selbstabdichtung erfolgt in dieser frühen Phase (20 – 100 Jahre) durch die quellfähigen Tonminerale im Opalinuston, siehe NTB 14-03. Der Spritzbetonausbau der Stollen (falls vorhanden) wird durch die erhöhten Temperaturen und die Konvergenz rissig und die chemische Wechselwirkung zwischen dem Bentonit und dem Spritzbetonausbau beginnt.

100 – 1000 Jahre:

Im Zeitraum von 100 bis 1000 Jahre nach der Einlagerung fallen laut Nagra die Temperaturen im Bentonit von ca. 90 °C auf 70 °C (in der Umgebung der Behälter mit UO₂-Brennelementen) bzw. von ca. 130 °C auf 100 °C (in der Umgebung der Behälter mit MOX-Brennelementen). Die Konvergenz der Stollen nimmt ab (Annäherung an ein Gleichgewicht zwischen dem Quelldruck des Bentonits und der Spannung des umgebenden Gebirges). Durch das Quellen des Bentonits und die Konsolidierung des Stollens kommt es zu einer ausgeprägten Reduktion der Durchlässigkeit der Auflockerungszone. Die maximalen Temperaturen in der Mitte zwischen zwei Stollen erreichen ein Maximum von etwa 70 °C nach 300 Jahren. Die chemische Wechselwirkung zwischen Spritzbeton und Bentonit schreitet voran, wodurch es zu einer Reduktion der Porosität und zu einer lokalen Veränderung der Mineralogie kommt. Die durch die Temperaturen erhöhten Porenwasserdrücke im Wirtgestein erreichen ca. 5 MPa über den hydrostatischen Verhältnissen. Ausserdem setzt sich die anaerobe Korrosion von Stahl fort, verbunden mit der Bildung von Gas. Dieses kann sich anfänglich im Porenwasser lösen und durch Diffusion ausbreiten.

1000 – 10'000 Jahre:

Zwischen 1000 und 10'000 Jahren fallen die Temperaturen im Bentonit von etwa 70 °C auf 45 °C. Die Korrosion der Stahlbehälter schreitet voran (bis zu etwa 2 cm nach 10'000 Jahren gemäss NTB 12-06). Es wird angenommen, dass der Behälter dann nicht mehr vollständig dicht ist. Das Porenwasser im Nahfeld ist inzwischen mit H₂ gesättigt, das aus der Stahlkorrosion stammt. Der Gastransport erfolgt im Bentonit in Mikropfaden durch Zweiphasen-Fluss und durch Diffusion im Porenwasser. Der Gasdruck steigt. Die vollständige Aufsättigung des Lagers ist erreicht, womit sich ein pseudo-stationärer Zustand einstellt. Die Wechselwirkung zwischen Spritzbeton und Bentonit schreitet voran, wobei der Einflussbereich auf die Zentimeterskala beschränkt bleibt. Die Temperaturen 100 m oberhalb der Lagerstollen erreichen maximal ca. 55 – 60 °C.

10'000 – 1'000'000 Jahre:

Der Gasüberdruck erreicht sein Maximum von etwa 3 MPa. Nachdem der Behälter nicht mehr vollständig dicht ist, kann derjenige Teil des Inventars an ¹²⁹I, ¹⁴C und ³⁶Cl, der nicht in den Brennstofftabletten oder in den Hüllrohren fixiert ist, schnell freigesetzt werden (Annahme in den Modellrechnungen: Instantane Freisetzung nach Behälterversagen). Zwischen 10'000 Jahren und einer Million Jahre löst sich die Abfallmatrix auf. Die Freisetzung aus dem Behälter und der diffusive Radionuklidtransport durch den Bentonit beginnen somit erst bei quasistationären hydraulischen und thermischen Bedingungen (T ca. 40 °C). Es kommt infolge anhaltender Behälterkorrosion weiterhin zur H₂-Gasbildung und der Zweiphasen-Fluss des Gases hält an. Durch die Behälterkorrosion tritt eine Volumenzunahme auf, die zu einer zusätzlichen Kompaktion des Bentonits führt.



Klassifizierung:
Aktenzeichen/Referenz:
Titel:
Datum / Sachbearbeiter:

keine
33KRM.PIL / ENSI 33/809
Schlussbericht zum AGNEB-Projekt «Auslegung und Inventar des Pilotlagers»
24.05.2021 / [REDACTED]

4.3 Systematischer Überblick über sicherheitsrelevante Prozesse im geologischen Tiefenlager für schwach- und mittelaktive Abfälle

Die Analyse der sicherheitsrelevanten Prozesse im geologischen Tiefenlager für schwach- und mittelaktive Abfälle (SMA) erfolgt über den Betrachtungszeitraum von 100'000 Jahren. Im Vergleich zu hochaktiven Abfällen ist die Variabilität der Abfälle als auch der Abfallgebinde (z. B. lackiert, verzinkt) im SMA-Lager deutlich grösser als im HAA-Lager. Die im SMA-Lager auftretenden Prozesse sind im Wesentlichen die gleichen wie im HAA-Lager, wobei die radiogene Wärmeentwicklung im SMA-Lager deutlich geringer ist als im HAA-Lager und für die meisten Abfälle die Hydratation des Zements den wichtigsten Beitrag für die Temperaturerhöhung liefert. Im Gegensatz zum Tiefenlager für hochaktive Abfälle sind die Behälter für schwach- und mittelaktive Abfälle so auszulegen, dass die Rückholung bis zum Verschluss des Tiefenlagers gewährleistet ist. Ein dichter Einschluss der Radionuklide über 1000 Jahre ist nicht erforderlich. Die folgende zeitliche Einordnung der relevanten Prozesse bezieht sich auf das Wirtgestein Opalinuston. Die basierend auf den erwähnten Unterlagen in Kapitel 4.2 sowie von ENSI 33/189 abgeleitete phänomenologische Beschreibung der relevanten Prozesse für das HAA-Lager erfolgt für einzelne Zeitabschnitte des Betrachtungszeitraums.

0 – 20 Jahre:

In diesem Zeitraum erfolgt der Ausbruch der Lagerkammern, wodurch sich die Auflockerungszonen ausbilden. Die vertikale Konvergenz der Lagerkammern im Opalinuston beträgt im Falle einer Tiefenlage von 800 m mehrere 10er Zentimeter und im Falle einer Tiefenlage von 500 m etwas weniger. Nach dem Ausbruch der Lagerkammern schliesst sich die Einlagerung der SMA bzw. LMA an. Die Lagerkammern werden abschnittsweise verfüllt und versiegelt, wobei die Lagerkammern bis zu etwa 15 Jahre offenstehen können. In dieser Zeit kommt es zu einer teilweisen Entsättigung der Geosphäre, die durch die Ventilation in den offenen Lagerkammern verursacht wird. Gleichzeitig wird es zu einer weiteren Ausdehnung der Auflockerungszone kommen, was durch Konvergenz und eventuell auch durch jahreszeitlich bedingte Sättigungs- und Entsättigungszyklen verursacht wird. Geochemische Veränderungen der Geosphäre (Oxidation, pH-Fahne) sind vernachlässigbar bzw. auf einen Rand von wenigen Zentimetern beschränkt. Die oxischen und anoxischen Metallkorrosionsraten der Abfallgebinde der Abfallgruppe 1 sind relativ klein (Ausnahme: Korrosion von Al bzw. Zn), da der pH-Wert der Porenwässer durch die Verfüllung mit Zementmörtel hoch ist und die Aufsättigung erst beginnt. Korrosionsfördernd wirken sich allerdings die relativ hohe Luftfeuchtigkeit und das vorhandene Überschusswasser aus der Verfüllung mit Zementmörtel aus. In der Abfallgruppe 2 können höhere Korrosionsraten aufgrund der teilweise geringeren pH-Werte auftreten. Für die Betrachtung der Temperaturentwicklung werden zwei Fälle unterschieden: Der grösste Teil der Abfälle hat keine signifikante radiogene Wärmeentwicklung (Typ I). Bei einem geringeren Teil der Abfälle gibt es jedoch eine signifikante Zerfallswärme (Typ II), wobei für eine Abschätzung der Temperaturentwicklung abdeckend angenommen wurde, dass die betrachtete Lagerkammer ausschliesslich Abfälle des Typs II enthält. Die Berechnungen der Nagra ergeben, dass bei Abfällen vom Typ I eine kurzfristige Temperaturerhöhung in den Lagerkammern aufgrund der Hydratationswärme des Zements um maximal rund 40 K auftritt (NTB 14-14). Bei Abfällen des Typs II kann es aufgrund der Hydratationswärme und der Zerfallswärme zu einer Temperaturerhöhung um maximal rund 50 K kommen. Die Temperatur im Wirtgestein 1 m oberhalb der Lagerkammer steigt bei Abfällen des Typs I um bis zu 10 K und bei Abfällen des Typs II um bis zu 40 K.

20 – 100 Jahre:

In dieser Zeit beginnt die Aufsättigung der Lagerkammern. Diese verläuft allerdings deutlich langsamer als beim HAA-Lager. Derzeit rechnet die Nagra mit einem Zeitraum von 5000 – 10000 Jahren ohne Gasbildung für die Aufsättigung (NTB 14-14). Unter Berücksichtigung der Gasbildung ist damit zu



Klassifizierung: keine
Aktenzeichen/Referenz: 33KRM.PIL / ENSI 33/809
Titel: Schlussbericht zum AGNEB-Projekt «Auslegung und Inventar des Pilotlagers»
Datum / Sachbearbeiter: 24.05.2021 / [REDACTED]

rechnen, dass diese auch nach 100'000 Jahren noch nicht vollständig abgeschlossen ist. Der Grund für den deutlich längeren Zeitraum im Vergleich zum HAA-Lager ist im Wesentlichen das grosse zu füllende Porenvolumen, welches durch die geringe und langsame Nachlieferung aus dem Wirtgestein nur langsam gefüllt wird. Die geringere Saugspannung im Zement spielt dagegen kaum eine Rolle. Mit der Auf-sättigung kommt es zur lokalen Degradation des Zements und damit zur Ausbildung einer lokalen pH-Fahne (hohe pH-Werte). Lokal können zunächst oxische und später (nach Verbrauch des Luftsauerstoffs) anoxische Korrosion der Abfallgebinde auftreten. Wenn Feuchtigkeit in das Innere der Abfallgebinde eindringt, beginnen die Korrosion der metallischen Abfälle und die Degradation von in den Abfällen enthaltenen Organika. Dadurch kommt es zur Bildung von Gas und von Korrosionsprodukten. In der eindringenden Feuchtigkeit gehen auch Radionuklide teilweise in Lösung und es beginnt ein diffusiver und durch Sorption und Ausfällung beeinflusster Radionuklidtransport, der allerdings durch das entgegenwirkende, noch bestehende Druckgefälle lokal begrenzt bleibt. Die Temperatur im SMA-Lager nimmt ab. Bei der Modellierung der Abfälle des Typs I sinkt die Temperaturdifferenz zu den natürlichen Verhältnissen in den Lagerkammern nach 20 Jahren auf etwa 2 K, während sie bei Abfällen des Typs II auf etwa 30 K sinkt. Im Wirtgestein sinken die berechneten Temperaturdifferenzen auf weniger als 2 K (Abfälle Typ I) bzw. auf ca. 20 K (Abfälle Typ II) nach 20 Jahren (NTB 14-14).

100 – 1000 Jahre:

Die Aufsättigung, die Korrosion von Metallen und die Degradation von Organika sowie die Lösung und der Transport von Radionukliden schreiten voran. Zusätzlich baut sich langsam ein Gasdruck in den Lagerkammern auf. Der sich ausbildende Gasdruck verzögert die Aufsättigung des Nahfelds. Allerdings sinkt die Gasbildungsrate relativ schnell wieder, da am Anfang die Metalle mit hohen Korrosionsraten sowie die relativ dünnen Metalle der Behälter schnell korrodieren, während die massiven langsamer korrodierenden Metallteile übrigbleiben. Die Temperaturen in den Lagerkammern gleichen sich den ungestörten Verhältnissen an (NTB 14-14). Für Abfälle des Typs II sinkt die Temperaturdifferenz gegenüber der In-situ-Temperatur in den Lagerkammern auf etwa 6 K nach 100 Jahren bzw. auf etwa 4 K nach 1000 Jahren.

1000 – 10'000 Jahre:

Die vorher bereits erwähnten Prozesse laufen weiter und der Gasüberdruck erreicht sein Maximum nach etwa 10'000 Jahren. Dabei bleibt der Gasdruck aus Sicht der Nagra bei entsprechender Auslegung der Versiegelungsbauwerke und der Verfüllung der Zugangsbauwerke unterhalb des Wertes, ab dem die Bildung dilatanter Gastransportpfade einsetzt (NTB 14-14).

10'000 – 100'000 Jahre:

Die Gasbildungsrate nimmt um mehrere Zehnerpotenzen ab, da ein grosser Teil der Behälter bzw. Abfälle vollständig korrodiert bzw. degradiert ist. Der Gasdruck sinkt und der Porenwasserdruck gleicht sich sukzessive an die hydrostatischen Bedingungen an. Durch die Interaktion der Hoch-pH-Fahne mit dem Wirtgestein und den Sand/Bentonit-Versiegelungen kommt es zu geochemischen Veränderungen.

4.4 Identifikation der im Pilotlager auftretenden Prozesse

Nach der generellen Analyse der sicherheitsrelevanten Prozesse in den einzelnen Lagertypen geht es darum, die während der Beobachtungsphase von einigen Dekaden im Pilotlager auftretenden Prozesse zu identifizieren. Die Länge der Beobachtungsphase ist im Gesetz nicht festgelegt und wird mit der Entscheidung zum Verschluss des Tiefenlagers, basierend unter anderem auf Daten aus der Überwachung des Pilotlagers und auf den Untersuchungen aus den Testbereichen, abgeschlossen. Die Länge der Beobachtungsphase sollte zwischen dem Vorteil der langen Überwachung der Abfälle im Pilotlager



Klassifizierung: keine
Aktenzeichen/Referenz: 33KRM.PIL / ENSI 33/809
Titel: Schlussbericht zum AGNEB-Projekt «Auslegung und Inventar des Pilotlagers»
Datum / Sachbearbeiter: 24.05.2021 / [REDACTED]

und der wachsenden Gefahr einer möglichen negativen Beeinflussung der Langzeitsicherheit durch das Offenhalten der Anlage abwägen. Beispielhaft kann die Langzeitsicherheit durch eine nachlassende Stabilität der Zugangsbauwerke (und der Möglichkeit eines Wassereintruchs), durch Naturgefahren (Überflutung des Schachtkopfbereichs, Erdbeben, etc.) oder durch gesellschaftliche Entwicklungen (kein oder kein ordnungsgemässer Verschluss der Zugangsbauwerke) beeinträchtigt werden (ENSI 33/698).

Bevor Abfälle in das Hauptlager eingelagert werden, wird das Pilotlager bestückt. So können die Abfälle im Pilotlager bereits während der Einlagerung der Abfälle ins Hauptlager beobachtet werden. Bereits im Entsorgungsprogramm 2008 (NTB 08-01) wird eine Betriebsphase von 15 – 30 Jahren angenommen. Gemäss Art. 68 Kernenergieverordnung wird die Dauer der Beobachtungsphase erst nach Abschluss der Einlagerung der Abfälle festgelegt. Für Planungszwecke wird gemäss Art. 3 SEFV in den Kostenstudien und damit auch im Entsorgungsprogramm von 50 Jahren ausgegangen. Damit wäre die Überwachung des Pilotlagers tatsächlich über etwa 70 Jahre möglich. Zusätzlich könnten aus den Testbereichen über einen Zeitraum von etwa 100 Jahren Beobachtungen zur Verfügung stehen (unter der Annahme, dass die Untersuchungen in den EUU direkt in die Testbereiche überführt werden). Für die Auswahl der während der Beobachtungszeit auftretenden Prozesse im Pilotlager wird für die folgende Diskussion ein Zeitraum von maximal 100 Jahren angenommen. Ausserdem wird diskutiert, inwieweit eine Verlängerung um weitere 50 Jahre den Umfang der Prozesse erweitern könnte. Prozesse, die innerhalb dieses Zeitfensters auftreten, werden als relevant für das Pilotlager eingestuft. Die tatsächliche messtechnische Erfassbarkeit der prozessrelevanten Parameter wird nur bedingt berücksichtigt, da es hier um die generelle Diskussion der Prozesse im Pilotlager und der Wahl einer geeigneten Dauer für die Beobachtungsphase geht. Ausserdem könnten zukünftige technische Entwicklungen die Überwachungsmöglichkeiten deutlich verbessern.

Im Pilotlager sind Bedingungen zu schaffen, die möglichst ähnlich zu denen im Hauptlager sind. Gleichzeitig muss die messtechnische Überwachung gewährleistet sein. Für die Auswahl der relevanten Prozesse im Pilotlager ist zu berücksichtigen, dass die zeitlichen Veränderungen im Nahfeld im Vergleich zur Länge der Beobachtungsphase sehr langsam ablaufen. Die Entwicklung der In-situ-Bedingungen wird vor allem durch hydrogeologische (Verlauf der Aufsättigung), geochemische, thermische (Wärmeausbreitung) und geomechanische (Spannungsumlagerung, Deformation) Prozesse beeinflusst. Der Fokus liegt auf Prozessen, die direkt oder indirekt relevant für die Entwicklung des Tiefenlagers in dessen Anfangszeit sind. Dabei spielt auch eine Rolle, ob sie zuverlässig gemessen werden können. Die Umsetzbarkeit bzw. Zuverlässigkeit von Messungen hängt beispielsweise davon ab, wann ein Phänomen auftritt, was die Sensoren messen, wie heterogen die Signale sind, wie sie sich mit der Zeit verändern, welche Messbereiche abgedeckt werden und wie genau die Messungen sind bzw. sein müssen. Die Relevanz eines Prozesses für das Pilotlager leitet sich aus Sicherheitsbetrachtungen (phänomenologische Beschreibung der Entwicklung des Lagers, Modellrechnungen, Sensitivitätsanalysen) ab, wobei durch Quervergleiche mit unabhängig erstellten FEP-Listen sichergestellt wird, dass alle relevanten Prozesse berücksichtigt werden.

Aus diesen Überlegungen heraus entsteht für das **HAA-Pilotlager** eine Liste der auftretenden Prozesse während der Beobachtungszeit von einigen Dekaden, die für eine Beobachtung berücksichtigt werden könnten (ENSI 33/172):

- die Veränderung der Auflockerungszone, die Konsolidierung des Gebirges und die Konvergenz der Lagerstollen;



Klassifizierung:
Aktenzeichen/Referenz:
Titel:
Datum / Sachbearbeiter:

keine
33KRM.PIL / ENSI 33/809
Schlussbericht zum AGNEB-Projekt «Auslegung und Inventar des Pilotlagers»
24.05.2021 / [REDACTED]

- den Wärmeeintrag, die Temperaturentstreuung und den Einfluss der Temperatur auf das Materialverhalten von Bentonit und Wirtgestein sowie die Entwicklung des Porenwasserdrucks und der Deformation;
- die Ent- und Wiederaufsättigung sowie den Einfluss des Wassergehalts auf den Stofftransport, die Temperatur, die Gasbildung, den Gastransport und auf die Chemie;
- das Quellen des Bentonits inklusive der Auswirkungen auf die Auflockerungszone;
- die Korrosion der Behälter; sowie
- die Gasbildung.

Im verfügbaren Zeitraum im HAA-Pilotlager voraussichtlich nicht oder kaum auftretende Prozesse sind

- das Behälterversagen, die Volumenzunahme durch Korrosionsprodukte sowie die Lösung der Korrosionsprodukte;
- der Gastransport;
- die geochemischen Veränderungen;
- die Auflösung der Abfallmatrix;
- alle Prozesse im Zusammenhang mit dem Radionuklidtransport.

Die Liste der auftretenden Prozesse im **SMA-Lager** während der Beobachtungszeit von einigen Dekaden, die für eine Beobachtung berücksichtigt werden könnten (ENSI 33/189):

- die Konvergenz der Lagerkavernen;
- den Wärmeeintrag (insbesondere als Folge des Abbindens des Zementmörtels) sowie die Temperaturentstreuung im Nahfeld;
- die Entsättigung und Wiederaufsättigung;
- die Freisetzung von Tritium.

Im verfügbaren Zeitraum beim SMA-Lager voraussichtlich nicht oder kaum auftretende Prozesse sind

- das Quellen des Bentonits in der Versiegelung (inklusive Selbstabdichtung);
- die Gasbildung durch Metallkorrosion und durch Degradation organischer Materialien;
- der Gastransport;
- alle Prozesse im Zusammenhang mit dem Radionuklidtransport;
- die Korrosion der Metalle;
- die geochemischen Veränderungen.

Die Temperaturentstreuung und der Porenwasserdruck stellen ausgeprägte und relativ gut beobachtbare Prozesse dar. Dagegen stellt sich für die Spannungsumlagerungen derzeit die Frage, wie (genau) diese gemessen werden könnten.

Gemäss der Richtlinie ENSI-G03 muss die Nagra ein integrales Überwachungskonzept für das Tiefenlager und damit auch für das Pilotlager entwickeln und vorschlagen. Darin wird die Nagra erläutern, welche Prozesse aus ihrer Sicht relevant sind. Welche Parameter beobachtet werden, wird im Überwachungsprogramm von der Nagra festgelegt. Dieses Überwachungskonzept sowie das Überwachungs-



Klassifizierung: keine
Aktenzeichen/Referenz: 33KRM.PIL / ENSI 33/809
Titel: Schlussbericht zum AGNEB-Projekt «Auslegung und Inventar des Pilotlagers»
Datum / Sachbearbeiter: 24.05.2021 / [REDACTED]

programm werden vom ENSI geprüft und beurteilt. Das erste integrale Überwachungskonzept ist mit dem Rahmenbewilligungsgesuch einzureichen (ENSI 33/649).

Mit einer um 50 Jahre verlängerten Beobachtungsphase kann basierend auf den Angaben in Kapitel 4.2) bezüglich der Wärmeausbreitung nur ein geringer zusätzlicher Erkenntnisgewinn erreicht werden, da das Absinken der Temperatur etwas länger verfolgt werden kann. Für die Aufsättigung im HAA-Lager gilt das gleiche. Hierfür wird mit einem Zeitraum von Dekaden bis mehreren Hundert Jahren gerechnet (Kapitel 4.2). Durch Verlängerung der Beobachtungszeit könnte gegebenenfalls der Anstieg der Wassersättigung etwas länger beobachtet werden, während die Angleichung des Porenwasserdrucks mehrere Hundert Jahre benötigt (Kapitel 4.2). Im Fall des SMA-Lagers läuft die Aufsättigung noch deutlich langsamer ab. Die Gasbildung durch Korrosion der Tiefenlagerbehälter beginnt im HAA-Lager vermutlich nach etwa 50 – 100 Jahren. Jedoch sind die Korrosionsraten relativ klein (Kapitel 4.3). Daher geht man davon aus, dass eine Verlängerung um 50 Jahre kaum einen zusätzlichen Erkenntnisgewinn ermöglichen würde. Stattdessen wären vermutlich Beobachtungen über mehrere hundert Jahre nötig. Bezüglich der Deformation sind die Lagerstollenkonvergenz, die Gebirgskonsolidierung und das Bentonitquellen im relevanten Zeitraum von etwa 70 Jahren beobachtbar. Auch dafür ist durch eine Verlängerung kaum ein zusätzlicher Erkenntnisgewinn zu erwarten. Damit kann geschlussfolgert werden, dass erst bei einer Verlängerung um mehrere Hundert Jahre ein signifikanter zusätzlicher Erkenntnisgewinn möglich wäre. Dies geht aber mit einer potenziellen Gefährdung der Langzeitsicherheit einher, wie es auch in dem Expertenbericht ENSI 33/698 erläutert wird.

4.5 Identifikation von Prozessen, die in den Testbereichen untersucht werden können

Die Aufgabe der erdwissenschaftlichen Untersuchungen Untertags sowie der Testbereiche ist es, sicherheitsrelevante Eigenschaften des Wirtgesteins und der technischen Barrieren zur Erhärtung des Sicherheitsnachweises standortspezifisch vertieft abzuklären (Art. 65 KEV). So können Daten zur Felsmechanik, zur Versiegelung, zur Korrosion, zum Einfluss der erhöhten Temperatur, zum Radionuklidtransport sowie zu Gasbildung und Gastransport ermittelt werden. Derzeit werden in den Felslaboren Mont Terri und Grimsel verschiedene Untersuchungen und Experimente (z. B. Full Scale Emplacement Experiment NTB 15-02) geplant bzw. durchgeführt. Ähnliche Experimente, insbesondere auch Langzeitexperimente mit unterschiedlich komplexen Systemen, können zukünftig auch in den Testbereichen an den gewählten Standorten für das Tiefenlager durchgeführt werden. Im Hinblick auf die Langzeitexperimente ist daher zu prüfen, ob ausgewählte Experimente in den Testbereichen etwa gleich lang wie das Pilotlager durchgeführt werden sollten, um vor dem Verschluss einen möglichst umfangreichen Datensatz zu den für die Langzeitsicherheit relevanten Prozessen zu sammeln.

4.6 Berücksichtigung unerwarteter Entwicklungen im Pilotlagers

Vor dem Bau des Pilotlagers muss der Betreiber dokumentieren, wie sich die Bedingungen im Lagerbereich im Verlauf des Betrachtungszeitraums von 100'000 Jahren (SMA) bzw. 1'000'000 Jahren (HAA) entwickeln werden. Die Überwachung im Pilotlager orientiert sich an dieser, in den Kapiteln 4.2 und 4.3 skizzierten Entwicklung für den erwarteten Beobachtungszeitraum. Daher können Überwachungssysteme installiert werden, welche insbesondere die während der Beobachtungsphase erwartete oder wahrscheinlich eintretende Entwicklung (z. B. der Anstieg des Porenwasserdrucks oder der Temperatur) beobachten. Die Messwerte dienen dazu, modellbasierte Prognosen zu überprüfen. Das Überwachungssystem soll jedoch auch bei unerwarteten Entwicklungen im Pilotlager frühzeitig Informationen



Klassifizierung: keine
Aktenzeichen/Referenz: 33KRM.PIL / ENSI 33/809
Titel: Schlussbericht zum AGNEB-Projekt «Auslegung und Inventar des Pilotlagers»
Datum / Sachbearbeiter: 24.05.2021 / [REDACTED]

liefern. Daher könnte das Spektrum an gemessenen Parametern im Pilotlager grösser sein, als es sich aus realistischen Modellprognosen ergibt.

Unerwartete Entwicklungen können z. B. entstehen, weil Eigenschaften des Pilotlagers und die daraus abgeleiteten Parameter für die Modelle nicht den Annahmen entsprechen. Betroffene Elemente könnten z. B. die direkte geologische Umgebung des Lagerstollens, die Auflockerungszone oder der Bentonit sein.

Bereits im Überwachungskonzept für das Pilotlager ist es notwendig, unerwartete Ereignisse und Entwicklungen in geeigneter Form zu berücksichtigen (z. B. IAEA 2014a). Dabei geht es insbesondere um Ereignisse, die zwar aufgrund der begrenzten Beobachtungsphase im Pilotlager als nicht beobachtbar während dessen Betriebs eingeordnet sind (z. B. auf Grund ihres prognostizierten späteren zeitlichen Auftretens), deren früheres Eintreten aber eine Überprüfung der Funktionstüchtigkeit der technischen Barrieren erforderlich machen würde. Für die Überwachung unerwarteter Entwicklungen im Pilotlager kann mit dem Überwachungskonzept eine Auswahl von Überwachungsindikatoren vorgeschlagen werden, die, soweit technisch möglich, beobachtet werden können. Dazu könnten aus Sicht des ENSI z. B. die Temperatur, die Radionuklidkonzentration, der Porenwasserdruck und die Wassersättigung gehören. Die Identifikation unerwarteter Entwicklungen basiert auf dem Vergleich der Beobachtungsergebnisse mit vorher definierten, auf Erwartungswerten und ihren Ungewissheiten beruhenden Wertebereichen. Die Herausforderung liegt in der Unterscheidung zwischen einer relevanten unerwarteten Entwicklung und einer Abweichung vom Erwartungswert ohne tatsächliche negative Auswirkung auf die Langzeitsicherheit. Letztere könnte z. B. durch eine Beschleunigung/Verzögerung eines Prozesses oder durch die Annahme eines unrealistischen Materialparameters im Modell verursacht werden.

Das Überwachungskonzept bzw. -programm sollte bezüglich unerwarteter Entwicklung durch Regeln für den Umgang mit beobachteten Abweichungen ergänzt werden (ENSI 33/808). Ausserdem ist ein Vorgehen erforderlich, um auf den vorliegenden Messdaten basierende Rückschlüsse auf das Systemverhalten zu ziehen.

4.7 Überwachung: Überblick über den aktuellen Stand von Messmethoden

Das ENSI kommt in seinem Bericht zum Monitoring (ENSI 33/412) zum Schluss, dass mit dem MoDeRn-Projekt (MoDeRn 2014) konzeptuelle Grundlagen und Strategien zur Überwachung eines geologischen Tiefenlagers systematisch und umfassend erarbeitet und die heute vorliegenden technischen Möglichkeiten breit aufgezeigt wurden. Neue technische Methoden wurden anhand von Demonstrationsexperimenten entwickelt und ihre Anwendung für die Überwachung an Fallbeispielen erprobt und getestet. Im Vordergrund der Methodenentwicklung stehen vor allem kabellose Messsysteme, die ihre Daten mit Hilfe von elektromagnetischen Wellen übermitteln, zerstörungsfreie geophysikalische Abbildungsmethoden (seismische oder geoelektrische Tomographie) und die Glasfasertechnologie. Die Ergebnisse zeigen, dass eine zuverlässige Überwachung eines geologischen Tiefenlagers über einigen Dekaden mit einer Vielzahl verschiedener, redundant und diversitär ausgelegter Messsysteme grundsätzlich möglich ist. Das MoDeRn-Projekt hat auch die Grenzen heutiger Technologien und den Bedarf weiterer Forschungs- und Entwicklungsarbeiten aufgezeigt. Dies betrifft u. a. eine Verbesserung der Reichweite drahtloser Datenübertragungen, eine Verbesserung der Auflösung geophysikalischer Überwachungstechniken und der Auswertungsmethoden sowie eine Entwicklung drahtloser Energieübertragung zur Energieversorgung kabelloser Messsysteme.



Klassifizierung: keine
Aktenzeichen/Referenz: 33KRM.PIL / ENSI 33/809
Titel: Schlussbericht zum AGNEB-Projekt «Auslegung und Inventar des Pilotlagers»
Datum / Sachbearbeiter: 24.05.2021 / [REDACTED]

Die Erfahrungen mit der Überwachung von Experimenten in den verschiedenen Felslaboren erlauben Rückschlüsse über das Langzeitverhalten der verschiedenen Messsysteme, die bei der Überwachung der im geologischen Tiefenlager ablaufenden Prozesse und Parameter eingesetzt werden. Während der Bauphase des Tiefenlagers sind es hydraulisch-mechanisch gekoppelte Prozesse, induziert durch die durch den Bau hervorgerufenen Spannungsumlagerungen im Gebirge und dadurch gebildete Auflockerungszone (EDZ) um den Hohlraum herum. Mit Beginn der Einlagerung der Abfälle und dem Verschluss und Versiegelung der Lagerstollen werden der Wärmeeintrag der HAA-Abfälle (simuliert durch Heizelemente) und damit thermo-hydro-mechanisch-chemisch gekoppelte Prozesse wirksam. Für die Überwachung relevante Parameter sind zum Beispiel die Temperatur, der Porenwasserdruck und die Wassersättigung. Eine möglichst hohe Langzeitstabilität kann durch eine diversitäre und redundante Auslegung der Messsysteme erreicht werden. Derzeit erfolgt eine intensive Weiterentwicklung relevanter Technologien für die Überwachung, die das ENSI weiter verfolgen wird (ENSI 33/808).

Auch aus den Langzeitexperimenten in Mont Terri können Schlussfolgerungen gezogen werden. Für vor Ort eingebaute, sogenannte «verlorene» Sensoren, sind kein Unterhalt oder Ersatz möglich. Sie sind der Korrosion ausgesetzt und sollten daher vollständig versiegelt eingebaut werden. Bezüglich der Sensorausfälle zeigte sich folgendes Bild. Im Felslabor Mont Terri sind viele Drucksensoren extern installiert (ENSI 33/189). Diese funktionieren zu 99 % über mindestens 10 Jahre und können relativ einfach ausgetauscht werden. Für Ausfälle von eingebauten Sensoren ist häufig der Übergang vom Sensor zum Kabel kritisch. So waren Kupfer-Nickel-legierte Kabelüberzüge bereits nach 5 Jahren beinahe vollständig korrodiert. Ein an die In-situ-Bedingungen angepasster Schutz ist daher notwendig. Ausserdem hat sich bei den bisherigen Experimenten generell gezeigt, dass eine schlechte Ankopplung, undichte Intervalle und defekte Strom- und Datenkabel häufiger die Ursache für den Sensorausfall sind als Sensordefekte selbst. Die bisherigen Erfahrungen mit verschiedenen Sensoren zeigen, dass eine Messwertdrift bei Temperatursensoren nur eine untergeordnete Rolle spielt. Drucksensoren können hingegen bei hohem Druck (>25 bar) eine Messwertdrift aufweisen. Für die Glasfasertechnologie gibt es im Felslabor Mont Terri noch keine umfangreichen Erfahrungen. Im MO- und vor allem im neuen FE-Experiment wurde eine grosse Anzahl solcher Sensoren installiert. Eventuell können diese auch Informationen zu etwaigen Artefakten, z. B. die Beeinflussung der Prozesse durch Sensoren und deren Zuleitungen liefern. Wie Beispiele aus anderen Anwendungsgebieten zeigen (z. B. Überwachung von Staudämmen, Strassen- und Eisenbahnbauwerken oder anderen Infrastrukturanlagen) können Glasfasersensoren über einige Dekaden funktionieren.

4.8 Fazit

Im Pilotlager wird das Verhalten der Abfälle, der Verfüllung und des Wirtgesteins bis zum Ablauf der Beobachtungsphase überwacht. Bei der Überwachung sind im Hinblick auf den Verschluss Daten zur Erhärtung des Sicherheitsnachweises zu ermitteln. Die ermittelten Ergebnisse der Überwachung dienen auch der Information der Öffentlichkeit über die Entwicklung des Pilotlagers und können genutzt werden, um allfällige unerwartete Entwicklungen zu identifizieren. In den Testbereichen geht es darum, die sicherheitsrelevanten Eigenschaften des Wirtgesteins und der technischen Barrieren zur Erhärtung des Sicherheitsnachweises standortspezifisch vertieft abzuklären, um sicherheitsrelevante Techniken zu erproben und deren Funktionstüchtigkeit nachzuweisen. Dazu sind auch Langzeitexperimente mit unterschiedlich komplexen Systemen erforderlich.

Mit dem Pilotlager wird das Verhalten des Gesamtsystems aus technischen und natürlichen Barrieren sowie des radioaktiven Abfalls überwacht. Dabei ist die Überwachung auf Grund der begrenzten Beobachtungszeit auf die Anfangsphase des Tiefenlagers beschränkt. Die im Pilotlager auftretenden



Klassifizierung:
Aktenzeichen/Referenz:
Titel:
Datum / Sachbearbeiter:

keine
33KRM.PIL / ENSI 33/809
Schlussbericht zum AGNEB-Projekt «Auslegung und Inventar des Pilotlagers»
24.05.2021 / [REDACTED]

Prozesse während der Beobachtungszeit von einigen Dekaden, die für eine Beobachtung berücksichtigt werden könnten, umfassen den Wärmeeintrag und die Wärmeausbreitung in den technischen Barrieren und im Wirtgestein (HAA), die Entsättigung und Wiederaufsättigung, den Anstieg des Porenwasserdrucks (HAA), die Veränderung der Auflockerungszone, die Konvergenz der Lagerstollen, die Spannungsveränderungen, die Gasbildung sowie das Selbstabdichtungsverhalten der EDZ und des Bentonits. Im verfügbaren Zeitraum voraussichtlich nicht oder kaum auftreten werden der Gastransport in den technischen und natürlichen Barrieren, das Behälterversagen, die mit dem Behälterversagen einhergehende Freisetzung von Radionukliden und deren Transport sowie die Entwicklung der geochemischen Bedingungen.

Im Überwachungskonzept für das Pilotlager ist es notwendig, unerwartete Ereignisse und Entwicklungen in geeigneter Form zu berücksichtigen. Dabei geht es insbesondere um Ereignisse, die zwar aufgrund der begrenzten Beobachtungsphase im Pilotlager als nicht beobachtbar während dessen Betriebs eingeordnet sind (z. B. auf Grund ihres prognostizierten späteren zeitlichen Auftretens), deren früheres Eintreten aber eine Überprüfung der Funktionstüchtigkeit der technischen Barrieren erforderlich machen würde. Für die Überwachung unerwarteter Entwicklungen im Pilotlager kann mit dem Überwachungsprogramm eine Auswahl von Überwachungsindikatoren vorgeschlagen werden, die, soweit technisch möglich, gemessen werden können. Dazu könnten aus Sicht des ENSI z. B. die Temperatur, die Radionuklidkonzentration, der Porenwasserdruck und die Wassersättigung gehören. Das integrale Überwachungskonzept sollte bezüglich unerwarteter Entwicklung durch Regeln für den Umgang mit beobachteten Abweichungen ergänzt werden.

Die Testbereiche bieten die Möglichkeit, die für die Langzeitsicherheit relevanten Prozesse am Standort vertieft zu untersuchen. Mit den dort durchgeführten Experimenten können alle zeitlichen Entwicklungsphasen des Tiefenlagers berücksichtigt werden. Dabei muss nicht zwangsweise das Gesamtsystem, sondern es kann das Verhalten einzelner Komponenten des Tiefenlagers betrachtet werden. Damit ergänzen sich die Erkenntnisse aus der Überwachung des Pilotlagers und den Beobachtungen in Testbereichen. Es ist daher zu prüfen, ob ausgewählte Experimente in den Testbereichen etwa gleich lang wie das Pilotlager durchgeführt werden sollten, um vor dem Verschluss einen möglichst umfangreichen Datensatz zu den für die Langzeitsicherheit relevanten Prozessen zu sammeln.

Gemäss Art. 68 Kernenergieverordnung wird die Dauer der Beobachtungsphase erst nach Abschluss der Einlagerung der Abfälle festgelegt. Für Planungszwecke wird gemäss Art. 3 SEFV in den Kostenstudien von 50 Jahren ausgegangen, bevor der Verschluss des Tiefenlagers erfolgt. Bei einer Beobachtungsphase dieser Länge können im Pilotlager über 70 Jahre Daten gewonnen werden. Erst bei einer Verlängerung um mehrere Hundert Jahre wäre theoretisch ein signifikanter zusätzlicher Erkenntnisgewinn möglich, der aber mit einer potenziellen Gefährdung der Langzeitsicherheit einhergehen, wie es auch in dem Expertenbericht ENSI 33/698 erläutert wird.

Bis zum Abschluss von Etappe 3 (voraussichtlich etwa 2029) sind die Bestimmungen der Richtlinie ENSI-G03 ausreichend für die weiteren Planungsschritte der Nagra. Ergänzungen wurden im Erläuterungsbericht der Richtlinie ENSI-G03 hinsichtlich der Informationen der Öffentlichkeit vorgenommen. Im Zuge der weiteren Arbeiten am Tiefenlager kann sich ein Handlungsbedarf herauskristalisieren, der zum gegebenen Zeitpunkt entsprechend aufgegriffen wird. Anlass dazu kann z. B. die Überprüfung des integralen Überwachungskonzepts oder das alle 5 Jahre einzureichende Entsorgungsprogramm bieten, in dem Zwischenschritte der Weiterentwicklung des Tiefenlagerkonzepts dokumentiert werden.



Klassifizierung:	keine
Aktenzeichen/Referenz:	33KRM.PIL / ENSI 33/809
Titel:	Schlussbericht zum AGNEB-Projekt «Auslegung und Inventar des Pilotlagers»
Datum / Sachbearbeiter:	24.05.2021 / [REDACTED]

5 Auslegung des Pilotlagers

Für die Auslegung des Pilotlagers sind seine Anordnung im Verhältnis zum Hauptlager, die gewählte Geometrie und das Inventar relevante Grössen. Auf das Inventar des Pilotlagers wird in Kapitel 6 eingegangen, in diesem Kapitel soll die Anordnung und Geometrie des Pilotlagers diskutiert werden.

5.1 Einflussfaktoren für die Anordnung in Bezug zum Hauptlager

Für die Platzierung des Pilotlagers muss zwischen zwei gegensätzlichen Zielen abgewogen werden. Ein Ziel ist die Gewährleistung der Übertragbarkeit der Entwicklung im Pilotlager auf das Hauptlager. Die dafür erforderlichen repräsentativen Bedingungen im Pilotlager werden durch eine möglichst geringe Distanz zwischen Pilotlager und Hauptlager begünstigt. Andererseits soll eine negative Beeinflussung des Hauptlagers durch Entwicklungen im Pilotlager vermieden werden. Ausserdem sollten die Prozesse im Pilotlager möglichst wenig durch Störfaktoren, die aus Vorgängen im Hauptlager resultieren, beeinflusst werden, um die Interpretation der Messwerte nicht zu erschweren. Dafür wäre eine eher grössere Distanz vorteilhaft.

Die Langzeitsicherheit des Pilotlagers wird durch den Verschluss der Lagerkammern des Pilotlagers unmittelbar nach Einlagerung der Abfälle, durch den Verschluss des Zugangs zum Pilotlager und durch die räumliche Trennung des Kontrollstollens ohne direkte Verbindung zum Pilotlager gewährleistet. Die Störeinflüsse durch Untertagebauwerke sind aus Sicht der Nagra bezüglich des Wassergehalts relativ klein (ENSI 33/200), da die Veränderung der Wassersättigung ein lokales Phänomen auf der Meterskala um den Stollenrand ist und zur Vermeidung der Beeinflussung der Wassersättigung durch benachbarte Stollen ein geringer Abstand genügen würde. Hinsichtlich des Wärmesignals ergeben sich langfristig grössere Einflussbereiche. Berechnungen der Nagra zeigen, dass die Temperaturen nach einer gewissen Zeit am Rand des Hauptlagers um bis zu 20 K niedriger sind als im Inneren (NAB 09-25). Erst etwa der 4. Lagerstollen (vom Rand gezählt) kann hinsichtlich der Temperaturentwicklung als repräsentativ angesehen werden. Damit würden die in einem HAA-Pilotlager gegenwärtig geplanten 3 parallelen Lagerstollen (Fig. 1) nicht die im Hauptlager repräsentativen Temperaturen erreichen. Eine geringere Distanz zwischen den Lagerstollen im Pilotlager könnte zu vergleichbaren Temperaturen führen. Allerdings könnte dies mit Nachteilen aus der baubedingten Beeinflussung verbunden sein. Ausserdem stellt sich die Frage, wie wichtig die Repräsentativität der absoluten Temperatur ist, da die steilen Temperaturgradienten im Bereich von wenigen Metern Entfernung von den Stollenwänden liegen und diese eher relevant sein könnten als die exakte Widerspiegelung der absoluten Temperaturwerte. Erfahrungen aus dem belgischen Konzept mit grösseren Abständen zwischen den Lagerstollen zeigen, dass sich benachbarte Galerien kaum während der Zeit der ansteigenden Temperaturen beeinflussen. Allerdings haben sie signifikanten Einfluss auf die langfristige Temperaturabnahme.

Für die Änderung der Porenwasserdrücke gilt, dass diese sich wie die Temperatur ausbreiten. Sie stellen somit ebenfalls kein lokales Phänomen dar. Durch das Auffahren der Stollen bzw. Kavernen im Hauptlager kommt es zur Ausbildung einer Zone mit niedrigeren Porenwasserdrücken. Diese entsteht auch beim Auffahren des Pilotlagers, jedoch wird diese Zone dort aufgrund der begrenzten Anzahl an Lagerkavernen und der geringeren Länge weniger stark ausgeprägt sein. Die Ausdehnung der Porenwasserdruckänderung beeinflusst den Verlauf der Wiederaufsättigung. Eine geringe Distanz zwischen Pilot- und Hauptlager wäre daher vorteilhaft für die Repräsentativität der Bedingungen. Andererseits würde bei einer geringen Distanz der Bau des Hauptlagers die Porenwasserdruckmessungen im Pilotlager beeinflussen. Eventuell wären auch mechanische Einflüsse z. B. durch den Ausbruch von



Klassifizierung:
Aktenzeichen/Referenz:
Titel:
Datum / Sachbearbeiter:

keine
33KRM.PIL / ENSI 33/809
Schlussbericht zum AGNEB-Projekt «Auslegung und Inventar des Pilotlagers»
24.05.2021 / [REDACTED]

Lagerstollen oder in Folge der Erwärmung nach Einlagerung der HAA-Tiefenlagerbehälter im Hauptlager beobachtbar. Dies würde die Interpretation der im Pilotlager gesammelten Messwerte beeinträchtigen.

Unter Berücksichtigung der gesetzlichen Vorgaben sollte eine Distanz des Pilotlagers zum Hauptlager gewählt werden, mit der eine signifikante Beeinflussung der Messwerte im Pilotlager durch Prozesse des Hauptlagers vermieden werden kann. Das Pilotlager soll aber auch nicht zu weit entfernt liegen, um die Übertragbarkeit auf das Hauptlager sicherzustellen. Bei einer Entfernung in der Grössenordnung von 100 – 200 m würden der Bau des Hauptlagers und die Einlagerung der Abfälle die Beobachtungen im Pilotlager kaum beeinflussen. Bei einer Entfernung von etwa 200 m wären generell Störungen und speziell eine starke geomechanische Beeinflussung vermeidbar. So reagiert z. B. der Porenwasserdruck sensitiv auf Tunnelarbeiten in der näheren Umgebung. Damit wären günstige Bedingungen für die Interpretation der Messwerte im Pilotlager sichergestellt. Allerdings könnten sich mit zunehmender Entfernung die Eigenschaften des Wirtgesteins ändern. Stärkere Änderungen würden die Vergleichbarkeit der Ergebnisse begrenzen und deren Belastbarkeit für die Entscheidung über den Verschluss schwächen. Der effektive Abstand zwischen Pilotlager und Hauptlager wird von der Nagra im Baubewilligungsgesuch festgelegt. Dabei werden standortspezifische Gegebenheiten und auslegungsspezifische Bedingungen berücksichtigt.

Für die messtechnische Überwachung des Pilotlagers könnten auch mehrere gut abgedichtete Beobachtungsbohrungen anstatt eines Beobachtungsstollens genutzt werden, da letzterer erhebliche Veränderungen der Umgebungsbedingungen verursachen kann, die sich z. B. in veränderten Porenwasserdrücken zeigen. Falls ein Beobachtungsstollen geplant ist, sollte dieser eine ausreichend grosse Distanz zum Pilotlager aufweisen und vor der Erstellung des Pilotlagers gebaut werden. Weiterhin können Sensorfehler, z. B. durch Korrosion der Membran, zu einer Wasserführung in den Kabeln bis in den Kontrollstollen und damit zu einer Beeinflussung der THMC-gekoppelten Prozesse im Umfeld führen.

Hinsichtlich von Beobachtungsbohrungen weist die Nagra darauf hin (ENSI 33/172), dass einerseits Bohrungen und Sensoren ein Potenzial für Störungen der Entwicklung gewisser In-situ-Bedingungen (z. B. Porenwasserdruck) im Pilotlager aufweisen können. Für die Planung der Überwachung des Pilotlagers muss abgewogen werden, welche Sensoren und welche Sensordichte adäquat für die angestrebten Ziele sind.

5.2 Design des Pilotlagers und der Testbereiche

Die derzeitigen Planungen der Nagra zu Auslegung und Design des Pilotlagers sehen Lagerkammern, einen Zugang sowie Überwachungseinrichtungen vor. Derzeit werden für hochaktive Abfälle drei in ihrer Länge gegenüber dem Hauptlager verkürzte Einlagerungsstollen vorgesehen (Fig. 1). Die Auslegung der Lagerkammern (z. B. Querschnitt und Ausbau) und der Bauvorgang sollen dem Hauptlager entsprechen. Die Einlagerung in die BE/HAA Lagerstollen soll gemäss heutiger Planung ähnlich wie im Hauptlager etwa zwei Jahre nach dem Bau abgeschlossen sein (NTB 08-01). Im Hinblick auf die zeitliche Entwicklung der Konvergenz und der Wiederaufsättigung sollte die gleiche Stollenbautechnik (Ausbruchmethode, Sicherungsmittel, Hinterfüllung) wie im Hauptlager verwendet werden (die entsprechenden Techniken sind vorgängig in den Testbereichen zu testen). In einem SMA-Lager ist es schwieriger, einen ähnlichen zeitlichen Verlauf einzuhalten, da deren Lagerkammern nach aktuellen Planungen etwa 15 bis 20 Jahre offenstehen werden. Falls kleine Unterschiede im Stollenausbau zwischen Pilotlager und Hauptlager notwendig werden sollten, so dürfen diese keinen signifikanten Einfluss auf die Entwicklung im Pilotlager haben.



Klassifizierung:	keine
Aktenzeichen/Referenz:	33KRM.PIL / ENSI 33/809
Titel:	Schlussbericht zum AGNEB-Projekt «Auslegung und Inventar des Pilotlagers»
Datum / Sachbearbeiter:	24.05.2021 / [REDACTED]

Derzeit wird ein Kontrollstollen zur Beobachtung des Pilotlagers als notwendig angesehen (Fig. 2). Dieser wird auf der gleichen Ebene wie das Pilotlager liegen und vom Zugang zum Pilotlager entkoppelt sein. Damit besteht keine direkte Verbindung zwischen dem Kontrollstollen und den Lagerkammern des Pilotlagers. Der Zugang zum Pilotlager wird nach der Einlagerung verschlossen. Dadurch und durch die fehlende Verbindung zum Kontrollstollen ist die passive Sicherheit des Systems gewährleistet. Derzeit wird ein Abstand von etwa 50 m zwischen dem Kontrollstollen und dem Pilotlager angenommen (ENSI 33/200).

Die Tests des Verfahrens für die Einlagerung der Abfallbinde und den Verschluss der Lagerkammern erfolgen in den Testbereichen. Das Verfahren wird erst nach diesen Tests für das Pilotlager angewendet. Über den Kontrollstollen und Überwachungsbohrungen kann der nur durch den Bau des Kontrollstollens gestörte Anfangszustand des Wirtgesteins als Nullmessung über einen längeren Zeitraum beobachtet werden. Damit können erste Untersuchungen stattfinden und gegebenenfalls können die EUU in die Testbereiche des Tiefenlagers überführt werden. Für das Rahmenbewilligungsgesuch wird die Nagra die Anlage in den Grundzügen darstellen und für das nukleare Baugesuch eine detaillierte Auslegung übergeben. Das Pilotlager kann nach Erteilung der nuklearen Baubewilligung zusammen mit den anderen für den Betrieb des Lagers notwendigen Infrastrukturbauten in etwa 5 Jahren gebaut werden. Bei Vorliegen der Betriebsbewilligung können als Erstes die Abfallbinde ins Pilotlager eingelagert und das Pilotlager unmittelbar hinterher wieder verschlossen werden.

Die geplanten Tätigkeiten im Untergrund, wie z. B. die Auffahrung der Testbereiche, der Bau des Kontrollstollens, die Erstellung des Pilotlagers und letztlich die Erstellung des Hauptlagers werden sich gegenseitig zu einem gewissen Grad beeinflussen. Bedingt wird dies durch die in Tonen vorherrschende starke hydraulisch-mechanische Kopplung. Daher sollte vor Beginn von Bau- und Ausbautätigkeiten abgeschätzt werden, inwieweit sich diese auf bestehende Experimente und auf die Beobachtungen im Pilotlager auswirken werden. Dabei ist zu beachten, dass die HM-Eigenschaften anisotrop ausgeprägt sind.

5.3 Fazit

Für die Platzierung des Pilotlagers muss zwischen zwei gegensätzlich wirkenden Zielen abgewogen werden. Das eine Ziel ist die Gewährleistung der Übertragbarkeit der Entwicklung im Pilotlager auf das Hauptlager. Dafür sollte eine möglichst geringe Distanz zwischen Pilotlager und Hauptlager angestrebt werden. Andererseits soll eine negative Beeinflussung des Hauptlagers durch Entwicklungen im Pilotlager vermieden werden. Die Reichweite der Veränderung des Wassergehalts ist relativ klein, da die Veränderung der Wassersättigung ein lokales Phänomen auf der Meterskala um den Stollenrand ist. Zur Vermeidung der Beeinflussung der Wassersättigung durch benachbarte Stollen würde ein geringer Abstand genügen. Hinsichtlich des Wärmesignals und des Porenwasserdrucks ergeben sich grössere Einflussbereiche. Das Pilotlager sollte in ausreichender Entfernung zum Hauptlager angeordnet werden. Unter Berücksichtigung der gesetzlichen Vorgaben sollte eine Distanz des Pilotlagers zum Hauptlager gewählt werden, mit der eine signifikante Beeinflussung der Prozesse im Pilotlager durch das Hauptlager vermieden werden kann. Das Pilotlager soll aber auch nicht zu weit entfernt liegen, um die Übertragbarkeit auf das Hauptlager sicherzustellen. Der effektive Abstand zwischen Pilotlager und Hauptlager wird von der Nagra im Baubewilligungsgesuch festgelegt. Sie berücksichtigt dabei standort-spezifische Gegebenheiten und auslegungsspezifische Bedingungen. Dieses Thema wurde auch im Technischen Forum Sicherheit zu der Frage 151 diskutiert. Die Antwort kann unter <https://www.ensi.ch/de/technisches-forum-sicherheit/> eingesehen werden.



Klassifizierung: keine
Aktenzeichen/Referenz: 33KRM.PIL / ENSI 33/809
Titel: Schlussbericht zum AGNEB-Projekt «Auslegung und Inventar des Pilotlagers»
Datum / Sachbearbeiter: 24.05.2021 / [REDACTED]

Nach derzeitiger Planung hat das Pilotlager einen separaten Zugang über den die Abfälle eingelagert werden. Vor der Einlagerung von Abfällen in das Hauptlager wird das Pilotlager verschlossen. Der Kontrollstollen bleibt zugänglich und dient der Überwachung des Pilotlagers. Detaillierte Planungen sind von der Nagra im Überwachungskonzept sowie im Baubewilligungsgesuch darzustellen. Zusätzliche Anforderungen an die Auslegung des Pilotlagers sind derzeit nicht erforderlich.



Klassifizierung: keine
Aktenzeichen/Referenz: 33KRM.PIL / ENSI 33/809
Titel: Schlussbericht zum AGNEB-Projekt «Auslegung und Inventar des Pilotlagers»
Datum / Sachbearbeiter: 24.05.2021 / [REDACTED]

6 Auswahl der Abfälle für das Pilotlager

6.1 Einfluss der Abfälle auf die Prozesse im gTL

Im Folgenden werden Grundlagen und Kriterien für die Auswahl spezifischer Abfälle (SMA, LMA und HAA) erarbeitet, die zum Zweck einer Überwachung bis zum Ablauf der regulatorischen Beobachtungsphase im Pilotlager eingelagert und überwacht werden sollen. In der Schweiz stammen radioaktive Abfälle aus dem Betrieb und der späteren Stilllegung der Kernkraftwerke sowie aus der Anwendung radioaktiver Stoffe in der Medizin, Industrie und Forschung (MIF-Abfälle).

Das modellhafte Inventar für radioaktive Materialien (MIRAM), das die Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra) im Auftrag der Entsorgungspflichtigen führt (NTB 14-04), bildet die Grundlage für die Projektierung und Sicherheitsanalysen dieser Lager. Das MIRAM berücksichtigt alle relevanten Informationen (z. B. Volumen, Nuklid- und Materialinventare) bereits angefallener sowie zukünftig anfallender radioaktiver Abfälle. Das Inventar wurde letztmalig durch das ENSI in Etappe 2 SGT geprüft.

Die eingelagerten Abfallbinde im Pilotlager sollen repräsentativ für das Inventar des Hauptlagers sein (Art. 66 KEV). Die Repräsentativität bezieht sich auf die Eigenschaften der Abfälle. Relevante Eigenschaften im Hinblick auf das Verhalten der Abfälle während der Beobachtungsphase und ihre Auswirkungen auf das System der technischen und der geologischen Barrieren sind beispielsweise die

- physikalische/chemische Zusammensetzung des Rohabfalls, im Hinblick auf
 - komplexierende Abbauprodukte und
 - Gasbildung;
- Abfallmatrix;
- Verpackung;
- Wärmeleistung (Radionuklidvektor).

Erhöhung der Mobilität von Radionukliden

Verschiedene Inhaltsstoffe der radioaktiven Abfälle sind von sicherheitsrelevanter Bedeutung, indem sie die Mobilität der Radionuklide erhöhen können. Ein Beispiel dafür sind die organischen Inhaltsstoffe oder deren Abbauprodukte der schwach- und mittelaktiven (SMA) bzw. langlebigen mittelaktiven Abfälle (LMA), wie beispielsweise EDTA oder Isosacharinsäure (ISA), die in Form von Komplexbildnern die Löslichkeit der Radionuklide im Porenwasser des Barrierensystems erhöhen, die Rückhaltung (Sorption) der Radionuklide in den Barrieren des Tiefenlagers vermindern und die Zersetzung von Zement als Material des technischen Barrierensystems beschleunigen können.

Die SMA und die alpha-toxischen Abfälle (ATA) im modellhaften Inventar werden entsprechend ihrem Gehalt an Stoffen, welche die Mobilität der Radionuklide im Zementnahfeld des SMA-Lagers oder des LMA-Lagers erhöhen könnten, in zwei Abfallgruppen eingeteilt. Dabei werden der Gruppe 1 solche Abfälle zugeteilt, die im Hinblick auf eine mögliche Beeinträchtigung der geochemischen Rückhaltemechanismen nur geringe Konzentrationen an Störstoffen enthalten, der Gruppe 2 alle übrigen Abfälle. Sowohl im SMA-Lager als auch im LMA-Teil des HAA-Lagers ist vorgesehen, die beiden Gruppen in räumlich getrennten Lagerkammern einzulagern, um den Einfluss der Störstoffe auf die Radionuklidmobilität insgesamt möglichst gering zu halten (NTB 14-03).



Klassifizierung:
Aktenzeichen/Referenz:
Titel:
Datum / Sachbearbeiter:

keine
33KRM.PIL / ENSI 33/809
Schlussbericht zum AGNEB-Projekt «Auslegung und Inventar des Pilotlagers»
24.05.2021 / [REDACTED]

Wärmeeintrag

Eine erhöhte Temperatur verändert die mineralogischen und damit die geochemischen (Sorption), mechanischen und hydraulischen Eigenschaften der technischen und natürlichen Barrieren des geologischen Tiefenlagers und beeinflusst damit unter Umständen die Barrierenwirkung des Lagersystems. Auch die Änderung der Zustandsparameter kann die Barrierenwirkung beeinträchtigen (höhere Diffusionsraten, höhere hydraulische Durchlässigkeiten, Änderungen der Gebirgsspannung durch thermische Expansion des Porenwassers etc.).

In Bezug auf den Wärmeeintrag sind die abgebrannten Brennelemente (insbesondere MOX-Brennelemente) im HAA-Lager die bedeutendste Wärmequelle (NTB 02-03). Die Wärmeentwicklung ist vom Abbrand des Kernbrennstoffs abhängig. Für beladene Lagerbehälter definiert die Nagra zum Zeitpunkt der Einlagerung eine maximale Obergrenze von 1'500 Watt, wie sie nach einer 40-jährigen Abklingzeit bei entsprechender Beladung erreicht werden kann.

Für Abfälle im SMA- bzw. LMA-Lager lassen die provisorischen Annahmebedingungen der Nagra eine spezifische Wärmeleistung von maximal 5 Watt bzw. 50 Watt pro Kubikmeter (Gebinde) zu.

Im SMA- und LMA-Lager wird die Hydratisierung der Zementverfüllung kurzfristig zu einer, wenn auch geringen, Temperaturerhöhung führen, welche ihrerseits Einfluss auf temperaturabhängige geochemische Wechselwirkungen zwischen den vorhandenen Materialien hat. Die Zerfallswärme spielt wegen des geringeren Aktivitätsinventars im SMA- und LMA-Lager eine untergeordnete Rolle.

Korrosion von metallischen Werkstoffen

Unter anaeroben Bedingungen reagieren Metalle mit Wasser zu Metalloxiden und Wasserstoff. Die Bildung von Wasserstoff kann in einem geologischen Tiefenlager zu erhöhten Gasdrücken führen. Die Gasbildung kann eine freie mobile Gasphase und der hohe Gasdruck einen erhöhten (advektiven) Wasserfluss zur Folge haben. Das Wasserangebot, der pH-Wert und die Oberfläche der Metalle beeinflussen das Korrosionsverhalten und die Gasbildung. Das Wasserangebot kann die Korrosion von Metallen begrenzen. Eisen korrodiert (NAB 15-17 Rev 1) unter alkalischen Bedingungen (Zement-Nahfeld des SMA bzw. LMA-Lagers) langsamer als unter neutralen Bedingungen (Bentonit-Nahfeld des HAA-Lagers).

Schnell korrodierende Metalle wie Zink und Aluminium und die metallischen Abfälle mit grossen Oberflächen/Massen-Verhältnissen spielen trotz ihren geringen Gesamtmassen für die Zeit kurz nach Verschluss des SMA-Tiefenlagers eine bedeutende Rolle bei der Gasproduktion.

Umgekehrt stabilisieren die Korrosionsprozesse die reduzierenden Bedingungen im geologischen Tiefenlager: Metalle oxidieren mit Sauerstoff zu Metalloxiden und schaffen damit reduzierende Bedingungen. Unter diesen sind die Löslichkeitslimiten vieler Radionuklide klein und die Sorption erheblich. Für die abgebrannten Brennelemente ist unter reduzierenden Bedingungen die Brennstoffauflösung langsamer als unter oxidierten Bedingungen.

Mikrobieller Abbau von organischen Materialien

Bei den organischen Materialien in den schwach- und mittelaktiven Abfällen handelt es sich entweder um leicht abbaubare, niedermolekulare organische Verbindungen, wie beispielsweise Detergenzien, oder um schwer abbaubare, hochmolekulare organische Verbindungen (z. B. zelluloseartige Materialien, Bitumen und Kunststoffe, wie z. B. Harze und Polystyrol). Die organischen radioaktiven Abfälle werden abhängig von ihrer Radiotoxizität entweder dem SMA- oder dem LMA-Lager zugeordnet.



Klassifizierung: keine
Aktenzeichen/Referenz: 33KRM.PIL / ENSI 33/809
Titel: Schlussbericht zum AGNEB-Projekt «Auslegung und Inventar des Pilotlagers»
Datum / Sachbearbeiter: 24.05.2021 / [REDACTED]

Bei der mikrobiellen Zersetzung von organischen Verbindungen können Abbauprodukte wie Komplexbildner oder Gase (Methan und Kohlendioxid) entstehen. Eine erhöhte Produktion von Kohlendioxid führt zu einer erhöhten Karbonatkonzentration im Porenwasser. Karbonat kann Radionuklide komplexieren und dadurch die Löslichkeit erhöhen und die Sorption reduzieren. Kohlendioxid kann zudem Zementminerale wie Portlandit ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) zu Calcit (CaCO_3) umwandeln. Das Zementmineral Portlandit puffert den pH-Wert des Porenwassers um pH 12.5. Bei einer vollständigen Umwandlung von Portlandit zu Calcit und einer weiteren Bildung von Kohlendioxid durch den Abbau organischer Substanzen sinkt der pH-Wert. Das Kohlendioxid reagiert mit wichtigen Zementmineralen wie z. B. Calciumsilikathydrate (CSH) und Ettringit die Radionuklide zu sorbieren vermögen. Die Zusammensetzung des Zementsteins verändert sich dadurch und die Rückhalteigenschaften für Radionuklide können durch diesen Prozess reduziert werden. Somit können organische Materialien in einem Tiefenlager die Mobilität von Radionukliden erhöhen und durch die Produktion von Methan zu einer weiteren Zunahme der Gasdrücke führen. Im Gegensatz dazu wird Kohlendioxid durch die Reaktion mit Zementmineralen gebunden und trägt nicht zum Druckaufbau bei.

Entwicklung der (lokalen) geochemischen Bedingungen

Die resultierenden geochemischen Bedingungen im Umfeld der Abfälle können durch die Verfüllung, aber auch durch die Abfälle selbst verändert werden. Dies gilt besonders für die SMA, welche eine Vielzahl verschiedener Stoffe enthalten. Die Zementverfüllung im SMA- und LMA-Lager führt zu einer alkalischen Porenlösung. Deren diffusiver Transport ins Nahfeld des Tiefenlagers kann dort zu einem ansteigenden pH-Wert im Porenwasser des Wirtgesteins und zu Mineralausfällungen führen. Diese geochemischen Veränderungen und die Freisetzung von Komplexbildnern aus den Abfällen können die Retention der Radionuklide reduzieren. Die Mineralausfällungen reduzieren ausserdem die Porosität, wodurch der diffusive Transport von Radionukliden beeinträchtigt wird. Diese Prozesse finden über einen sehr langen Zeitraum statt, der weit über den Zeitrahmen der Beobachtungsphase hinausgeht.

6.2 Mögliche Strategien für die Auswahl der Abfälle für das Pilotlager

Die radioaktiven Abfälle weisen eine erhebliche Diversität in ihrer Zusammensetzung auf: Das modellhafte Inventar gemäss MIRAM 14 setzt sich aus gesamthaft 87'610 Abfallgebinden zusammen, welche in 162 Abfallarten zusammengefasst werden. Der grösste Teil der Abfälle wird erst in Zukunft anfallen, d. h. die Abfälle sind vorerst nur modellhafter Natur.

Eine definitive Auswahl des Abfallinventars für das Pilotlager ist bzgl. Stand der Projektentwicklung nicht stufengerecht und ist stattdessen im Zuge der weiteren Realisierung des Tiefenlagers im Überwachungsprogramm des Pilotlagers zu begründen. Dabei ist eine Abwägung zwischen der Repräsentativität des Inventars und der Übertragbarkeit auf das Hauptlager zu treffen.

6.2.1 Pilotlager für hochaktive Abfälle

Das Abfallinventar im HAA-Lager besteht aus abgebrannten Brennelementen und verglasten Spaltproduktlösungen aus der Wiederaufarbeitung. Die abgebrannten Brennelemente haben eine höhere Wärmeleistung. Damit die derzeit maximal angestrebte Wärmeleistung von 1500 W pro Lagerbehälter eingehalten wird, plant die Nagra derzeit beispielhaft folgende Beladung (NTB 14-03):

Lagerbehälter für SWR-BE: 9 SWR-BE;
Lagerbehälter für DWR-BE: 4 UO_2 -BE mit ähnlichen Eigenschaften wie SWR-BE, 1 MOX-BE und maximal 3 UO_2 -BE.



Klassifizierung: keine
Aktenzeichen/Referenz: 33KRM.PIL / ENSI 33/809
Titel: Schlussbericht zum AGNEB-Projekt «Auslegung und Inventar des Pilotlagers»
Datum / Sachbearbeiter: 24.05.2021 / [REDACTED]

Die verglasten hochaktiven Abfälle aus der Wiederaufarbeitung weisen abhängig vom Hersteller leicht unterschiedliche Eigenschaften bezüglich Radionuklidinventar, Glasauflösungsrate und Wärmeleistung auf. Die aktuelle Auslegung geht von einer Beladung der Lagerbehälter mit zwei HAA-Kokillen aus.

Als Inventar des Pilotlagers bieten sich Lagerbehälter mit hoher Wärmeleistung an. Dies würde eher eine Wärmeentwicklung ähnlich zum Hauptlager erwarten lassen.

6.2.2 Pilotlager für schwach- und mittelaktive Abfälle (SMA)

Für schwach- und mittelaktive Abfälle ist eine Auswahl der Abfälle für das Pilotlager schwieriger, da sie eine hohe Diversität aufweisen. Für das Pilotlager sind Schwerpunkte bzgl. der einzulagernden Abfälle und der entsprechend zu beobachtenden Phänomene zu setzen. Vermutlich wird es für diese Abfälle schwieriger sein, die Verhältnisse repräsentativ abzubilden. Eine Möglichkeit wäre, Abfälle, bei denen Prozesse im Rahmen des Beobachtungszeitraums schneller oder stärker auftreten auszuwählen und in getrennten Bereichen des Pilotlagers einzulagern. Dazu könnten z. B. SMA mit schnell korrodierenden metallischen Materialien oder SMA mit hohem Anteil an leicht abbaubaren organischen Materialien gehören.

6.3 Fazit

Eine definitive Auswahl des Abfallinventars für das Pilotlager ist bzgl. Stand der Projektentwicklung nicht stufengerecht und ist stattdessen im Zuge der weiteren Realisierung des Tiefenlagers im Überwachungsprogramm des Pilotlagers zu begründen. Dabei ist eine Abwägung zwischen der Repräsentativität des Inventars und der Übertragbarkeit auf das Hauptlager zu treffen. Wenn man der Strategie folgt, Abfälle, bei denen Prozesse im Rahmen des Beobachtungszeitraums schneller oder stärker auftreten, für das Pilotlager auszuwählen, dann würden sich bezüglich des Inventars des Pilotlagers für hochaktive Abfälle Lagerbehälter mit hoher Wärmeleistung anbieten. Dies würde eher eine Wärmeentwicklung ähnlich zum Hauptlager erwarten lassen. Für das Pilotlager für schwach- und mittelaktive Abfälle ist eine Auswahl der Abfälle schwieriger, da sie eine hohe Diversität aufweisen. Eine Möglichkeit wäre, SMA mit schnell korrodierenden metallischen Materialien oder SMA mit hohem Anteil an leicht abbaubaren organischen Materialien einzulagern. Eine alternative Strategie wäre die Auswahl verschiedener Abfälle, welche die Zusammensetzung der Abfälle widerspiegeln. Es wurden keine Abfallsorten identifiziert, die durch Wechselwirkungen mit anderen Abfallsorten die Belastbarkeit der Aussagen des Pilotlagers für das Hauptlager einschränken würden, zumal die Abfallgruppen 1 und 2 der SMA getrennt eingelagert werden sollen. Bei der weiteren Realisierung des Tiefenlagers ist zu begründen, ob Wechselwirkungen zwischen unterschiedlichen Abfallsorten vermieden werden sollten. Die sicherheitstechnische Relevanz der Wechselwirkungen zwischen unterschiedlichen Abfallsorten wird bei der Realisierung eines Tiefenlagers im Rahmen der Sicherheitsnachweise abgeklärt.



Klassifizierung: keine
Aktenzeichen/Referenz: 33KRM.PIL / ENSI 33/809
Titel: Schlussbericht zum AGNEB-Projekt «Auslegung und Inventar des Pilotlagers»
Datum / Sachbearbeiter: 24.05.2021 / [REDACTED]

7 Beantwortung der Fragen an das Projekt

a) Welche Funktionen hat das Pilotlager?

Bei der Überwachung des Pilotlagers sind im Hinblick auf den Verschluss Daten zur Erhärtung des Sicherheitsnachweises zu ermitteln. Die Ergebnisse der Überwachung müssen auf die Vorgänge im Hauptlager übertragbar sein. Sie bilden eine Grundlage für den Entscheid über den Verschluss des Tiefenlagers. Der Zielhorizont des Pilotlagers liegt vor allem auf der Beobachtung der Einlagerungsphase und des Anfangszustands des Tiefenlagers innerhalb der Beobachtungsphase. Diese ist durch sich zeitlich verändernde Prozesse geprägt.

b) Welche Prozesse und Eigenschaften können innerhalb welcher Zeiträume im Pilotlager beobachtet werden, die zu belastbaren Aussagen auch über das Hauptlager führen (Übertragbarkeit)?

Die Liste der für das **HAA-Pilotlager** während der Beobachtungszeit von einigen Dekaden auftretenden Prozesse, die für eine Beobachtung berücksichtigt werden könnten, umfasst:

- die Veränderung der Auflockerungszone, die Konsolidierung des Gebirges und die Konvergenz der Lagerstollen;
- den Wärmeeintrag, die Temperaturentstreuung und den Einfluss der Temperatur auf das Materialverhalten von Bentonit und Wirtgestein sowie die Entwicklung des Porenwasserdrucks und der Deformation;
- die Ent- und Wiederaufsättigung sowie den Einfluss des Wassergehalts auf den Stofftransport, die Temperatur, die Gasbildung, den Gastransport und auf die Chemie;
- das Quellen des Bentonits inklusive der Auswirkungen auf die Auflockerungszone;
- die Korrosion der Behälter; sowie
- die Gasbildung.

Im verfügbaren Zeitraum im HAA-Pilotlager voraussichtlich nicht oder kaum auftretenden Prozesse sind

- das Behälterversagen, die Volumenzunahme durch Korrosionsprodukte sowie die Lösung der Korrosionsprodukte;
- der Gastransport;
- die geochemischen Veränderungen;
- die Auflösung der Abfallmatrix;
- alle Prozesse im Zusammenhang mit dem Radionuklidtransport.

Die Liste der auftretenden Prozesse im **SMA-Lager** während der Beobachtungszeit von einigen Dekaden, die für eine Beobachtung berücksichtigt werden könnten, umfasst:

- die Konvergenz der Lagerkavernen;
- den Wärmeeintrag (insbesondere als Folge des Abbindens des Zementmörtels) sowie die Temperaturentstreuung im Nahfeld;
- die Entsättigung und Wiederaufsättigung;
- die Freisetzung von Tritium.



Klassifizierung:
Aktenzeichen/Referenz:
Titel:
Datum / Sachbearbeiter:

keine
33KRM.PIL / ENSI 33/809
Schlussbericht zum AGNEB-Projekt «Auslegung und Inventar des Pilotlagers»
24.05.2021 / [REDACTED]

Im verfügbaren Zeitraum beim SMA-Lager voraussichtlich nicht oder kaum auftretenden Prozesse sind

- das Quellen des Bentonits in der Versiegelung (inklusive Selbstabdichtung);
- die Gasbildung durch Metallkorrosion und durch Degradation organischen Materials;
- der Gastransport;
- alle Prozesse im Zusammenhang mit dem Radionuklidtransport;
- die Korrosion der Metalle;
- die geochemischen Veränderungen.

Gemäss der Richtlinie ENSI-G03 muss die Nagra ein integrales Überwachungskonzept für das Tiefenlager und damit auch für das Pilotlager entwickeln und vorschlagen. Darin wird die Nagra erläutern, welche Prozesse aus ihrer Sicht relevant sind. Welche Parameter beobachtet werden, wird im Überwachungsprogramm von der Nagra festgelegt. Dieses Überwachungskonzept sowie das Überwachungsprogramm werden vom ENSI geprüft und beurteilt. Das erste integrale Überwachungskonzept ist mit dem Rahmenbewilligungsgesuch einzureichen (ENSI 33/649).

- c) Welche Prozesse und Eigenschaften müssen beobachtet werden, um unerwartete Entwicklungen frühzeitig erkennen zu können?

Bereits im Überwachungskonzept für das Pilotlager ist es notwendig, unerwartete Ereignisse und Entwicklungen in geeigneter Form zu berücksichtigen. Dabei geht es insbesondere um Ereignisse, die zwar aufgrund der begrenzten Beobachtungsphase im Pilotlager als nicht beobachtbar während dessen Betriebs eingeordnet sind (z. B. auf Grund ihres prognostizierten späteren zeitlichen Auftretens), deren früheres Eintreten aber eine Überprüfung der Funktionstüchtigkeit der technischen Barrieren erforderlich machen würde. Für die Überwachung unerwarteter Entwicklungen im Pilotlager kann mit dem Überwachungskonzept eine Auswahl von Überwachungsindikatoren vorgeschlagen werden, die, soweit technisch möglich, beobachtet werden können. Dazu können aus Sicht des ENSI z. B. die Temperatur, die Radionuklidkonzentration, der Porenwasserdruck und die Wassersättigung gehören.

- d) Wie ist bei gegebenem Inventar des Hauptlagers das repräsentative Inventar des Pilotlagers zu wählen?

Eine definitive Auswahl des Abfallinventars für das Pilotlager ist bzgl. Stand der Projektentwicklung nicht stufengerecht und ist stattdessen im Zuge der weiteren Realisierung des Tiefenlagers im Überwachungsprogramm des Pilotlagers zu begründen. Dabei ist eine Abwägung zwischen der Repräsentativität des Inventars und der Übertragbarkeit auf das Hauptlager zu treffen. Wenn man der Strategie folgt, Abfälle, bei denen Prozesse im Rahmen des Beobachtungszeitraums schneller oder stärker auftreten, für das Pilotlager auszuwählen, dann würden sich bezüglich des Inventars des Pilotlagers für hochaktive Abfälle Lagerbehälter mit hoher Wärmeleistung anbieten. Dies würde eher eine Wärmeentwicklung ähnlich zum Hauptlager erwarten lassen. Für das Pilotlager für schwach- und mittelaktive Abfälle ist eine Auswahl der Abfälle schwieriger, da sie eine hohe Diversität aufweisen. Eine Möglichkeit wäre, SMA mit schnell korrodierenden metallischen Materialien oder SMA mit hohem Anteil an leicht abbaubaren organischen Materialien einzulagern. Eine alternative Strategie wäre die Auswahl verschiedener Abfälle, welche die Zusammensetzung der Abfälle widerspiegeln. Bei der weiteren Realisierung des Tiefenlagers ist zu begründen, ob Wechselwirkungen zwischen unterschiedlichen Abfallsorten vermieden werden sollten. Die sicherheitstechnischen



Klassifizierung: keine
Aktenzeichen/Referenz: 33KRM.PIL / ENSI 33/809
Titel: Schlussbericht zum AGNEB-Projekt «Auslegung und Inventar des Pilotlagers»
Datum / Sachbearbeiter: 24.05.2021 / [REDACTED]

nische Relevanz der Wechselwirkungen zwischen unterschiedlichen Abfallsorten wird bei der Realisierung eines Tiefenlagers im Rahmen der Sicherheitsnachweise abgeklärt.

- e) Welche Wechselwirkungen zwischen unterschiedlichen Abfallsorten müssen im Pilotlager vermieden werden, damit für das Hauptlager belastbare Aussagen gemacht werden können?

Es wurden keine Abfallsorten identifiziert, die durch Wechselwirkungen mit anderen Abfallsorten die Belastbarkeit der Aussagen des Pilotlagers für das Hauptlager einschränken würden, zumal die Abfallgruppen 1 und 2 der SMA getrennt eingelagert werden sollen. Bei der weiteren Realisierung des Tiefenlagers ist zu begründen, ob Wechselwirkungen zwischen unterschiedlichen Abfallsorten vermieden werden sollten.

- f) Sind aufgrund der geforderten räumlichen und hydraulischen Trennung vom Hauptlager zusätzliche Anforderungen an ein Pilotlager zu stellen?

Unter Berücksichtigung der gesetzlichen Vorgaben sollte eine Distanz des Pilotlagers zum Hauptlager gewählt werden, mit der eine signifikante Beeinflussung der Messwerte im Pilotlager durch Prozesse des Hauptlagers vermieden werden kann. Das Pilotlager soll aber auch nicht zu weit entfernt liegen, um die Übertragbarkeit auf das Hauptlager sicherzustellen. Der effektive Abstand zwischen Pilotlager und Hauptlager wird von der Nagra im Baubewilligungsgesuch festgelegt. Sie berücksichtigt dabei standortspezifische Gegebenheiten und auslegungsspezifische Bedingungen. Zusätzliche Anforderungen sind derzeit nicht erforderlich.

- g) Sind an den Zugang zum Pilotlager und die Auslegung des Pilotlagers zusätzliche räumliche Anforderungen zu stellen?

Nach derzeitiger Planung hat das Pilotlager einen separaten Zugang über den die Abfälle eingelagert werden. Vor der Einlagerung von Abfällen in das Hauptlager wird das Pilotlager verschlossen. Der Kontrollstollen bleibt zugänglich und dient der Überwachung des Pilotlagers. Detaillierte Planungen sind von der Nagra im Überwachungskonzept sowie im Baubewilligungsgesuch darzustellen. Zusätzliche Anforderungen an die Auslegung des Pilotlagers sind derzeit nicht erforderlich.

- h) Sind an die Auslegung des Pilotlagers im Hinblick der zeitlichen Abfolge der Realisierung eines Tiefenlagers zusätzliche Anforderungen zu stellen?

Vor der Einlagerung von Abfällen im Hauptlager wird das Pilotlager erstellt, die Abfälle werden eingelagert und das Pilotlager wird verschlossen. Zusätzliche Anforderungen an die zeitliche Abfolge der Realisierung eines Tiefenlagers sind derzeit nicht erforderlich.

- i) Inwieweit können Artefakte eine Rolle spielen? (z. B. Beeinflussung der Prozesse durch Sensoren und deren Zuleitungen)?

Das FE-Experiment mit einer Vielzahl an eingebauten Sensoren kann hier möglicherweise zusätzliche Informationen liefern. Während des Projekts wurden keine konkreten Anhaltspunkte dazu ermittelt.



Klassifizierung:
Aktenzeichen/Referenz:
Titel:
Datum / Sachbearbeiter:

keine
33KRM.PIL / ENSI 33/809
Schlussbericht zum AGNEB-Projekt «Auslegung und Inventar des Pilotlagers»
24.05.2021 / [REDACTED]

Literatur

- ENSI 33/698: Verschlussmassnahmen in Krisensituationen, Basler & Hofmann AG, Expertenbericht zuhanden des ENSI, Zürich, 2018.
- Andra (2016): Cigeo - Proposed Operations Master Plan (PDE), Report CG-TE-D-NTE-AMOA-SDR-0000-15-0063 Andra, Paris.
- ENSI 33/698: Verschlussmassnahmen in Krisensituationen, Basler & Hofmann AG, Expertenbericht zuhanden des ENSI, Zürich, 2018.
- Bossart P. (2017): Twenty years of research at the Mont Terri rock laboratory: what we have learnt. Swiss Journal of Geosciences published online. DOI: 10.1007/s00015-017-0267-2.
- ENSI 33/172: Protokoll der 2. Sitzung zum Agneb-Projekt "Auslegung und Inventar des Pilotlagers" am 15. Februar 2012, Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat, Aktennotiz, Brugg, 2012.
- ENSI 33/189: Protokoll der 3. Sitzung zum Agneb-Projekt "Auslegung und Inventar des Pilotlagers" am 11. Juni 2012, Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat, Aktennotiz, Brugg, 2012.
- ENSI 33/200: Protokoll der 4. Sitzung zum Agneb-Projekt "Auslegung und Inventar des Pilotlagers" am 18. September 2012, Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat, Aktennotiz, Brugg, 2012.
- ENSI 33/412: Zwischenbericht zum Agneb-Forschungsprojekt "Monitoringkonzept und -einrichtungen", Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat, Aktennotiz, Brugg, 2015.
- ENSI 33/503: Schlussbericht zum Agneb-Forschungsprojekt «Lagerauslegung», Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat, Aktennotiz, Brugg, 2016.
- ENSI 33/649: Präzisierungen der sicherheitstechnischen Vorgaben für Etappe 3 des Sachplans geologische Tiefenlager, Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat, Aktennotiz, Brugg, 2018.
- ENSI 33/808: Abschlussbericht zum ENSI-Projekt "Monitoringkonzept und -einrichtungen 2", Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat, Aktennotiz, Brugg, 2021.
- IAEA (2011): Disposal of radioactive waste, Specific Safety Requirements SSR-5 International Atomic Energy Agency, Vienna.
- IAEA (2014a): Monitoring and Surveillance of Radioactive Waste Disposal Facilities, Specific Safety Guide SSG-31 International Atomic Energy Agency, Vienna.
- IAEA (2014b): Radiation protection and safety of radiation sources: International Basic Safety General Safety Requirements GSR Part 3 International Atomic Energy Agency, Vienna.
- IAEA (2016): Safety assessment for facilities and activities, General Safety Requirements GSR Part 4 (Rev. 1) International Atomic Energy Agency, Vienna.
- MoDeRn (2014): Monitoring During the Staged Implementation of Geological Disposal: The MoDeRn Project Synthesis, MODERN DELIVERABLE (D-6.1), European Commission, Luxembourg., Report Deliverable D6.1, Januar 2014, European Commission, EURATOM 7.
- NTB 01-04: Calculations of the Temperature Evolution of a Repository for Spent Fuel; vitrified High-Level Waste, and Intermediate Level Waste in Opalinus Clay, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Technischer Bericht, Wettingen, 2002.



Klassifizierung: keine
Aktenzeichen/Referenz: 33KRM.PIL / ENSI 33/809
Titel: Schlussbericht zum AGNEB-Projekt «Auslegung und Inventar des Pilotlagers»
Datum / Sachbearbeiter: 24.05.2021 / [REDACTED]

- NTB 02-23: Project Opalinus Clay: FEP Management for Safety Assessment – Demonstration of disposal feasibility for spent fuel; vitrified high-level waste and long-lived intermediate-level waste (Entsorgungsnachweis), Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Technischer Bericht, Wettingen, 2002.
- NTB 02-03: Projekt Opalinuston: Synthese der geowissenschaftlichen Untersuchungsergebnisse – Entsorgungsnachweis für abgebrannte Brennelemente; verglaste hochaktive sowie langlebige mittelaktive Abfälle, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Technischer Bericht, Wettingen, 2002.
- NAB 07-38: PAMINA RTDC-2 Milestone M2.2.E.2 FEP Screening report - Specifications for an integrated radionuclide release code (IRR) in support of a probabilistic safety assessment for swiss nuclear waste repositories, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2007.
- NTB 08-01: Entsorgungsprogramm 2008 der Entsorgungspflichtigen, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Technischer Bericht, Wettingen, 2008.
- NTB 08-05: Vorschlag geologischer Standortgebiete für das SMA- und das HAA-Lager: Begründung der Abfallzuteilung, der Barrierensysteme und der Anforderungen an die Geologie; Bericht zur Sicherheit und technischen Machbarkeit, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Technischer Bericht, Wettingen, 2008.
- NAB 09-25: Numerical modelling of the thermo-hydro-mechanical loading in a geological repository for HLW and SF, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2009.
- NTB 10-01: Beurteilung der geologischen Unterlagen für die provisorischen Sicherheitsanalysen in SGT Etappe 2 – Klärung der Notwendigkeit ergänzender geologischer Untersuchungen, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Technischer Bericht, Wettingen, 2010.
- NTB 12-06: Canister design concepts for disposal and spent fuel and high level waste, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Technischer Bericht, Wettingen, 2012.
- NTB 14-11: Geochemical Evolution of the L/ILW Near Field, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Technischer Bericht, Wettingen, 2014.
- NTB 12-01: The Long Term Geochemical Evolution of the Nearfield of the HLW Repository, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Technischer Bericht, Wettingen, 2014.
- NTB 14-14: Low- and intermediate-level waste repository-induced effects, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Technischer Bericht, Wettingen, 2014.
- NTB 14-04: Modellhaftes Inventar für radioaktive Materialien – MIRAM 14, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Technischer Bericht, Wettingen, 2014.
- NTB 14-03: SGT Etappe 2: Vorschlag weiter zu untersuchender geologischer Standortgebiete mit zugehörigen Standortarealen für die Oberflächenanlage: Charakteristische Dosisintervalle und Unterlagen zur Bewertung der Barrierensysteme, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Technischer Bericht, Wettingen, 2014.



Klassifizierung: keine
Aktenzeichen/Referenz: 33KRM.PIL / ENSI 33/809
Titel: Schlussbericht zum AGNEB-Projekt «Auslegung und Inventar des Pilotlagers»
Datum / Sachbearbeiter: 24.05.2021 / [REDACTED]

- NAB 15-17 Rev 1: Understanding and Quantifying the Corrosion of Carbon Steel in Grouts relevant to the Swiss L/ILW Repository, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2015.
- NAB 16-43: ENSI-Nachforderung zum Indikator "Tiefenlage im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit" in SGT Etappe 2 – Geomechanische Unterlagen, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2016.
- NAB 16-45: ENSI-Nachforderung zum Indikator "Tiefenlage im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit" in SGT Etappe 2 – Projektkonzepte für die Lagerkammern und Versiegelungsstrecken und deren Bewertung, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2016.
- NAB 16-42: ENSI-Nachforderung zum Indikator "Tiefenlage im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit" in SGT Etappe 2 – Prüfung der Lager- und Barrierenkonzepte, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2016.
- NAB 16-44: ENSI-Nachforderung zum Indikator "Tiefenlage im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit" in SGT Etappe 2 – Standortspezifische geologische Modelle und geologische Gefährdungsbilder, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2016.
- NAB 16-46: ENSI-Nachforderung zum Indikator "Tiefenlage im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit" in SGT Etappe 2 – Vortriebs- und Sicherungskonzepte für die Profile F, K09, K04, K04a und D [Ergänzende Unterlagen zu NAB 16-45], Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2016.
- NAB 16-41: ENSI-Nachforderung zum Indikator "Tiefenlage im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit" in SGT Etappe 2 – Zusammenfassende Darstellung der Zusatzdokumentation (Hauptbericht), Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2016.
- NTB 16-01: Entsorgungsprogramm 2016 der Entsorgungspflichtigen, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Technischer Bericht, Wettingen, 2016.
- NTB 14-13: High-level waste repository-induced effects, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Technischer Bericht, Wettingen, 2016.
- NTB 16-03: Production, consumption and transport of gases in deep geological repositories according to the Swiss disposal concept, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Technischer Bericht, Wettingen, 2016.
- NAB 16-07: Sensitivity analyses of gas release from a L/ILW repository in the Opalinus Clay including the microbial consumption of hydrogen, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2016.
- NAB 16-08: Sensitivity analyses of gas release from a SF/HLW repository in the Opalinus Clay, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2016.
- NTB 15-02: Implementation of the Full-scale Emplacement Experiment at Mont Terri: Design, Construction and Preliminary Results, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Technischer Bericht, Wettingen, 2019.



Klassifizierung: keine
Aktenzeichen/Referenz: 33KRM.PIL / ENSI 33/809
Titel: Schlussbericht zum AGNEB-Projekt «Auslegung und Inventar des Pilotlagers»
Datum / Sachbearbeiter: 24.05.2021 / [REDACTED]

NAB 19-19: Platzierung der Hauptschliessungsbereiche (HEB) in den Standortgebieten Jura Ost, Nördlich Lägern und Zürich Nordost, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2019.

NEA (2014): Preservation of records, knowledge and memory across generations (RK&M) – Loss of information, records, knowledge and memory – Key factors in the history of conventional waste disposal, Report NEA/RWM/R(2014)3 OECD Nuclear Energy Agency, Issy-les-Moulineaux.

WENRA (2014): Waste and Spent Fuel Storage Safety Reference Levels, Version 2.2, Report Western European Nuclear Regulators Association.



Klassifizierung:
Aktenzeichen/Referenz:
Titel:
Datum / Sachbearbeiter:

keine
33KRM.PIL / ENSI 33/809
Schlussbericht zum AGNEB-Projekt «Auslegung und Inventar des Pilotlagers»
24.05.2021 / [REDACTED]

Anhang 1: Bestimmungen der KEV zum Pilotlager

Art. 64 Elemente eines geologischen Tiefenlagers

Ein geologisches Tiefenlager besteht aus dem Hauptlager zur Aufnahme der radioaktiven Abfälle, aus einem Pilotlager und aus Testbereichen.

Art. 66 Pilotlager

1 Im Pilotlager ist das Verhalten der Abfälle, der Verfüllung und des Wirtgesteins bis zum Ablauf der Beobachtungsphase zu überwachen. Bei der Überwachung sind im Hinblick auf den Verschluss Daten zur Erhärtung des Sicherheitsnachweises zu ermitteln.

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

3 Bei der Auslegung des Pilotlagers sind folgende Grundsätze zu beachten:

- a. Die geologischen und hydrogeologischen Verhältnisse müssen mit denjenigen des Hauptlagers vergleichbar sein.
- b. Das Pilotlager muss vom Hauptlager räumlich und hydraulisch getrennt sein.
- c. Die Bauweise des Pilotlagers und die Art der Einlagerung der Abfälle und der Verfüllung müssen dem Hauptlager entsprechen.
- d. Das Pilotlager muss eine repräsentative kleine Menge von Abfällen enthalten.

Art. 69 Verschluss

1 Der Eigentümer eines geologischen Tiefenlagers hat beim Verschluss sämtliche noch offenen Teile des Tiefenlagers zu verfüllen und die für die Langzeitsicherheit und die Sicherung massgebenden Teile zu versiegeln.

2 Er hat im Projekt für den Verschluss insbesondere folgendes zu umschreiben:

- a. das Verfüllen und Versiegeln der Zugänge zu den Lagerräumen;
- b. die Überführung des Pilotlagers in einen langfristig sicheren Zustand;
- c. das Verfüllen und Versiegeln der Zugänge zum Tiefenlager;
- d. die Gewährleistung der Langzeitsicherheit.

3 Mit dem Verschluss hat er insbesondere zu gewährleisten, dass:

- a. keine unzulässige Freisetzung von Radionukliden über die verfüllten Zugänge erfolgt;
- b. die vor der Errichtung des Tiefenlagers bestehende Trennung der wasserführenden Gesteinsschichten langfristig wiederhergestellt wird;
- c. die Markierung des geologischen Tiefenlagers dauerhaft ist.



Klassifizierung: keine
Aktenzeichen/Referenz: 33KRM.PIL / ENSI 33/809
Titel: Schlussbericht zum AGNEB-Projekt «Auslegung und Inventar des Pilotlagers»
Datum / Sachbearbeiter: 24.05.2021 / [REDACTED]

Anhang 2: Vorgaben gemäss Richtlinie ENSI-G03 zum Pilotlager

Die Neuauflage der Richtlinie ENSI-G03, welche am 21.12.2020 veröffentlicht wurde, ersetzt die Richtlinie ENSI-G03 aus dem Jahr 2009. Sie stützt sich auf das Kernenergiegesetz vom 21. März 2003 (KEG; SR 732.1) und die Kernenergieverordnung vom 10. Dezember 2004 (KEV; SR 732.11) und beinhaltet die Konkretisierung der Auslegungsgrundsätze für geologische Tiefenlager gemäss Art. 11 Abs. 3 KEV sowie die Anforderungen an den Nachweis der Betriebs- und Langzeitsicherheit.

6.1 Überwachung

- a. Für die Bau-, Betriebs- und gegebenenfalls Nachverschlussphase eines geologischen Tiefenlagers ist stufengerecht ein integrales Überwachungsprogramm zu erstellen.
- b. Das integrale Überwachungsprogramm hat mindestens die Überwachung des geologischen Umfelds, die radiologische Umweltüberwachung, die radiologische Überwachung während der Betriebsphase, die Überwachung im Pilotlager sowie die messtechnische Überwachung während Bau und Betrieb zu umfassen.
- c. Der Zusammenhang zwischen den verschiedenen Überwachungsaspekten ist im integralen Überwachungsprogramm aufzuzeigen.
- d. Das integrale Überwachungsprogramm muss von den Entsorgungspflichtigen periodisch sowie zu den Bewilligungsgesuchen des geologischen Tiefenlagers auf seine Eignung hin geprüft, nach Bedarf aktualisiert und dem ENSI eingereicht werden.
- e. Die Überwachung eines geologischen Tiefenlagers und dessen geologischen Umfeldes müssen rechtzeitig und spätestens mit der Rahmenbewilligung aufgenommen und solange fortgeführt werden, bis das geologische Tiefenlager nicht mehr der Kernenergiegesetzgebung untersteht.
- f. Die Überwachung hat die Messungen aus der Standortcharakterisierung zu berücksichtigen.
- g. Der Einfluss der für die Überwachung vorgesehenen Installationen auf die Langzeitsicherheit ist aufzuzeigen und zu minimieren.
- h. Die Ergebnisse der Überwachung sind mit der periodischen Berichterstattung zu dokumentieren und dem ENSI einzureichen.
- i. Rückstellproben sind aufzubewahren und den Behörden bei Bedarf zur Verfügung zu stellen.

6.2 Pilotlager

- a. Die Auslegung des Pilotlagers muss ein Überwachungsprogramm zur zeitlichen Entwicklung des Pilotlagers und seines geologischen Umfeldes berücksichtigen.
- b. Störfälle im Pilotlager dürfen die Betriebs- und Langzeitsicherheit des geologischen Tiefenlagers nicht beeinträchtigen und umgekehrt.
- c. Ein Pilotlager ist vor Beginn der Einlagerung der entsprechenden Abfälle in das Hauptlager zu beschicken, zu verfüllen und zu versiegeln.
- d. Eine eventuelle Umlagerung der Abfälle aus dem Pilotlager in einen neu aufgefahrenen Lagertollen ist bei der Auslegung zu berücksichtigen.



Klassifizierung: keine
Aktenzeichen/Referenz: 33KRM.PIL / ENSI 33/809
Titel: Schlussbericht zum AGNEB-Projekt «Auslegung und Inventar des Pilotlagers»
Datum / Sachbearbeiter: 24.05.2021 / [REDACTED]

Die im Erläuterungsbericht enthaltenen Kommentare sind:

Zu Kapitel 6.1 «Überwachung»

Unter Überwachung wird eine über längere Zeiträume kontinuierliche oder periodische Beobachtung einer Eigenschaft oder Messung einer Kenngrösse verstanden. Die Überwachung eines geologischen Tiefenlagers erstreckt sich über alle Phasen der Realisierung und umfasst unterschiedliche Aspekte (vgl. Bst. b). Die Überwachung ist für jeden Überwachungsaspekt stufengerecht an die jeweilige Phase anzupassen. Dabei erfolgt der Übergang vom Überwachungskonzept über das Überwachungsprogramm bis zur Überwachung themenspezifisch, schrittweise und stufengerecht. Zum Beispiel beginnen gewisse Nullmessungen wie die seismische Überwachung bereits vor dem Rahmenbewilligungsgesuch. Gemäss den Vorgaben des ENSI für Etappe 3 des Sachplans geologische Tiefenlager ist mit dem Rahmenbewilligungsgesuch ein integrales Überwachungskonzept einzureichen, das sich über alle Phasen der Realisierung eines geologischen Tiefenlagers erstreckt und die relevanten Aspekte der Überwachung umfasst (z. B. Nullmessungen, Umweltüberwachung, Beobachtungen im geologischen Tiefenlager).

Die Abklärung von nicht radiologischen Auswirkungen der Tiefenlagerung durch die Betreiber eines Tiefenlagers ist erforderlich und unterliegt der Umweltschutzgesetzgebung sowie hinsichtlich der Umweltaspekte den Vorgaben der zuständigen Behörden. Diese Abklärung liegt ausserhalb des Geltungsbereichs der Richtlinie ENSI-G03. Die in der Richtlinie ENSI-G03 und im IAEA Safety Standard SSG-23 beschriebenen Vorgehensweisen können jedoch auch bei der Bewertung von Gefahren durch nicht radioaktive Abfälle und bei der Optimierung des Schutzes und der Sicherheit gegen alle potenziellen Gefahren von Nutzen sein. Beobachtungen, wie zum Beispiel die Überwachung von Tierarten in der Umgebung des Lagers sowie der Grundwasserverhältnisse und Quellen werden in vergleichbaren Projekten im Ausland vorgenommen.

Zu Bst. a: Im integralen Überwachungsprogramm wird gezeigt, wie die übergeordneten Ziele der Überwachung eines geologischen Tiefenlagers erreicht werden. Dazu werden belastbare Aussagen über die Zustände und Vorgänge in einem geologischen Tiefenlager und in dessen geologischem Umfeld ermittelt, um die Wirksamkeit des Barrierensystems zu beurteilen sowie das frühzeitige Erkennen von Entwicklungen und die Erhärtung des Sicherheitsnachweises zu ermöglichen. Eine Beschreibung allfälliger Synergien und Wechselwirkungen mit Überwachungsprogrammen Dritter und dem integralen Überwachungsprogramm sind Teil der Dokumentation. Gemäss Art. 23 KEV muss mit dem Rahmenbewilligungsgesuch ein Konzept für die Beobachtungsphase eingereicht werden. Diese Vorgabe wird in der Richtlinie auf das gesamte geologische Tiefenlager sowie alle Phasen der Realisierung des Lagers erweitert.

Zu Bst. b: Der Begriff der Überwachung wird im Rahmen eines geologischen Tiefenlagers breit verwendet. Für ein geologisches Tiefenlager sowie die dazugehörige Oberflächenanlage und Nebenzugangsanlagen gibt es mindestens die folgenden Überwachungsaspekte:

- Die bau- und betriebsbegleitende Überwachung des geologischen Umfelds umfasst geeignete Messungen für die Beurteilung der Betriebs- und Langzeitsicherheit, die Aussagen zum Verhalten des geologischen Tiefenlagers beziehungsweise seines Umfeldes erlauben. Die Überwachung des geologischen Umfeldes während des Baus und Betriebs dient auch der Vertrauensbildung, dass sich das geologische Tiefenlager auslegungskonform verhält. Sie ergänzt kontinuierlich die geologische und hydrogeologische Datenbasis für die Beurteilung der langfristigen Entwicklung des geologischen Tiefenlagers.



Klassifizierung: keine
Aktenzeichen/Referenz: 33KRM.PIL / ENSI 33/809
Titel: Schlussbericht zum AGNEB-Projekt «Auslegung und Inventar des Pilotlagers»
Datum / Sachbearbeiter: 24.05.2021 / [REDACTED]

- Die radiologische Umweltüberwachung zwecks Beweissicherung erfolgt in der Umgebung des geologischen Tiefenlagers. Sie dient der Beweissicherung für den Fall, dass während oder nach dem Bau eine Veränderung der Umwelteigenschaften auftritt oder angenommen werden muss. Sie hat insbesondere die Überwachung der Radioaktivität von Quell- und Grundwasser, Böden, Gewässern und Atmosphäre im Einflussgebiet eines geologischen Tiefenlagers einzubeziehen. Änderungen der Schüttung von Quellen können beispielsweise auf sicherheitsrelevante Lücken oder Abweichungen des hydrogeologischen Modells hinweisen.
- Nach dem ordnungsgemässen Verschluss des geologischen Tiefenlagers kann die Überwachung als Kontrolle und Vertrauensbildung dienen, dass keine unerwarteten Einflüsse des geologischen Tiefenlagers an der Erdoberfläche zu beobachten sind. Für die radiologische Umweltüberwachung sind ebenfalls die StSV und entsprechende Richtlinien des ENSI zu berücksichtigen. Unabhängig vom Betreiber eines geologischen Tiefenlagers überwacht der Bund die Umweltradioaktivität (Art. 191 bis 195 StSV). Entsprechende Aktivitäten werden durch das BAG und das ENSI gemeinsam koordiniert. Das ENSI überwacht dabei die ionisierende Strahlung und die Radioaktivität in der Umgebung der Kernanlagen.
- Die radiologische Überwachung zur Gewährleistung des Strahlenschutzes während der Betriebsphase findet gemäss den Vorgaben in den Richtlinien ENSI-G12 und ENSI-G13 statt. Der für die Umgebungsüberwachung relevante quellenbezogene Dosisrichtwert wird in der Betriebsbewilligung festgelegt. Die radiologische Überwachung beginnt zur Beweissicherung vor der erstmaligen Annahme von Abfällen.
- Die Überwachung im Pilotlager respektive der Experimente in den Testbereichen dienen dazu, die Prozesse bezüglich der Abfälle und der Sicherheitsbarrieren vor Ort zu beobachten und Daten zur Erhärtung des Sicherheitsnachweises zu ermitteln (Art. 65 und 66 KEV). Die Resultate dieser Überwachung liefern Grundlagen für den Verschluss des geologischen Tiefenlagers.
- Die messtechnische Überwachung während Bau und Betrieb muss die Beurteilung der Bau- und Betriebssicherheit der untertägigen Bauwerke und technologischen Barrieren erlauben, unter anderem mittels Überwachung der hydrogeologischen und geotechnischen Bedingungen sowie des Systemverhaltens (Interaktion zwischen Gebirge und Ausbau). Bei Bedarf sind aufgrund der Ergebnisse zusätzliche Massnahmen zu ergreifen, um die Sicherheit zu gewährleisten. Entsprechende Massnahmen werden bereits für die Untertagbauwerke vorgesehen, die im Rahmen der erdwissenschaftlichen Untersuchungen Untertag (EUU) gebaut werden sollen. Dazu wird auf die Grundsätze und Bestimmungen in den einschlägigen SIA-Normen verwiesen.

Zu Bst. c: Das integrale Überwachungsprogramm für ein geologisches Tiefenlager umfasst mindestens die in Bst. b aufgelisteten Überwachungsaspekte. Zur Übersicht über das integrale Überwachungsprogramm sollen die Zusammenhänge und die Abgrenzungen der verschiedenen Überwachungsaspekte klar aufgezeigt werden. Die Berichterstattung sollte nach Möglichkeit themenspezifisch aufgebaut sein.

Zu Bst. d: Die periodische (mit dem Entsorgungsprogramm bzw. der periodischen Berichterstattung oder den Bewilligungsgesuchen) Prüfung auf Eignung und die Aktualisierung nach Bedarf des integralen Überwachungsprogramms erfolgt gemäss Art. 36 KEV.

Zu Bst. e: Die Pflicht zur Überwachung eines geologischen Tiefenlagers erstreckt sich über mehrere Jahrzehnte und endet mit der Entlassung aus der Kernenergiegesetzgebung. Nach dem ordnungsgemässen Verschluss des geologischen Tiefenlagers kann eine zusätzliche befristete Überwachung angeordnet werden (Art. 39 Abs. 3 KEG). Die Überwachung eines geologischen Tiefenlagers muss rechtzeitig aufgenommen werden, sodass für die Beweissicherung genügend aussagekräftige Daten zur



Klassifizierung:
Aktenzeichen/Referenz:
Titel:
Datum / Sachbearbeiter:

keine
33KRM.PIL / ENSI 33/809
Schlussbericht zum AGNEB-Projekt «Auslegung und Inventar des Pilotlagers»
24.05.2021 / [REDACTED]

Verfügung stehen. Der jeweilige Zeitraum zur Überwachung eines Parameters wird im Rahmen des integralen Überwachungsprogramms individuell festgelegt. Dies gilt insbesondere für die Zeitdauer der Nullmessung vor den ersten Bauaktivitäten am Standort des geologischen Tiefenlagers. Im integralen Überwachungsprogramm wird dargestellt, welche Parameter mit einer Nullmessung erfasst werden sollen und welche Zeitdauer dafür vorgesehen ist.

Zu Bst. f: Die Bestimmung dient dazu sicherzustellen, dass bereits vorhandene Daten aus der Standortcharakterisierung, wie sie beispielsweise für die Standortwahl sowie im Rahmen der Erdwissenschaftlichen Untersuchungen Untertag (Kap. 7.1) erhoben wurden, im integralen Überwachungsprogramm berücksichtigt werden.

Zu Bst. h: Die periodische Berichterstattung zur Überwachung ist in Art. 37 und Anhang 5 KEV geregelt.

Zu Bst. i: Durch Dokumentation der Resultate aus der Überwachung, einschliesslich der Archivierung von Proben (sogenannten Rückstellproben) daraus, soll die Möglichkeit offengehalten werden, erweiternde Untersuchungen anzusetzen, wenn beispielsweise neue Analyseverfahren entwickelt worden sind oder die Notwendigkeit für unabhängige Messungen erkannt wird. Rückstellproben sollen spätere sicherheitsrelevante Kontrollmessungen bis zum Abschluss der behördlichen Beurteilung der Sicherheit eines geologischen Tiefenlagers ermöglichen. Das Vorgehen bei der Auswahl von Rückstellproben sowie deren Ziel und Zweck sind Teile des integralen Überwachungsprogramms. Die Aufbewahrungspflicht endet spätestens mit der Entlassung aus der Kernenergiegesetzgebung.

Zu Kapitel 6.2 «Pilotlager»

In Art. 66 KEV sind Aspekte zur Auslegung des Pilotlagers bereits detailliert geregelt. Für seinen Zweck muss das Pilotlager in der Bauweise und im Inventar repräsentativ für das Hauptlager sein. Im Gegensatz zum Hauptlager muss das Pilotlager mit Überwachungseinrichtungen instrumentiert und entsprechend ausgelegt werden. Dazu kann das Pilotlager aus einer oder mehreren Kavernen beziehungsweise einem oder mehreren Stollenabschnitten bestehen. Im Pilotlager und seiner Umgebung soll die Wirksamkeit des Barrierensystems überwacht werden. Dies soll Schlüsse auf das korrekte Funktionieren des Hauptlagers ermöglichen. Das Pilotlager dient dazu, physikalische und chemische Vorgänge im Hauptlager an einem realistischen Abbild zu beobachten. Es dient auch der Information der Bevölkerung über die Entwicklungen des Hauptlagers während der Beobachtungsphase.

Die Dauer der Beobachtungsphase in der Schweiz wird anhand aktualisierter Unterlagen nach Abschluss der Einlagerung der Abfälle durch das UVEK festgelegt (Art. 68 KEV). Die Verordnung über den Stilllegungsfonds und den Entsorgungsfonds für Kernanlagen vom 7. Dezember 2017 (SEFV; SR 732.17) geht für die Berechnung der Entsorgungskosten von einer Dauer der Beobachtungsphase von fünfzig Jahren aus. Unter Berücksichtigung der Dauer für Bau, Einlagerungsbetrieb, Beobachtungsphase und Verschluss dürfte die Standfestigkeit der unterirdischen Bauwerke auf über hundert Jahre auszurichten sein. Das Projekt für die Beobachtungsphase ist alle zehn Jahre zu überprüfen und nachzuführen (Art. 42 KEV). Eine zu lange Beobachtungsphase kann die Langzeitsicherheit gefährden, zum Beispiel durch das verlängerte Offenhalten von Hohlräumen und einen allfälligen Kontrollverlust über das Tiefenlager, ohne dass ein signifikanter Mehrwert an Informationen zu erwarten ist.

Zu Bst. a: Um die Verhältnisse im Pilotlager zu verfolgen und Anzeichen von ungünstiger Wechselwirkung zwischen Barrieren zu erkennen, können zum Beispiel folgende Aspekte überwacht werden:

- zeitliche Entwicklung der Temperaturverteilung
- Wasseraufsättigung
- Druckverhältnisse (Wasser, Gas, Gebirge)



Klassifizierung: keine
Aktenzeichen/Referenz: 33KRM.PIL / ENSI 33/809
Titel: Schlussbericht zum AGNEB-Projekt «Auslegung und Inventar des Pilotlagers»
Datum / Sachbearbeiter: 24.05.2021 / [REDACTED]

- felsmechanisches Verhalten des Gebirges und Mikroseismizität
- chemische Parameter der Poren- und Kluftwässer
- Gasentwicklung aus den Abfallgebinden.

Viele der im Hauptlager erwarteten Prozesse laufen viel zu langsam ab, als dass sie während der Beobachtungsphase im Pilotlager erfasst werden könnten. Es ist daher zu erwarten, dass durch die Überwachung nur ausgewählte Aspekte des Sicherheitsnachweises bestätigt werden können. Die Überwachung kann aber auch helfen, unerwartete Vorgänge zu erkennen.

Zu Bst. b: Die Anforderung ergänzt die vorgegebene räumliche und hydraulische Trennung gemäss Art. 66 Abs. 3 Bst. b KEV.

Zu Bst. c: Um eine möglichst lange Beobachtungsdauer zu erreichen und frühzeitig auf möglicherweise warnende Erkenntnisse aus der Beobachtung des Pilotlagers reagieren zu können, sollen die Beschickung und die Überwachung des Pilotlagers vor dem Beginn der Einlagerung im Hauptlager erfolgen.

Zu Bst. d: Die Überwachungseinrichtungen könnten die langfristige Wirkung der Barrieren des Pilotlagers beeinträchtigen und damit dessen Langzeitsicherheit gefährden. Daher ist bei der Auslegung der untertägigen Bauwerke zu berücksichtigen, dass für die Überführung des Pilotlagers in einen langfristig sicheren Zustand eine Umlagerung der Abfälle aus dem Pilotlager in einen neu aufgefahrenen Lagertollen notwendig sein kann.



Klassifizierung:
Aktenzeichen/Referenz:
Titel:
Datum / Sachbearbeiter:

keine
33KRM.PIL / ENSI 33/809
Schlussbericht zum AGNEB-Projekt «Auslegung und Inventar des Pilotlagers»
24.05.2021 / [REDACTED]

Anhang 3: Vorgehen der Nagra bei der Realisierung des Pilotlagers gemäss des Entsorgungsprogramms 2016

Die Nagra hat im Entsorgungsprogramm 2016 (NTB 16-01) einen Realisierungsplan für das geologische Tiefenlager erstellt. Darin werden sowohl die Testbereiche, die im Zuge der erdwissenschaftlichen Untersuchungen untertage (EUU) als auch das Pilotlager aufgeführt. Im Folgenden werden Ausschnitte des Realisierungsplans und die Tabellen mit den einzelnen Phasen wiedergegeben. Die Tabellen wurden so angepasst, dass die Elemente mit Zusammenhang zu den Testbereichen bzw. dem Pilotlager herausgestellt werden.

Bau, Betrieb, Überwachung und Verschluss der Anlage (NTB 16-01): Im Anschluss an die Baubewilligung werden die für die Aufnahme des Einlagerungsbetriebs notwendigen Anlagen erstellt. In dieser Phase erfolgt im Rahmen behördlicher Verfahrensschritte die Umnutzung von Bauten für erdwissenschaftliche Untersuchungen untertage in Testbereiche als Bestandteil des geologischen Tiefenlagers (s. Kap. 5.1). Im Testbereich werden Langzeitexperimente, die im Rahmen von EUU initiiert wurden, weitergeführt sowie vor Inbetriebnahme des Tiefenlagers sicherheitsrelevante Techniken erprobt und deren Funktionstüchtigkeit nachgewiesen. Parallel zum Bau wird das Gesuch für die nukleare Betriebsbewilligung ausgearbeitet und eingereicht. Nach Erhalt der Betriebsbewilligung beginnt der Einlagerungsbetrieb. Zuerst werden die Abfälle in das Pilotlager eingelagert. Danach beginnt die Einlagerung der BE und HAA in die Lagerstollen. Parallel zur Einlagerung werden weitere BE/HAA-Lagerstollen erstellt. Nach Abschluss der Einlagerung beginnt die Beobachtungsphase. Das Konzept der geologischen Tiefenlagerung vereint das Konzept der Endlagerung in geologischen Formationen mit der Möglichkeit der Rückholung, es gewährleistet also eine gewisse Reversibilität (EKRA 2000). Dies bedeutet, dass vor dem Verschluss eines geologischen Tiefenlagers dessen Entwicklung u. a. anhand des Pilotlagers längere Zeit beobachtet wird. Während dieser Zeit sollen die Abfälle ohne grösseren Aufwand zurückgeholt werden können. Für Planungszwecke wird gemäss SEFV Art. 3 von einer Beobachtungsphase von 50 Jahren ausgegangen; deren Dauer kann aber bei Bedarf angepasst werden. Der Bundesrat ordnet nach Ablauf der Beobachtungsphase die Verschlussarbeiten an, wenn der dauernde Schutz von Mensch und Umwelt gewährleistet ist (KEG Art. 39 Abs. 2). Nach ordnungsgemäsem Verschluss befindet sich das geologische Tiefenlager in der Nachverschlussphase. Der Bundesrat verfügt nach Ablauf einer allfälligen weiteren, befristeten Überwachung von der Oberfläche (KEG Art. 39 Abs. 3) die Entlassung der einzelnen verschlossenen Tiefenlager aus der Kernenergiegesetzgebung (KEG Art. 39 Abs. 4). Die Verantwortung für die verschlossenen geologischen Tiefenlager geht auf den Bund über. Dieser kann im Rahmen der Langzeitüberwachung weitergehende Massnahmen nach diesem Zeitpunkt, insbesondere eine Umweltüberwachung, durchführen (KEG Art. 39 Abs. 4). In den folgenden Tabellen sind die für das Pilotlager und die Testbereiche relevanten Aktivitäten aufgeführt.



Klassifizierung:
 Aktenzeichen/Referenz:
 Titel:
 Datum / Sachbearbeiter:

keine
 33KRM.PIL / ENSI 33/809
 Schlussbericht zum AGNEB-Projekt «Auslegung und Inventar des Pilotlagers»
 24.05.2021 / [REDACTED]

Nach NTB-16-01, Tabelle A.4-1: Wichtigste Aktivitäten bezüglich erdwissenschaftliche Untersuchungen untertag, Testbereichen und Pilotlager in den verschiedenen Phasen (HAA-Lager) gemäss dem Realisierungsplan. Die Kommentare des ENSI zu den wichtigsten Aktivitäten sind kursiv wiedergegeben.

Phase	Zeitperiode	Ziel	Wichtigste Aktivitäten
Standortwahl	2021	Entsorgungsprogramm 2021	<i>Erfüllung der Auflage des Bundesrats: Die Nagra hat im nächsten Entsorgungsprogramm Umfang und Inhalt der Messungen zur Überwachung eines Pilotlagers für HAA bzw. SMA weiter zu konkretisieren und die aktuellen Erkenntnisse hinsichtlich des Aspekts der Interpretation bzw. Interpretierbarkeit der erfassten Messwerte sowie hinsichtlich der Gewährleistung der Übertragbarkeit der gewonnenen Erkenntnisse auf das Hauptlager darzulegen.</i>
Standortwahl	2019-2024	Rahmenbewilligungsgesuch	<i>Der Gesuchsteller hat mit dem Rahmenbewilligungsgesuch für den gewählten Standort ein integrales Konzept für die Überwachung des Tiefenlagers inklusive des Pilotlagers einzureichen. Das Konzept für die Überwachung erstreckt sich über alle Phasen der Realisierung eines geologischen Tiefenlagers (inkl. Beobachtungsphase) und umfasst die relevanten Aspekte der Überwachung.</i>
Rahmenbewilligung	2025-2031	Rahmenbewilligung	Behördliche Prüfung der Unterlagen, Entscheid Bundesrat, Genehmigung durch Parlament, fakultatives nationales Referendum
	2027-2031	Bewilligung erdwissenschaftlicher Untersuchungen untertag	Bewilligungsverfahren für bewilligungspflichtige Feldarbeiten (erdwissenschaftliche Untersuchungen untertag, Ergänzung der Untersuchungen von der Oberfläche)
Vorbereitung und Beginn der erdwissenschaftlichen Untersuchungen untertag (EUU)	2032-2037	Vorbereitungsarbeiten und Beginn erdwissenschaftlicher Untersuchungen untertag	Vorbereitungsarbeiten und Beginn erdwissenschaftlicher Untersuchungen untertag (begleitende Charakterisierung bei der Erstellung Sondierzugänge untertag, Beginn erster Experimente untertag); Ergänzung der Untersuchungen von der Oberfläche
Weiterführung der erdwissenschaftlichen Untersuchungen untertag (EUU)	2038 – 2048 (– 2124)	Weiterführung erdwissenschaftlicher Untersuchungen untertag	Aufbau und Durchführung von Experimenten untertag und Beobachtung, Synthesen, Vorbereitung Unterlagen nukleares Baubewilligungsverfahren



Klassifizierung:
Aktenzeichen/Referenz:
Titel:
Datum / Sachbearbeiter:

keine
33KRM.PIL / ENSI 33/809
Schlussbericht zum AGNEB-Projekt «Auslegung und Inventar des Pilotlagers»
24.05.2021 / [REDACTED]

Phase	Zeitperiode	Ziel	Wichtigste Aktivitäten
	2045 – 2048	Nukleare Baubewilligung	Überarbeitung des integralen Konzepts und Programms für die Überwachung (Pilotlager)
Bau Lager	2049 – 2059	Bau Lager	Bau Oberflächenanlage (inkl. Verpackungsanlage)/untertägige Bauten, inklusive Ausrüstung, Vorbereitung Unterlagen nukleares Betriebsbewilligungsverfahren
	2056 – 2059	Nukleare Betriebsbewilligung	Behördliche Prüfung der Unterlagen, Aktualisierung des Überwachungskonzepts bzw. -programms, Entscheid UVEK
Einlagerungsbetrieb	2060 – 2074	Betrieb Lager	Antransport der Abfallgebinde, Verpackung/Einlagerung in Pilot- und Hauptlager, Verfüllung und Verschluss der Lagerkammern, fortlaufende Erstellung neuer Lagerstollen BE/HAA, periodische Sicherheitsanalysen/Berichterstattung
Beobachtungsphase	2075 – 2124	Beobachtungsphase	Messungen Pilotlager, weitere Überwachungsaktivitäten, periodische Berichterstattung
	2075 – 2080	Stilllegung/Rückbau der nuklearen Elemente der Oberflächenanlage	Stilllegung und Rückbau Verpackungsanlage
	2085 – 2090	Verschluss Hauptlager/teilweise Rückbau der Oberflächenanlage	Verschluss Haupt- und Pilotlager inkl. nicht mehr benötigter Zugänge von der Oberfläche nach Untertag, Weiterführung Rückbau Oberflächenanlage (konventionell)
Verschluss Gesamtlager	2125 – 2126	Ordnungsgemässer Verschluss Gesamtlager	Vorbereitungsarbeiten, Verfüllung und Versiegelung noch verwendeter Testbereiche und offener Zugänge, der untertägigen Anlagen Markierung des Tiefenlagers, vollständiger Rückbau der Oberflächenanlagen, allfällige Renaturierung



Klassifizierung:
 Aktenzeichen/Referenz:
 Titel:
 Datum / Sachbearbeiter:

keine
 33KRM.PIL / ENSI 33/809
 Schlussbericht zum AGNEB-Projekt «Auslegung und Inventar des Pilotlagers»
 24.05.2021 / [REDACTED]

Nach NTB-16-01, Tabelle A.4-2: Wichtigste Aktivitäten bezüglich erdwissenschaftliche Untersuchungen untertag, Testbereichen und Pilotlager in den verschiedenen Phasen (SMA-Lager) gemäss dem Realisierungsplan. Die Kommentare des ENSI zu den wichtigsten Aktivitäten sind kursiv wiedergegeben.

Phase	Zeitperiode	Ziel	Wichtigste Aktivitäten
Standortwahl	2021	Entsorgungsprogramm 2021	<i>Erfüllung der Auflage des Bundesrats: Die Nagra hat im nächsten Entsorgungsprogramm Umfang und Inhalt der Messungen zur Überwachung eines Pilotlagers für HAA bzw. SMA weiter zu konkretisieren und die aktuellen Erkenntnisse hinsichtlich des Aspekts der Interpretation bzw. Interpretierbarkeit der erfassten Messwerte sowie hinsichtlich der Gewährleistung der Übertragbarkeit der gewonnenen Erkenntnisse auf das Hauptlager darzulegen.</i>
Standortwahl	2019-2024	<i>SGT Etappe 3: Feldarbeiten, Wahl Standort für RBG, Vorbereitung und Erstellung RBG</i>	<i>Der Gesuchsteller hat mit dem Rahmenbewilligungsgesuch für den gewählten Standort ein integrales Konzept für die Überwachung des Tiefenlagers inklusive des Pilotlagers einzureichen. Dieses erstreckt sich über alle Phasen der Realisierung eines geologischen Tiefenlagers (inkl. Beobachtungsphase) und umfasst die relevanten Aspekte der Überwachung.</i>
Rahmenbewilligung	2025-2031	Rahmenbewilligung	Behördliche Prüfung der Unterlagen, Entscheid Bundesrat, Genehmigung durch Parlament, fakultatives nationales Referendum
	2027-2031	Bewilligung erdwissenschaftlicher Untersuchungen untertag	Bewilligungsverfahren für bewilligungspflichtige Feldarbeiten (erdwissenschaftliche Untersuchungen untertag, Ergänzung der Untersuchungen von der Oberfläche)
Vorbereitung und Beginn der erdwissenschaftlichen Untersuchungen untertag (EUU)	2032-2035	Vorbereitungsarbeiten und Beginn erdwissenschaftlicher Untersuchungen untertag	Vorbereitungsarbeiten und Beginn erdwissenschaftlicher Untersuchungen untertag (begleitende Charakterisierung bei der Erstellung Sondierzugänge untertag, Beginn erster Experimente untertag); Ergänzung der Untersuchungen von der Oberfläche
Weiterführung der erdwissenschaftlichen Untersuchungen untertag (EUU)	2036 – 2044 (– 2114)	Weiterführung erdwissenschaftlicher Untersuchungen untertag	Aufbau und Durchführung von Experimenten untertag und Beobachtung, Synthesen, Vorbereitung Unterlagen nukleares Baubewilligungsverfahren



Klassifizierung:
Aktenzeichen/Referenz:
Titel:
Datum / Sachbearbeiter:

keine
33KRM.PIL / ENSI 33/809
Schlussbericht zum AGNEB-Projekt «Auslegung und Inventar des Pilotlagers»
24.05.2021 / [REDACTED]

Phase	Zeitperiode	Ziel	Wichtigste Aktivitäten
	2041 – 2044	Nukleare Baubewilligung	<i>Überarbeitung des integralen Konzepts und Programms für die Überwachung (Pilotlager)</i>
Bau Lager	2045 – 2049	Bau Lager	Bau Oberflächenanlage (inkl. Verpackungsanlage)/untertägige Bauten, inklusive Ausrüstung, Vorbereitung Unterlagen nukleares Betriebsbewilligungsverfahren
	2046 – 2049	Nukleare Betriebsbewilligung	Behördliche Prüfung der Unterlagen, <i>Aktualisierung des Überwachungskonzepts bzw. -programms</i> , Entscheidung UVEK
Einlagerungsbetrieb	2050 – 2064	Betrieb Lager	Antransport der Abfallgebinde, Verpackung/Einlagerung in Pilot- und Hauptlager, Verfüllung und Verschluss der Lagerkammern, periodische Sicherheitsanalysen/Berichterstattung
Beobachtungsphase	2065 – 2114	Beobachtungsphase	Messungen Pilotlager, weitere Überwachungsaktivitäten, periodische Berichterstattung
	2065 – 2070	Stilllegung/Rückbau der nuklearen Elemente der Oberflächenanlage	Stilllegung und Rückbau Verpackungsanlage
	2075 – 2080	Verschluss Hauptlager/teilweise Rückbau der Oberflächenanlage	Verschluss Haupt- und Pilotlager inkl. nicht mehr benötigter Zugänge von der Oberfläche nach Untertag, Weiterführung Rückbau Oberflächenanlage (konventionell)
Verschluss Gesamtlager	2115 – 2118	Ordnungsgemässer Verschluss Gesamtlager	Vorbereitungsarbeiten, Verfüllung und Versiegelung noch verwendeter Testbereiche und offener Zugänge, der untertägigen Anlagen Markierung des Tiefenlagers, vollständiger Rückbau der Oberflächenanlagen, allfällige Renaturierung



Klassifizierung: keine
Aktenzeichen/Referenz: 33KRM.PIL / ENSI 33/809
Titel: Schlussbericht zum AGNEB-Projekt «Auslegung und Inventar des Pilotlagers»
Datum / Sachbearbeiter: 24.05.2021 / [REDACTED]

Anhang 4: Forschungsaktivitäten der Nagra zum Pilotlager (NTB 16-02)

7.7 Development of the concept for repository monitoring

Objectives

One of the basic design principles is that long-term safety is provided through passive safety with a multibarrier concept (KEV Art. 11 and ENSI 2009). Monitoring should not compromise the performance of the passive barriers after closure.

In the early stages, however, monitoring features prominently in the development and implementation of a geological repository, because it can provide repository implementers, expert reviewers (e.g. safety authorities) and lay (e.g. public) stakeholders with in-situ data over the different phases of the repository project. The observed data may be used to confirm the predicted very early repository evolution, contribute to operational safety and provide input for the staged repository implementation and closure process (construction, operation and closure). Comparison of the monitoring results with prior performance assessments and process models contributes to increased stakeholder confidence regarding the disposal system.

The objective for the next RD&D phase is to develop a concept, and eventually detailed methods and techniques, for reliable surface-based and underground monitoring of a repository. Surface-based monitoring will ultimately have to cover the radiological and environmental monitoring of the surface facility and its surroundings, the groundwater, surface water, soil, and atmosphere (ENSI 2009), as well as surface movements in the region of the repository. Underground monitoring covers the following phases of repository implementation: detailed site investigation, construction of exploration tunnels and shafts, construction and operation of the facilities for underground geological investigations (later test area), construction and operation of the pilot and main facility and the observation period (post-waste emplacement monitoring). A key feature of the underground monitoring concept is the monitoring of a pilot facility containing a representative amount of waste, as defined by EKRA (SFOE 2000) and ENSI (2009). In the pilot facility, underground monitoring will comprise monitoring of the engineered and geological barriers as well as seal sections. In the far-field rock, repository-induced effects can be monitored using surface-based observation methods such as boreholes for hydrological changes in deep aquifers or temperature changes.

The first monitoring concept to be developed for the general licence application will cover baseline monitoring of the initial state and monitoring during construction of the access facilities, as well as first considerations regarding monitoring planned for the facilities for underground geological investigations and the pilot facility.

Current state-of-the-art and progress since the 2009 RD&D Plan

Studies since the 2009 RD&D Plan have focused on monitoring concepts, strategic aspects and the link to safety analysis, as well as practical work on the development and testing of monitoring techniques and sensors.

Monitoring concept and international research

Valuable knowledge transfer to Nagra was provided by European projects and other bi- and multilateral projects. Basic considerations regarding the development of monitoring concepts, equipment and



Klassifizierung:
Aktenzeichen/Referenz:
Titel:
Datum / Sachbearbeiter:

keine
33KRM.PIL / ENSI 33/809
Schlussbericht zum AGNEB-Projekt «Auslegung und Inventar des Pilotlagers»
24.05.2021 / [REDACTED]

methods were completed in the project "Monitoring developments for safe repository operation and staged closure" (MoDeRn) within the 7th EU Framework Programme. Conceptual research was done on monitoring concepts and the link to safety analysis and the concerns of lay stakeholders (MoDeRn 2013a). Within MoDeRn, several state-of-the-art monitoring techniques and technologies (e.g. wireless data transmission, non-intrusive monitoring techniques, fiber-optic sensing) were identified as suitable for a repository and were further developed (MoDeRn 2013b). Moreover, Nagra participated in two further research projects within the 7th EU Framework Programme, namely the international project "Full-scale Demonstration Of Plugs And Seals" (DOPAS), where knowledge about plug and seal monitoring is currently being generated, and the international "Large Underground Concept Experiments" (LU-COEX) project, where state-of-the-art and novel monitoring techniques are being successfully used (e.g. Sakaki et al. 2015).

Use of monitoring techniques and sensors in URLs

State-of-the-art monitoring techniques and prototype sensors have been used successfully in a large number of in-situ experiments in underground laboratories. Some experiments were dedicated to further developing, evaluating and testing different sensor and monitoring technologies.

At the Mont Terri Rock Laboratory, the Full-Scale Emplacement (FE) experiment, which is a long-term full-scale heater test, will provide valuable information for the monitoring concept of the pilot facility, because different monitoring technologies were implemented to compare and evaluate their performance under repository-like conditions (Vogt et al. 2015). The heating phase started in December 2014, but initial valuable experience was obtained during sensor installation, tunnel construction, the ventilation period, emplacement and backfilling (Vogt et al. 2013). A special method used in the FE experiment is fiber-optic sensing for THM monitoring. Different distributed fiber-optic sensing systems for temperature and strain measurements as well as point and quasi-distributed systems were installed. Monitoring during tunnel construction in the Opalinus Clay was done successfully with state-of-the-art equipment in the "Mine By" (MB) and FE experiments at Mont Terri. Non-intrusive geophysical monitoring techniques are being tested and further developed at the Grimsel Test Site in the "Test and Evaluation of Monitoring Systems" (TEM) experiment and at Mont Terri in the "Gas path through host rock and along seals" (HG-A) and FE experiments (Marelli et al. 2010). Wireless data transmission is being tested in the long-term TEM experiment at the GTS (Breen et al. 2012). At Mont Terri, the long-term evolution of hydraulic heads in Opalinus Clay around the URL was investigated by the "Long-term monitoring of pore pressures" (LP) experiment, designed to better understand construction-induced effects and the evolution of water flow (Ababou et al. 2012). In addition, similar to dismantling of the Swedish prototype repository (Nilsson 2014), the dismantling of the remaining part of the FEBEX experiment at the Grimsel Test Site and the dismantling of the "Engineered Barriers" (EB) experiment at Mont Terri allowed the evaluation of the durability and reliability of typical sensors after decades of varying and challenging monitoring conditions (Martínez et al. 2016).

In addition, close cooperation with partner organisations, some of which are more advanced in their disposal projects, resulted in valuable knowledge transfer to Nagra. Close collaboration with Andra on fiber-optic sensing provided knowledge transfer with respect to installation and operation (Delepine-Lesoille et al. 2015), as well as the development of radiation- and hydrogen-resistant optical fibers.



Klassifizierung:	keine
Aktenzeichen/Referenz:	33KRM.PIL / ENSI 33/809
Titel:	Schlussbericht zum AGNEB-Projekt «Auslegung und Inventar des Pilotlagers»
Datum / Sachbearbeiter:	24.05.2021 / [REDACTED]

Monitoring projects implemented in the siting regions

Since the 2009 RD&D Plan, two surface monitoring projects, namely the permanent broadband seismic monitoring network (Plenkens 2014) and the permanent GNSS network (Studer & Zanini 2013; Fig. 7-24), have been implemented to monitor recent neotectonic movements. In the siting region Zürich Nordost, the Benken deep borehole was equipped in 2009 with a new long-term monitoring system for observations of hydraulic heads in Opalinus Clay and its surrounding formations and aquifers (Jaeggi & Frieg 2010).

Planned RD&D within the next 5 to 10 years

The development of a concept for repository monitoring is a stepwise procedure. Therefore, the planned RD&D monitoring activities are closely linked to standards set by the regulator as well as international research activities and their results. While Nagra has to develop a monitoring plan for the pilot facility at the conceptual level in the first instance, decades will pass until the monitoring of the pilot facility starts, and significant technological development on monitoring techniques is expected, especially for fiber-optic sensing, wireless data transmission and nonintrusive monitoring techniques.

Regulatory requirements and international research

In the near future, ENSI will complete two research projects directly dedicated or linked to monitoring. ENSI is leading the Swiss Federal Workgroup for Nuclear Waste Disposal (AGNEB) research projects "Monitoringkonzept und -einrichtungen" (monitoring concept and installations) to clarify the regulatory monitoring requirements, as well as "Auslegung und Inventar des Pilotlagers" (design and inventory of the pilot facility), which also influences the monitoring concept for the pilot facility.

Participation in international research projects as well as bi- or multilateral projects and close cooperation with partner organisations, which are more advanced in their disposal projects, are ongoing and will allow learning from their experience. In 2015, the monitoring project Modern2020, which is the follow-up project of Modern, was launched within the Horizon 2020 framework (Euratom). The Modern2020 project aims at providing the means for developing and implementing an effective and efficient repository monitoring programme, taking into account the requirements of specific national programmes, e.g. a pilot facility. Within Modern2020, and based on Project Entsorgungsnachweis (Nagra 2002c), Nagra will identify EBS and host rock parameters to be included in the monitoring programmes to be developed at different stages of repository implementation. After Modern2020, these basic concepts will be further developed to provide a comprehensive monitoring concept for the general licence application. Further RD&D needs in the field of monitoring technologies were identified in MoDeRn (2013b). Therefore, Modern2020 will conduct research on what should be monitored, the design of monitoring systems and the improvement and further development of innovative monitoring techniques, including their demonstration in full-scale experiments. Within Modern2020, Nagra will further develop fiber-optic monitoring techniques.

Generic URLs

Progress in technological and methodological developments as well as feasibility testing for repository monitoring is expected from several experiments that are already initiated or will be implemented in the Swiss rock laboratories. Current long-term experiments in which monitoring plays an important role are running at the Grimsel Test Site, namely TEM and GAST, and at Mont Terri, namely the FE, HE-E, HG,



Klassifizierung:
Aktenzeichen/Referenz:
Titel:
Datum / Sachbearbeiter:

keine
33KRM.PIL / ENSI 33/809
Schlussbericht zum AGNEB-Projekt «Auslegung und Inventar des Pilotlagers»
24.05.2021 / [REDACTED]

LP and the "deep borehole" (DB) experiments. The FE experiment (see section 6.2) will provide valuable information as THM processes are investigated at a 1:1 scale under realistic conditions and state-of-the-art as well as novel monitoring systems are implemented to compare and evaluate their performance (Vogt et al. 2015). The temperature distributions over time along the tunnel which contains three heaters that were switched on during the first few months of 2015 are shown in Fig. 7-25. In addition, the gas composition in the sealed section of the FE experiment will be investigated by in-situ gas sensors and sampling campaigns.

Baseline monitoring

Baseline monitoring will start with the detailed site investigations that will begin after granting of the general licence and will be intensified before construction work (access tunnel and shaft construction) begins. The RD&D activities up to general licence application with respect to environmental baseline monitoring are performed as part of the joint activity of the IGD-TP, which focuses on development of programmes for monitoring the environmental reference state. Meteorological measurements and a radiological monitoring programme will be set up according to the specifications of the authorities. These programmes will be similar to the already existing radiological monitoring networks MADUK and NADAM. For surface monitoring of ground movements and seismicity, the first GNSS and seismic stations are already installed in the siting regions and further stations and remote sensing techniques will be added for the selected site(s). New technological developments in this field will be regularly assessed. Moreover, Nagra's current monitoring activities in the siting regions, e.g. groundwater monitoring during 3D seismic campaigns, will be transferred to the baseline monitoring programme.

For baseline monitoring of the subsurface, a network of shallow and deep observation boreholes, mainly from the earlier site investigation phase prior to the general licence application, will be established and equipped with long-term monitoring systems. Monitoring targets and planned equipment for the exploration boreholes will be periodically updated in the light of new technical developments when existing systems have to be replaced, e.g. fiber-optic pressure sensors.

Underground monitoring concept for the facilities for underground geological investigations

The underground monitoring concept for construction and experiments related to the on-site facilities for underground geological investigations will focus on engineering feasibility, operational safety and long-term safety. For excavation work and THM characterisation tests, state-of-the-art equipment as well as experience from other URLs will be used. Until the application for the construction licence, the focus will be on concept development and technology screening for both surface and underground monitoring.