Endlagerkonzept im Tonstein (Frankreich)

Bericht zum Arbeitspaket 1

Anhang 2

Anforderungen an aktuelle Endlagerkonzepte für unterschiedliche Wirtsgesteinsformationen

GRS - 471 Anhang 2

Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH

Endlagerkonzept im Tonstein (Frankreich)

Anforderungen an aktuelle Endlagerkonzepte für unterschiedliche Wirtsgesteinsformationen

Bericht zum AP 1

Anhang 02

Angelika Krischer

Juli 2017

Auftrags-Nr.: 857778

Anmerkung:

Das diesem Bericht zu Grunde liegende FE-Vorhaben 3616E03200 wurde im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit durchgeführt. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Auftragnehmer.

Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung des Auftragnehmers wieder und muss nicht mit der Meinung des Auftraggebers übereinstimmen

GRS-471
ISBN 978-3-946607-54-0

Deskriptoren

Projekt Cigéo, Endlagerkonzept, Ton

Kurzfassung

International hat sich für die Entsorgung von überwiegend wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen die Endlagerung in tiefen geologischen Formationen durchgesetzt. Die Abfallart und die geologischen Gegebenheiten am Endlagerstandort haben dabei Einfluss auf das Endlagerkonzept. Im Vorhaben 3616E03200 mit dem Titel „Anforderungen an aktuelle Endlagerkonzepte für unterschiedliche Wirtsgesteinsformationen“ werden unterschiedliche Endlagerkonzepte in den verschiedenen Wirtsgesteinen Salz, Ton / Tonstein und Granit betrachtet und daraus Grundanforderungen an die jeweiligen Konzepte abgeleitet. Das Vorhaben verfolgt das Ziel, im Zuge der Begleitung des Standortauswahlverfahrens verschiedene Endlagerstandorte und damit verbunden auch verschiedene Endlagerkonzepte vergleichbar machen zu können. Der vorliegende Bericht stellt das Endlagerprojekt Cigéo in Frankreich vor. Dort sollen hochradioaktive und langlebige mittelradioaktive Abfälle in Tongestein endgelagert werden.

Inhaltsverzeichnis

	Kurzfassung	**I**
1	**Einleitung**	**1**
2	**Projekt Cigéo**	**3**
2.1	Gesetzliche Vorgaben und Zeitplan	3
2.1	Lage und Wirtsgestein	5
3	**Konzept**	**9**
3.1	Abfälle	9
3.2	Behälter	10
3.2.1	HLW	11
3.2.2	ILW-LL	13
3.3	Einrichtungen	15
3.3.1	Übertägige Einrichtungen	15
3.3.2	Rampen	17
3.3.3	Schächte	19
3.3.4	Untertägige Einrichtungen	21
3.4	Co-Disposal	25
3.5	Verschluss	25
3.6	Rückholbarkeit	27
3.7	Monitoring	28
4	**Anforderungen**	**33**
4.1	Anforderungen aus dem französischen Endlagerkonzept	33
	Abkürzungsverzeichnis	**35**
	Abbildungsverzeichnis	**36**
	Tabellenverzeichnis	**37**
	Literaturverzeichnis	**38**

1 Einleitung

Der vorliegende Bericht ist Teil des Arbeitspakets 1 „Ableitung von Grundanforderungen an Endlagerkonzepte in Salz, Ton/Tonstein und Granit“ im Vorhaben „Anforderungen an aktuelle Endlagerkonzepte für unterschiedliche Wirtsgesteinsformationen“ unter der Vorhabensnummer 3616E03200.

Im Hinblick auf das Auswahlverfahren für Endlagerstandorte für vorwiegend wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle müssen die Grundlagen für einen Vergleich von Endlagerstandorten geschaffen werden. Dabei ist es notwendig, nicht nur die geologischen Gegebenheiten, sondern damit verbunden auch die wirtsgesteinsspezifischen Endlagerkonzepte zu betrachten. Aus diesem Grund werden im o. g. Projekt verschiedene internationale Endlagerprojekte und deren Konzepte betrachtet, sowie daraus die Anforderungen an die Konzepte abgeleitet. Dazu werden Endlagerprojekte aus den Ländern Deutschland, Schweden, Frankreich, Finnland, Belgien und der Schweiz in unterschiedlichen Wirtsgesteinen herangezogen.

Nachfolgend wird das Endlagerprojekt Cigéo in Frankreich vorgestellt. Zunächst erfolgt eine Beschreibung des Konzepts, welche die Abfälle und die Abfallbehälter ebenso wie die unter- sowie übertägigen Einrichtungen am Endlagerstandort beinhaltet. Daran anschließend werden die Themen Endlagerverschluss sowie Rückholbarkeit und Monitoring betrachtet. Dabei wird immer nur der aktuelle Planungsstand beschrieben, der aufgrund neuer Erkenntnisse und des adaptiven Konzepts jederzeit revidiert werden kann. Abschließend werden Anforderungen aus dem vorliegenden Konzept abgeleitet.

2 Projekt Cigéo

Im Rahmen des Projektes Cigéo wird der Bau eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle in Tongestein untersucht.

2.1 Gesetzliche Vorgaben und Zeitplan

Die Endlagerung radioaktiver Abfälle obliegt in Frankreich der ANDRA (Agence Nationale pour la Gestion des Déchets Radioactifs) /PEY 16/. Im Jahr 1991 wurde im sogenannten „Bataille Act“ die Untersuchung zum Management von radioaktiven Abfällen verordnet, s. Abb. 2.1. In diesem Rahmen wurde die ANDRA als verantwortliche öffentliche Einrichtung unter der Aufsicht des Ministeriums für Ökologie, Energie, nachhaltige Entwicklung und das Meer und des Ministeriums für Forschung für die langfristige Verwaltung aller radioaktiven Abfälle etabliert.

Zwischen 1994 und 1996 wurden verschiedene Gebiete in Frankreich geologisch betrachtet um einen geeigneten Standort für die radioaktiven Abfälle zu finden. Schließlich hat die Regierung 1998 den Standort Meuse / Haute-Marne für den Bau eines Untertagelabors gewählt. Nach einer öffentlichen Debatte im Jahr 2005 über den Umgang mit dem hochradioaktiven Abfall, wurde im Jahr 2006 ein Gesetz verabschiedet, welches die reversible Endlagerung in tiefen geologischen Formationen vorsieht. Die Rückholbarkeit ist dabei aus einer gesellschaftlich-ethischen Motivation heraus festgelegt worden. 2013 folgte eine weitere öffentliche Debatte zu Cigéo. Ein weiteres Gesetz vom 25. Juli 2016 behandelt die Entwicklung und die Reversibilität von Cigéo /AND 16b/, /AND 16d/, /VOI 14/, /AND 16a/ /ESK 11/.

Geplant sind die Einreichung der Baugenehmigung für 2018 und der Baubeginn im Falle der Genehmigung im Jahr 2020. Die Genehmigung wird erst nach einer öffentlichen Umfrage erteilt. Das Endlager soll 2025 in Betrieb gehen, die Rückholbarkeit ist für mindestens 100 Jahre gesetzlich festgelegt /AND 16b/, /AND 16d/, /AND 13/, /AND 16c/.

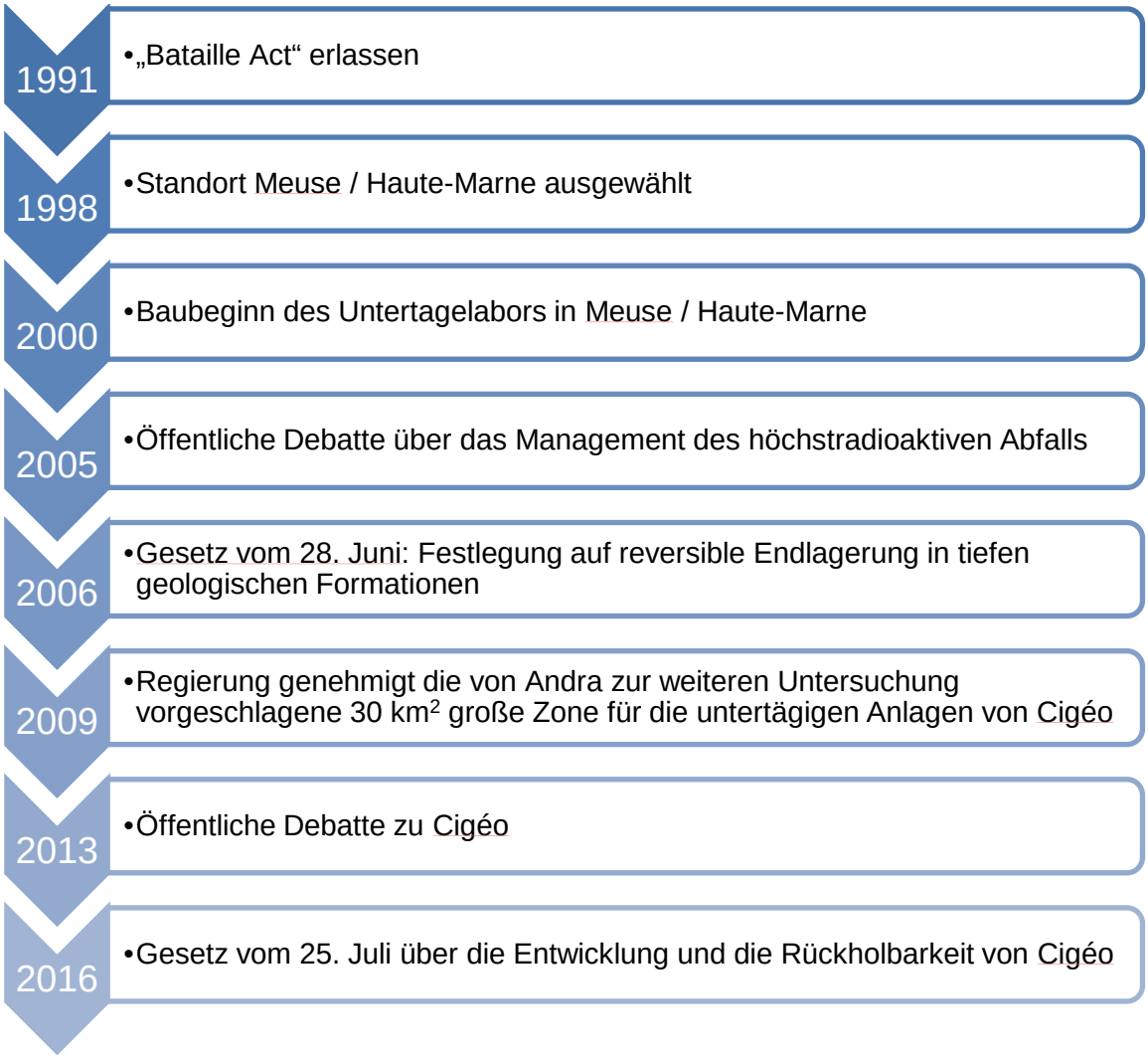


Abb. 2.1 Wichtige Daten im Zusammenhang mit Cigéo

In Frankreich existieren drei Kategorien für Anlagen, die mit radioaktiven Stoffen umgehen. Cigéo wird in die Kategorie der „installations nucléaires de base“ (INB), etwa „nuklare Basisanlage“, hinein gehören. Die Baugenehmigung wird von der französischen Behörde für nukleare Sicherheit (ASN) erteilt werden. Die Einlagerung der ersten radioaktiven Abfallgebinde erfordert eine weitere Genehmigung der ASN. Das Gesetz vom 25. Juli 2016 (s. Abb. 2.1) verlangt die Verabschiedung eines weiteren Gesetzes am Ende der industriellen Pilotphase. Es werden dann eine Reihe parlamentarischer Genehmigungen erforderlich sein und ASN wird regelmäßige Sicherheitsbewertungen durchführen /AND 16d/, /OEC 11/.

2.1 Lage und Wirtsgestein

Das Untertagelabor wurde an der Grenze der zwei Departments Meuse und Haute-Marne in der östlichen Region des Pariser Beckens errichtet, s. Abb. 2.2. Das Pariser Becken ist durch eine sehr stabile Geologie und geringe seismische Aktivität gekennzeichnet /AND 13/. Das Wirtsgestein für das zukünftige Endlager ist Teil des Callovo-Oxfordian (Jura). Im Jahr 2005 wurde ein ca. 250 km^2 großes Gebiet (transposition zone (ZT)) um das Labor definiert, in dem die Ergebnisse aus dem Untertagelabor angewendet werden können. Innerhalb dieses Gebiets wurde im Jahr 2009 ein ca. 30 km^2 großes Areal für die untertägigen Anlagen von Cigéo von der Andra zur näheren Untersuchung vorgeschlagen. Dieser Bereich wird ZIRA (zone of interest for detailed reconnaissance) genannt, s. Abb. 2.3. Cigéo wird im Rahmen seiner gesamten Betriebszeit ein Gebiet von ca. 15 km^2 umfassen /AND 13/.

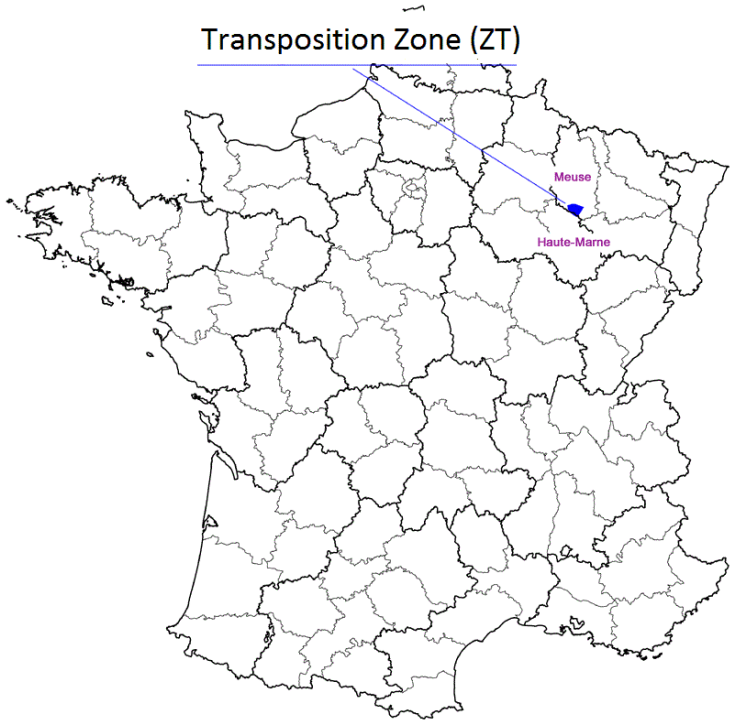


Abb. 2.2 Lage Cigéo in Frankreich /AND 12b/ (bearbeitet)

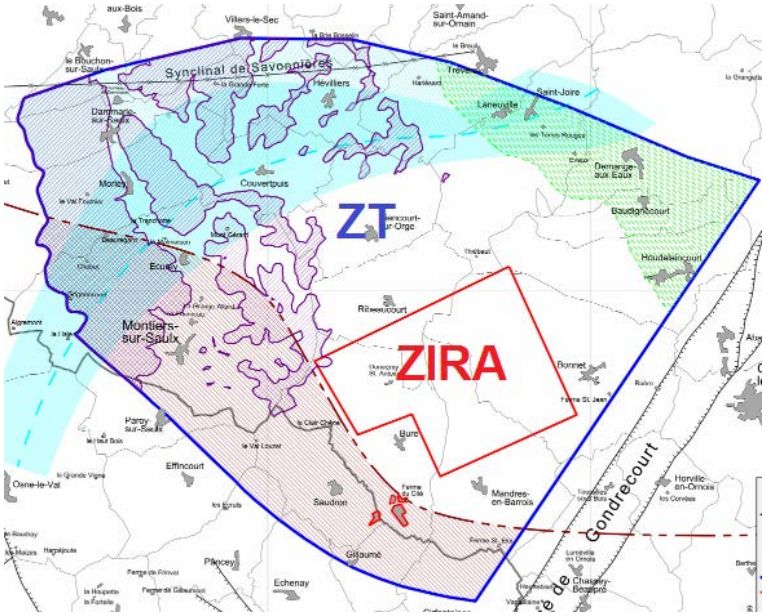


Abb. 2.3 Transposition Zone und ZIRA /AND 12b/ (bearbeitet)

Die Mitte der ZIRA liegt in einer Teufe von etwa 525 m /IRS 17a/. Übertägig ist etwa die Hälfte der ZIRA bewaldet, die andere Hälfte besteht aus Gras- und Farmland. Die Standorte für die übertägigen Anlagen wurden unter anderem im Hinblick auf Naturschutzgebiete, Überschwemmungsgebiete, Zugänglichkeit und Überflug-Zonen ausgewählt /AND 12b/.

Der Callovo-Oxfordian der ZIRA ist ca. 160 Millionen Jahre alt (Mittel- bis Oberjura). Das Tongestein bildet dort eine homogene, kaum durchlässige Schicht in einer Tiefe zwischen 420 m und 630 m mit einer Mächtigkeit zwischen 130 m und 160 m. Zudem beschränkt die Schicht durch ihre chemische Zusammensetzung die Lösung vieler Radionuklide und hindert sie durch ihre Struktur aus gestapelten Platten am weiterkommen /AND 13/, /AND 16d/.

In Tabelle Tab. 2.1 sind die Gesteinsformationen am Standort von Cigéo zusammengestellt. Zu sehen ist, dass auch im Hangenden und im Liegenden des gewählten Wirtsgesteins Gesteinsschichten aus Kalkstein mit einer geringen Durchlässigkeit liegen.

Tab. 2.1 Gesteinsformationen am Standort des Endlagers /AND 05/

Formation	Alter	Mächtigkeit an der Stelle des Untertagelabors	Charakteristika
Barrois Kalkstein	Thitonian 140 Millionen Jahre	± 25 m	Oberflächenaquifer
Marls	Kimmeridgian 145 Millionen Jahre	100 m	undurchlässig
Oxfordian Kalkstein	Oberer bis mittlerer Oxfordian 150 Millionen Jahre	300 m	Geringe Durchlässigkeit
Callovo-Oxfordian Tonschiefer	**Unterer Oxfordian – oberer und mittlerer Callovian 155 Millionen Jahre**	**130 m**	**Gewähltes Wirtsgestein**
Dogger Kalkstein	Unterer Callovian – Dogger 165 Millionen Jahre	250 m	Geringe Durchlässigkeit

3 Konzept

Im Cigéo-Projekt werden insgesamt 4 Phasen durchlaufen: Initiales Design, initialer Bau, Betrieb und Monitoring, s. Abb. 3.1 /AND 16b/. Mit einer Betriebszeit von über 100 Jahren wird Cigéo auch weiter errichtet, wenn es bereits in Betrieb gegangen ist /AND 16d/. Dabei werden die Bau-Aktivitäten technisch getrennt von den Einlagerungsaktivitäten durchgeführt. Dies schließt auch eine eigene Bewetterung für die Betriebsbereiche und die Bereiche, die sich im Bau befinden, mit ein /AND 13/.

Der schrittweise Bau des Endlagers ermöglicht die Einbindung von bereits gesammelter Betriebserfahrung, wissenschaftlichen und technischen neuen Erkenntnissen sowie möglichen Änderungen des einzulagernden Abfallinventars /AND 13/. Die hier zusammengetragenen Informationen stellen immer nur den aktuellen Planungsstand des Konzepts dar.

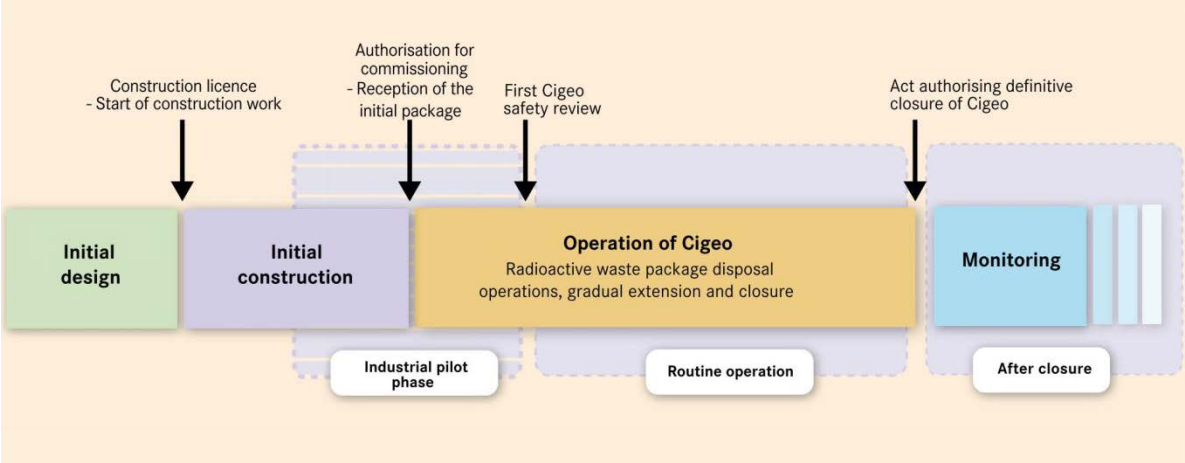


Abb. 3.1 4 Phasen von Cigéo /AND 16b/

3.1 Abfälle

Radioaktiver Abfall wird in Frankreich in fünf Kategorien eingeteilt /AND 13/:

- Sehr schwach radioaktiver Abfall (VLLW)
- Schwach und mittelradioaktiver kurzlebiger Abfall (LILW-SL)
- Schwachradioaktiver langlebiger Abfall (LLW-LL)
- Mittelradioaktiver langlebiger Abfall (ILW-LL)
- Hochradioaktiver Abfall (HLW).

Diese Klassifizierung basiert auf vielen Kriterien, insbesondere jedoch auf der Radioaktivität und der Langlebigkeit des Abfalls. Die Aktivität kann sehr schwach, schwach, mittel oder hoch sein. Abfall, der hauptsächlich Radionuklide mit einer Halbwertszeit nicht größer als 31 Jahre enthält, gilt als kurzlebig. Langlebiger Abfall enthält eine signifikante Menge Radionuklide mit einer Halbwertszeit größer als 31 Jahre /AND 13/.

Cigéo dient der Endlagerung von hochradioaktivem Abfall (HLW) und mittelradioaktivem langlebigem Abfall (ILW-LL). Sämtliche Abfälle dieser beiden Arten, die in bestehenden Kernkraftwerken bis jetzt erzeugt wurden und in der Zukunft noch erzeugt werden, sollen in Cigéo eingelagert werden. Abfall, der von Anlagen erzeugt werden wird, die sich gerade im Bau befinden, wurde ebenfalls berücksichtigt /AND 16d/. Neben Abfall aus der Kernenergie stammt der Abfall hauptsächlich aus der Forschung und Verteidigung bzw. nuklearen Abschreckung /AND 13/.

Das Endlager bietet Kapazität für ca. 10 000 m^3 HLW und 75 000 m^3 ILW-LL. Davon sind bereits ca. 30 % des HLW und ca. 60 % des ILW-LL produziert worden /AND 16d/, /AND 13/, /PEY 16/.

HLW wird für das Endlager noch einmal in drei verschiedene Kategorien eingeteilt: HLW0, HLW1 und HLW2. Dabei ist HLW0 hochradioaktiver Abfall mit moderater Wärmeentwicklung, HLW1 und HLW2 sind dagegen Abfälle mit wesentlich höherer Wärmeentwicklung /IRS 17a/. Im Rahmen der schrittweisen Inbetriebnahme sowie des sukzessiven Baus des Endlagers werden zunächst (bis ca. 2075) nur HLW0 und ILW-LL eingelagert /VOI 14/, /IRS 17a/. Erst anschließend kann auch stärker wärmeabgebender Abfall, der bevor er zum Endlager transportiert werden kann aufgrund hoher Aktivität und hoher Wärmeentwicklung noch einige Zeit zwischengelagert werden muss, endgelagert werden /AND 12a/.

3.2 Behälter

Bevor die Abfälle zu Cigéo transportiert werden, werden sie beim Abfallverursacher konditioniert. Dort entstehen sogenannte „colis primaires“, im Folgenden Primärpakete genannt. Ein oder mehrere Primärpakete verbunden mit einem Endlagercontainer ergeben ein Endlagerpaket, s. Abb. 3.2. Für den Transport nach unter Tage wird dieses Endlagerpaket zusätzlich in einen abschirmenden Behälter verpackt. Dieser abschirmende Behälter wird nicht mit eingelagert sondern verbleibt vor dem Zugang zur Einla-

gerungskammer bis das Endlagerpaket entnommen wurde und wird anschließend wieder leer nach über Tage befördert. Das Endlagerpaket in Verbindung mit dem abschirmenden Behälter wird im Folgenden Transportgebinde genannt, s. Abb. 3.2 /IRS 17a/, /AND 13/.

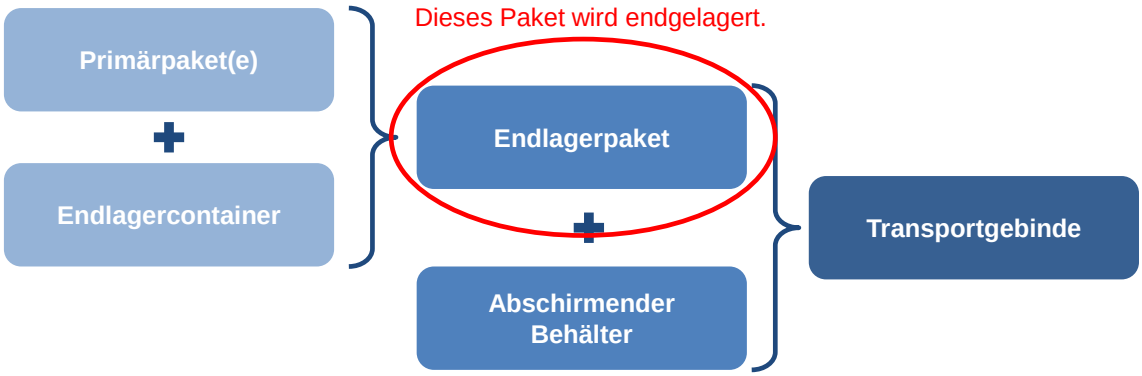


Abb. 3.2 Behälter im Zusammenhang mit der Einlagerung

3.2.1 HLW

Ein HLW-Endlagerpaket besteht aus einem oder mehreren Primärpaketen, einem Containerkörper, einem Deckel, vier chemisch inerten Keramikpads sowie vier Pad-Befestigungssystemen. Insgesamt stehen 6 Container in unterschiedlichen Größen mit Längen von 1040 mm bis zu 2227 mm und Durchmessern von 570 mm und 635 mm zur Verfügung. Der Containerkörper besteht aus einem zylindrischen Mantel aus unlegiertem Stahl mit einer Dicke zwischen 53 und 65 mm und einem angeschweißten Boden, s. Abb. 3.3. Der Deckel besteht aus dem gleichen geschmiedeten Stahl wie der Körper. Die vier Keramikpads erleichtern das Verschieben des Endlagerpakets auf dem Stahlliner in der HLW-Einlagerungskammer sowohl während der Einlagerung als auch bei einer möglichen Rückholung der Pakete /IRS 17a/, /ROC 17/. Zusätzlich dienen die Keramikpads der Identifikation der Pakete. Anders als die Stahlteile des Containers ist die Keramik immun gegen Korrosion, deshalb werden die Pakete dort markiert /IRS 17a/. Das maximale Gewicht eines HLW-Endlagerpakets beträgt 3,2 t /ROC 17/.

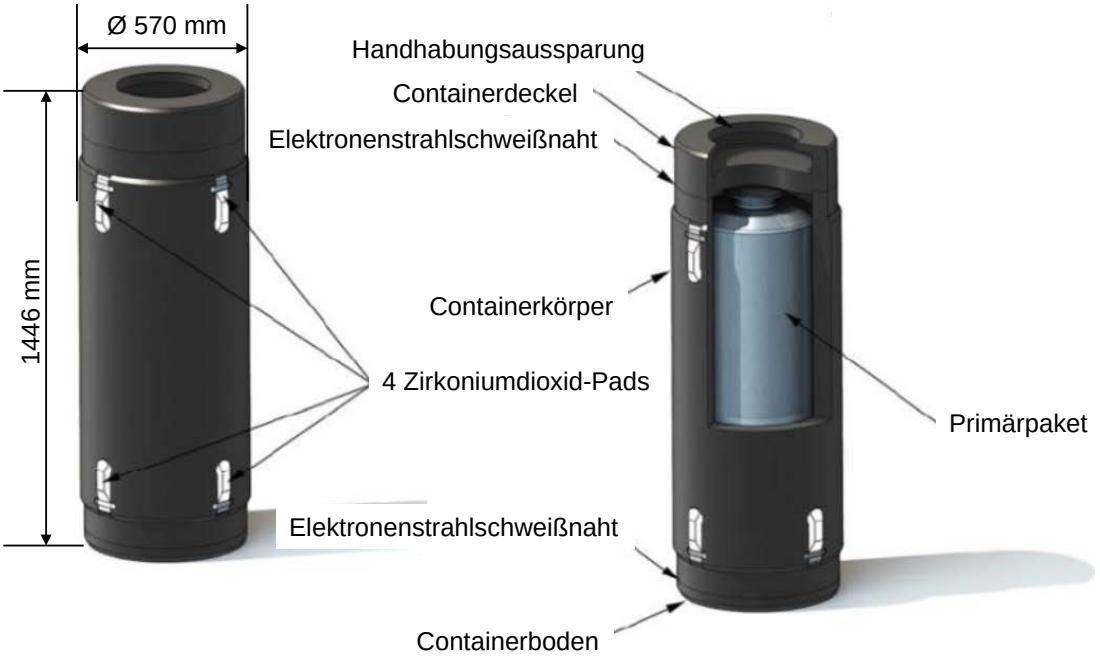


Abb. 3.3 HLW-Container (Beispiel) /IRS 17a/ (bearbeitet)

Für den Transport bis zur Einlagerungskammer wird das Endlagerpaket in einen abschirmenden Behälter verpackt, s. Abb. 3.2. Ein solcher Behälter ist in Abb. 3.4 zu sehen. In Tab. 3.1 ist eine Auswahl der unterschiedlichen Aufgaben von Primärpaket und Endlagercontainer während des Normalbetriebs und bei Störfällen dargestellt.

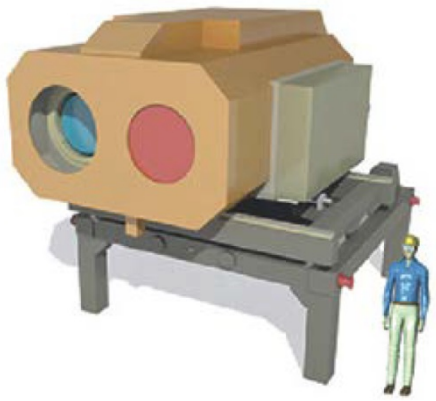


Abb. 3.4 HLW-Transportgebinde /PEY 16/

Tab. 3.1 Aufgaben von Primärpaket und Endlagercontainer für HLW (Auswahl) /IRS 17a/

	Funktion des Primärpakets	**Funktion des Endlagercontainers**
Normalbetrieb	Handhabung der Pakete übertägig	Handhabung der Endlagerpakete während des Einlagerungsbetriebs und einer möglichen Rückholung
	Oberflächenkontamination limitieren	
	Rückhaltung von nicht gasförmigen radioaktiven Stoffen (erste Barriere)	Rückhaltung von nicht gasförmigen radioaktiven Stoffen (zweite Barriere)
	Kontrolle über das Risiko der Kritikalität	Kontrolle über das Risiko der Kritikalität
	Begrenzung der Dosisleistung	
	Identifizierung des Primärpakets	Identifizierung des Endlagerpakets
	Gasdichtheit gewährleisten	Gasdichtheit gewährleisten
Störungen und Unfälle	Dispersion von Partikeln und Aerosolen begrenzen	Begrenzung der Dispersion radioaktiver Substanzen im Fall des Verlustes der ersten Barriere
		Handhabbarkeit der erhalten

3.2.2 ILW-LL

Ein ILW-LL-Endlagerpaket besteht aus einem oder mehreren Primärpaketen, einem Containerkörper sowie einem Deckel. Der Deckel wird mit Schrauben befestigt. Der Containerkörper beinhaltet Trennwände, die Gehäuse für die Primärpakete bilden und an deren Form angepasst sind, s. Abb. 3.5. Die meisten der Container bestehen aus Beton, einige wenige Stahlcontainer werden jedoch ebenfalls verwendet. Aussparungen an der Unterseite der Container erlauben die Handhabung mit einem Gabelstapler. Diese Aussparungen sind standardisiert für alle Container. Das maximale Gewicht eines ILW-LL-Endlagerpakets beträgt 17 t /IRS 17a/, /ROC 17/.

Die Container lassen die Entweichung von Gasen durch den Spalt zwischen Containerkörper und Deckel zu. Die Primärpakete bilden das Containment. Bei manchen Primärpaketen, bei denen die Einschließung der radioaktiven Stoffe während Cigéos Servicezeit nicht gewährleistet werden kann, wird in diesen Spalt noch ein Bindemittel eingespritzt. Dieser verhindert jedoch nicht das Austreten von Gasen. Zudem fördern die Aussparungen für den Gabelstapler die Luftzirkulation in den Kammern und das Abführen von Gasen /IRS 17a/.

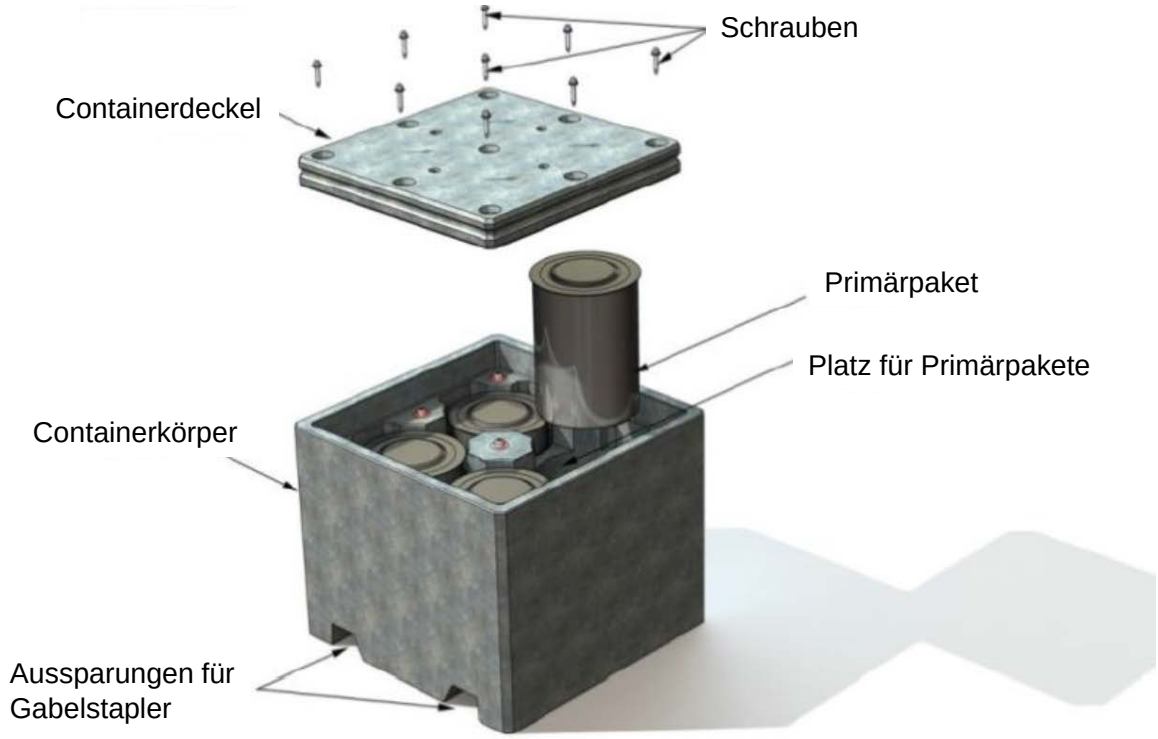


Abb. 3.5 ILW-LL-Container (Beispiel) /IRS 17a/ (bearbeitet)

Bei einigen Primärpaketen wird in Erwägung gezogen, sie ohne Container einzulagern /AND 13/, /IRS 17a/. In Tab. 3.2 ist eine Auswahl von verschiedenen Aufgaben des Primärpakets und des Endlagercontainers dargestellt.

Tab. 3.2 Aufgaben von Primärpaket und Endlagercontainer für ILW-LL (Auswahl) /IRS 17a/

	Funktion des Primärpakets	**Funktion des Endlagercontainers**
Normalbetrieb	Handhabung der Pakete übertägig	Handhabung der Endlagerpakete während des Einlagerungsbetriebs und einer möglichen Rückholung
	Oberflächenkontamination limitieren	
	Rückhaltung von nicht gasförmigen radioaktiven Stoffen (erste Barriere)	Rückhaltung von nicht gasförmigen radioaktiven Stoffen (zweite Barriere)
	Kontrolle über das Risiko der Kritikalität	Kontrolle über das Risiko der Kritikalität
	Begrenzung der Dosisleistung	
	Identifizierung des Primärpakets	Identifizierung des Endlagerpakets
		Stapelbarkeit der Endlagerpakete
Störungen und Unfälle	Dispersion von Partikeln und Aerosolen begrenzen	Primärpaket vor thermischer und mechanischer Belastung schützen Dispersion von Partikeln und Aerosolen vermindern
		Handhabbarkeit der erhalten

3.3 Einrichtungen

3.3.1 Übertägige Einrichtungen

Übertägig wird Cigéo aus den zwei Zonen „Ramp Zone“ und „Shaft Zone“, also Rampenbereich und Schachtbereich, bestehen.

Der Rampenbereich wird Gebäude für die Annahme und Kontrolle von Abfallpaketen sowie deren Vorbereitung für den Transport nach unter Tage beinhalten. Die Grundfläche des Rampenbereichs beträgt dann etwa 200 ha /AND 13/.

Die Annahme, Kontrolle und Konditionierung der Primärpakete zu Endlagerpaketen wird im nuklearen Teil des Rampenbereichs stattfinden. Falls der Abfall mit dem Zug zum Endlager transportiert werden soll, gibt es ein Areal, in dem ein Bahnhof errichtet werden kann. Die nötige Infrastruktur zum Betrieb der Anlagen, wie etwa Umspannwerke oder Kläranlagen, sowie ein Bereich für die Arbeiten zum Bau und zur Instandhaltung bekommen ebenfalls ihren Platz. Zudem wird es ein Besucherzentrum und ein Gelände mit Kantine und Büroräumen geben /AND 13/.

Im Rampenbereich werden die Abfallpakete angenommen, einer ersten Inspektion unterzogen und aus ihren Transportbehältern entnommen. Nach einer zweiten Inspektion erfolgt das Einsetzen in die Endlagercontainer, s. Abb. 3.2, sowie in die abschirmenden Behälter /AND 16d/.

Die für die Vorgänge im Rampenbereich vorerst nötigen Gebäude sind in Abb. 3.6 zu sehen. Im Hauptgebäude befinden sich Einrichtungen, um die Primärpakete aus ihren Transportbehältern zu entnehmen und in Endlagercontainer zu platzieren. Außerdem befinden sich hier die Vorrichtungen um die Endlagerpakete in die abschirmenden Behälter zu setzen /IRS 17a/.

Der Bereich „Abfall- und Probeninspektion“ dient z. B. zum Management von Abweichungen im Abfall /IRS 17a/.

Die in Abb. 3.6 mit „ET-H“ bzw. „Entladehalle“ gekennzeichneten Bereiche entsprechen den Annahmestellen für den radioaktiven Abfall. Unterschieden wird hier zwischen Transportpaketen, die horizontal entladen werden und jenen, die vertikal entladen werden /IRS 17a/.



Abb. 3.6 Übertägige Einrichtungen am nuklearen Teil des Rampenbereichs „EP1“ /IRS 17a/ (bearbeitet)

Der Schachtbereich wird ca. 250 ha umfassen. Er dient den Aktivitäten zum fortschreitenden Bau des Endlagers und gehört damit zum nicht-nuklearen Teil der Anlage. Materialien und Geräte treffen an dieser Stelle am Endlager ein. Haufwerk vom Bau des Endlagers verlässt an dieser Stelle die Anlage /IRS 17a/.

3.3.2 Rampen

Cigéo wird über zwei Rampen verfügen. Über die Paketrampe gelangen die Transportgebinde nach unter Tage. Die Servicerampe dient der Instandhaltung, der Evakuierung und Einsätzen in Notsituationen. Außerdem werden über die Servicerampe im Fall der genehmigten Schließung des Endlagers die Materialien zum Verschluss nach unter Tage gebracht. Beide Rampen sind parallel angeordnet /IRS 17a/. Die Länge der Rampen beträgt 4200 m bei einem Gefälle von 12 % /ABA 15/.

Die Rampen bestehen jeweils aus den drei Teilen Kopf, Körper und Fuß. Der Rampenkopf der Paketrampe ist mit den nuklearen Einrichtungen über Tage verbunden /IRS 17a/. Sowohl an der Basis des Barrois Kalksteins als auch an der Basis des Oxfordian Kalksteins, also am Beginn des Tongesteins befindet sich eine Dichtung /IRS 17a/. Die parallel verlaufenden Rampen sind alle 400 m verbunden, um in Notsituationen eingreifen zu können. Der Durchmesser beträgt ca. 8,4 m. Der Liner besteht aus Betonsegmenten und in der Tonschicht aus zweischichtigen Linersegmenten. Der zweischichtige Liner soll eine zusätzliche Schicht aus einem kompressiblen Material an der Außenseite des Betons erhalten um eine teilweise Konvergenz des Gesteins zu ermöglichen /IRS 17a/.

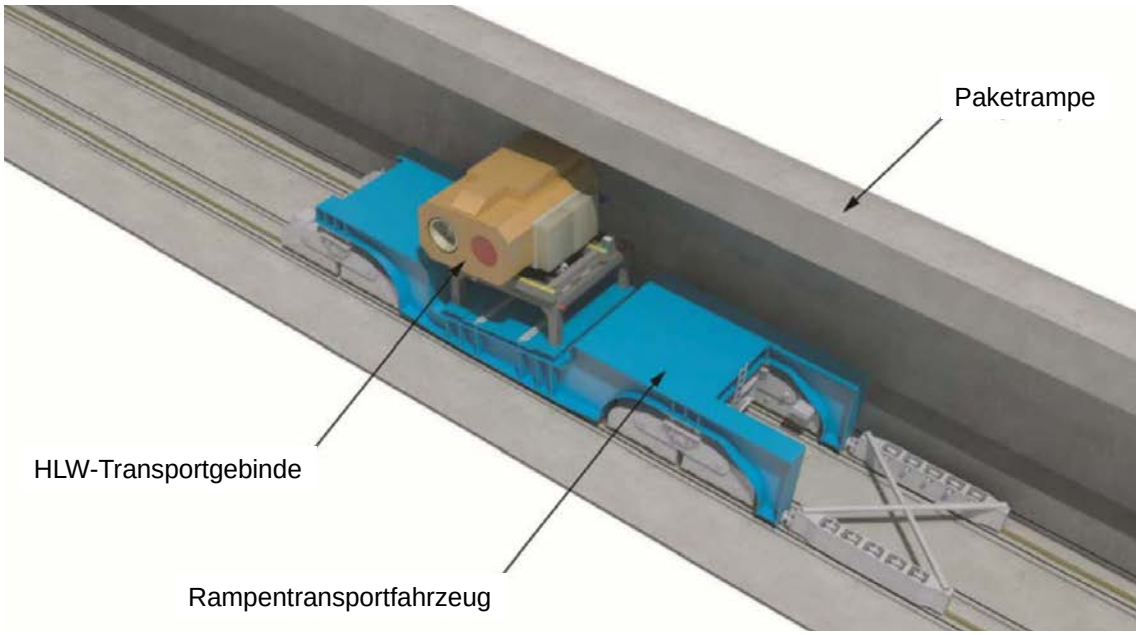


Abb. 3.7 HLW-Transportgebinde-Transport nach unter Tage /PEY 16/ (bearbeitet)

Das Rampentransportfahrzeug fährt schienengebunden und hängt an einem Seilzug, s. Abb. 3.8 und Abb. 3.9. Es fährt etwa mit Schrittgeschwindigkeit nach unter Tage /AND 13/. Das Rampentransportfahrzeug transportiert sowohl die Transportgebinde mit einem Endlagerbehälter darin nach unter Tage als auch die leeren abschirmenden Behälter wieder nach oben. Sowohl im gesamten Bereich der Paketrampe als auch in den untertägigen Sektionen sind sämtliche Prozesse elektrisch angetrieben und schienengebunden /IRS 17a/.

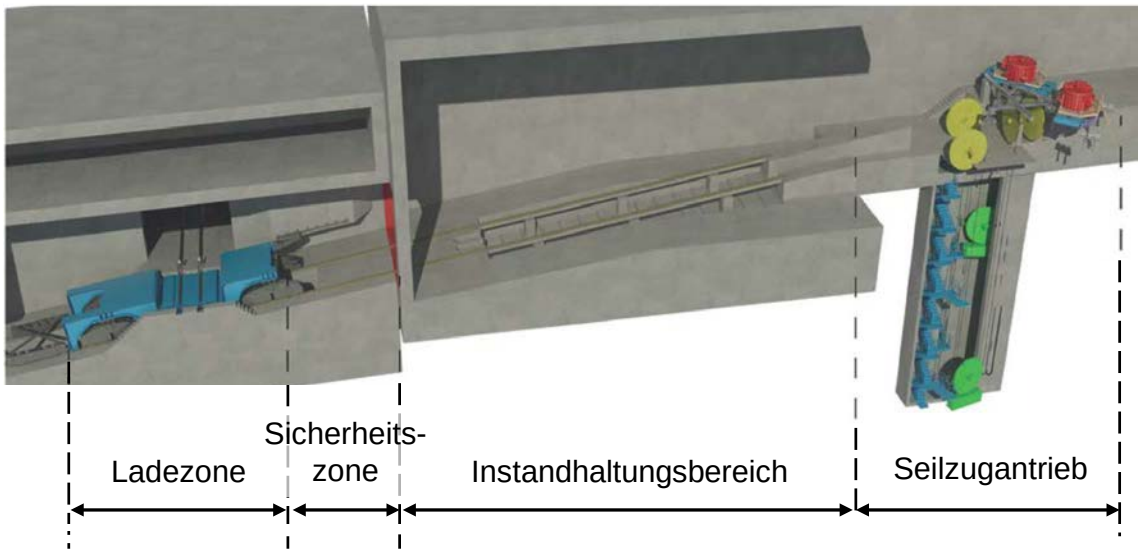


Abb. 3.8 Obere Rampenstation /PEY 16/ (bearbeitet)

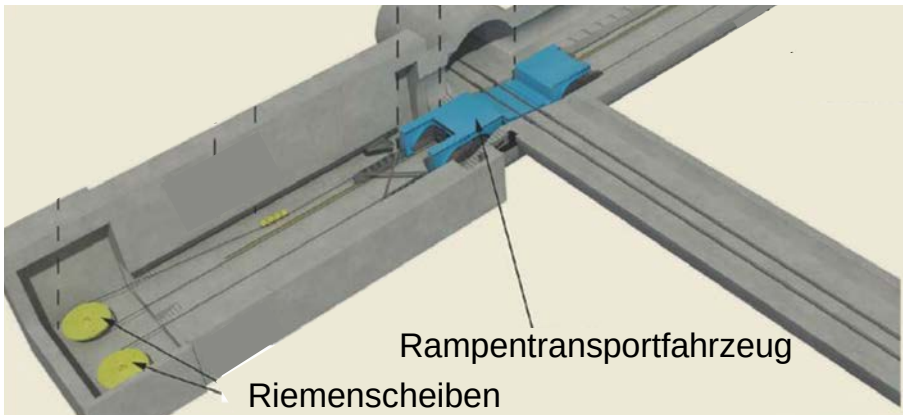


Abb. 3.9 Untere Rampenstation /PEY 16/ (bearbeitet)

3.3.3 Schächte

Cigéo wird über insgesamt fünf Schächte mit Durchmessern von 6 bis 8 m verfügen. Zwei der Schächte werden im untertägigen nuklearen Bereich liegen und sind für den Einlagerungsbetrieb vorgesehen. Über den einziehenden Wetterschacht kann Personal nach unter Tage gelangen. Der ausziehende Wetterschacht dient lediglich der Bewetterung /IRS 17a/. Ein Teil der Frischluft wird über die Rampen direkt nach über Tage geleitet, s. Abb. 3.10.

Die übrigen drei Schächte liegen im Errichtungsbereich der Anlage. Personal kann dort über den einziehenden Wetterschacht nach unter Tage gelangen. Ein ausziehender Wetterschacht und ein Schacht für den Transport von großem Equipment sind ebenfalls vorhanden /IRS 17a/. Wie in Abb. 3.10 zu sehen, erfolgt die Bewetterung des Er-

richtungsbereichs komplett getrennt von der Bewetterung des nuklearen untertägigen Teils der Anlage.

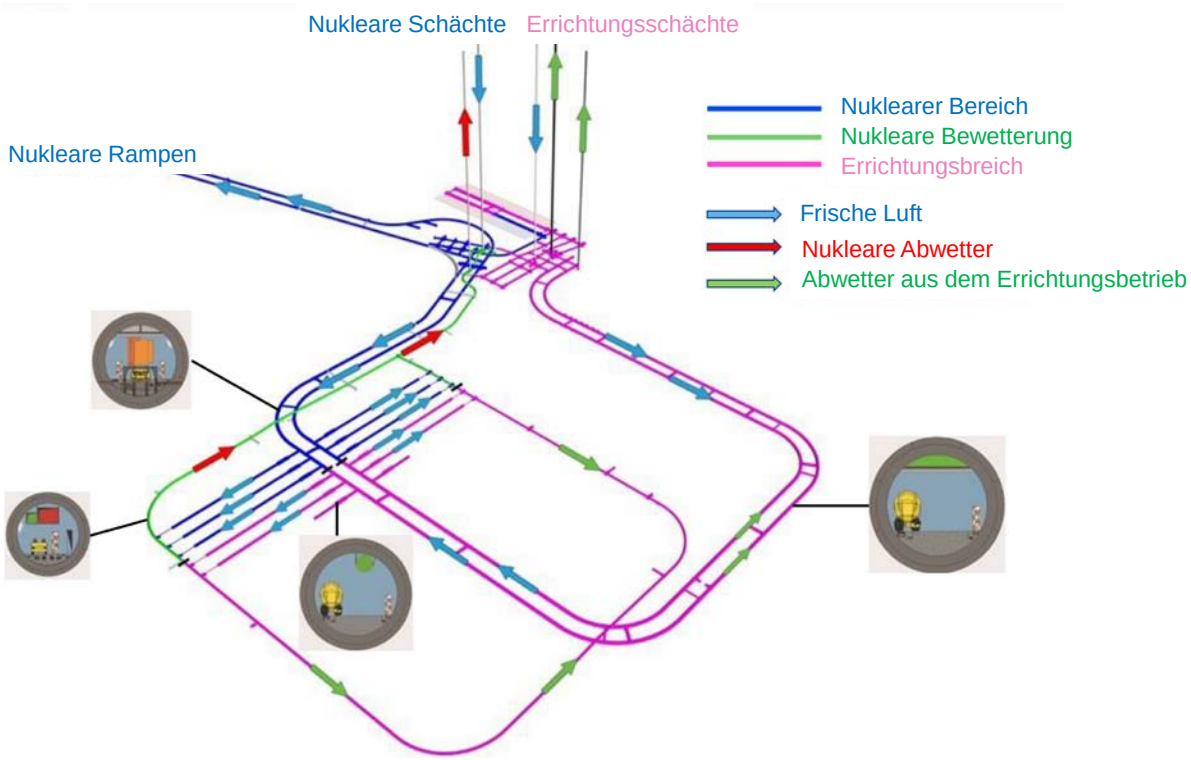


Abb. 3.10 Bewetterung /WIN 13/ (bearbeitet)

Die Schächte erhalten einen Betonliner. Innerhalb der Callovo-Oxfordian-Schicht wird zwischen dem Betonliner und dem anliegenden Gestein, wie auch bei den Rampen, zusätzlich ein kompressibles Material eingefügt. Im Barrois-Aquifer sind die Schächte abgedichtet. An der Basis des Oxfordian Kalksteins (s. Tab. 2.1) wird ebenfalls eine Dichtung platziert /IRS 17a/.

3.3.4 Untertägige Einrichtungen

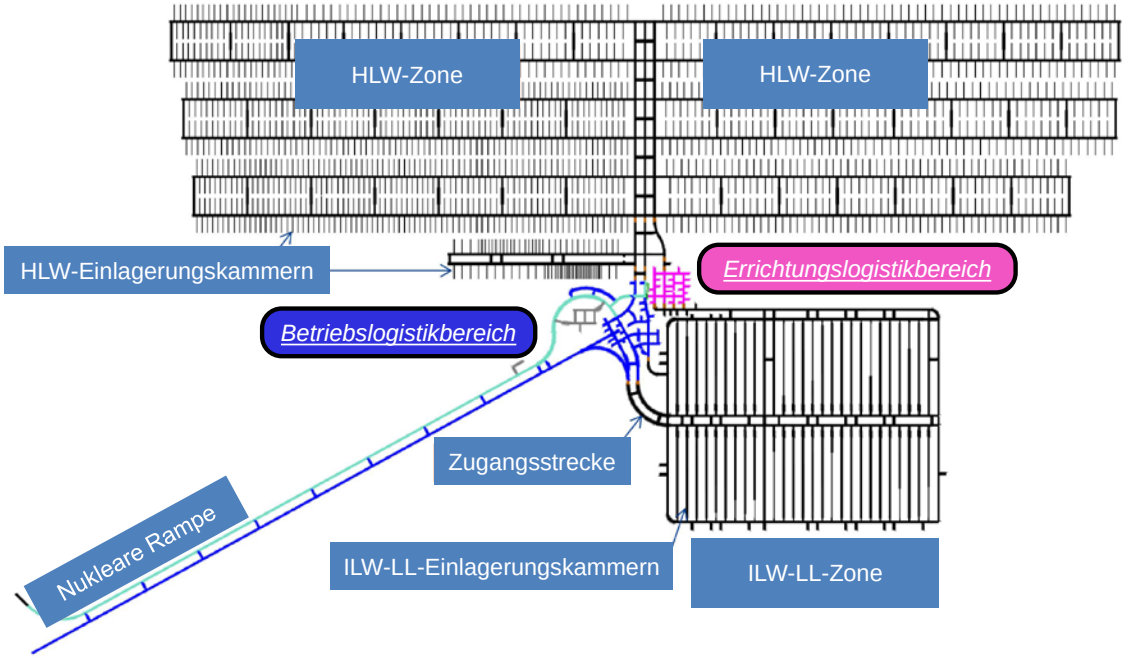


Abb. 3.11 Überblick über den untertägigen Teil Cigéos /PEY 16/ (bearbeitet)

Abb. 3.11 stellt eine Draufsicht auf den untertägigen Aufbau von Cigéo dar. Unten rechts im Bild ist die Einlagerungszone für den langlebigen mittelradioaktiven Abfall zu sehen. Oben ist die Einlagerungszone für den hochradioaktiven Abfall dargestellt. Des Weiteren ist hier der Errichtungslogistikbereich zu sehen. Die Errichtungsschächte (s. Abb. 3.10) münden dort in den untertägigen Teil des Endlagers. Er gehört zum nicht-nuklearen Teil der Anlage. Der Betriebslogistikbereich ist ebenfalls veranschaulicht. Im Betriebslogistikbereich kommen die Transportgebinde über die Abfallrampe an. Auch die zwei nuklearen Schächte (s. Abb. 3.10) liegen dort.

Wie bereits zu Beginn des Kapitels erwähnt, wird Cigéo phasenweise, auch während des Betriebs erbaut. Dies ist in Abb. 3.12 zu sehen. Zunächst wird der Bereich für den langlebigen, mittelradioaktiven Abfall errichtet und in Betrieb genommen. Nachfolgend wird auch der HLW-Bereich errichtet. HLW-Abfallgebinde werden erst ab dem Jahr 2075 eingelagert, s. Abb. 3.12. Des Weiteren ist dort zu erkennen, dass die Errichtung stets getrennt vom nuklearen Einlagerungsbetrieb mit einer eigenen Bewetterung stattfindet, wie bereits in Kap. 3.3.3 beschrieben. Das heißt, die beiden Bereiche für Errichtung und Betrieb sind physikalisch voneinander getrennt, sodass ein Vorfall in einem der beiden Bereiche keine Konsequenzen für den anderen Bereich haben sollte /VOI 14/.

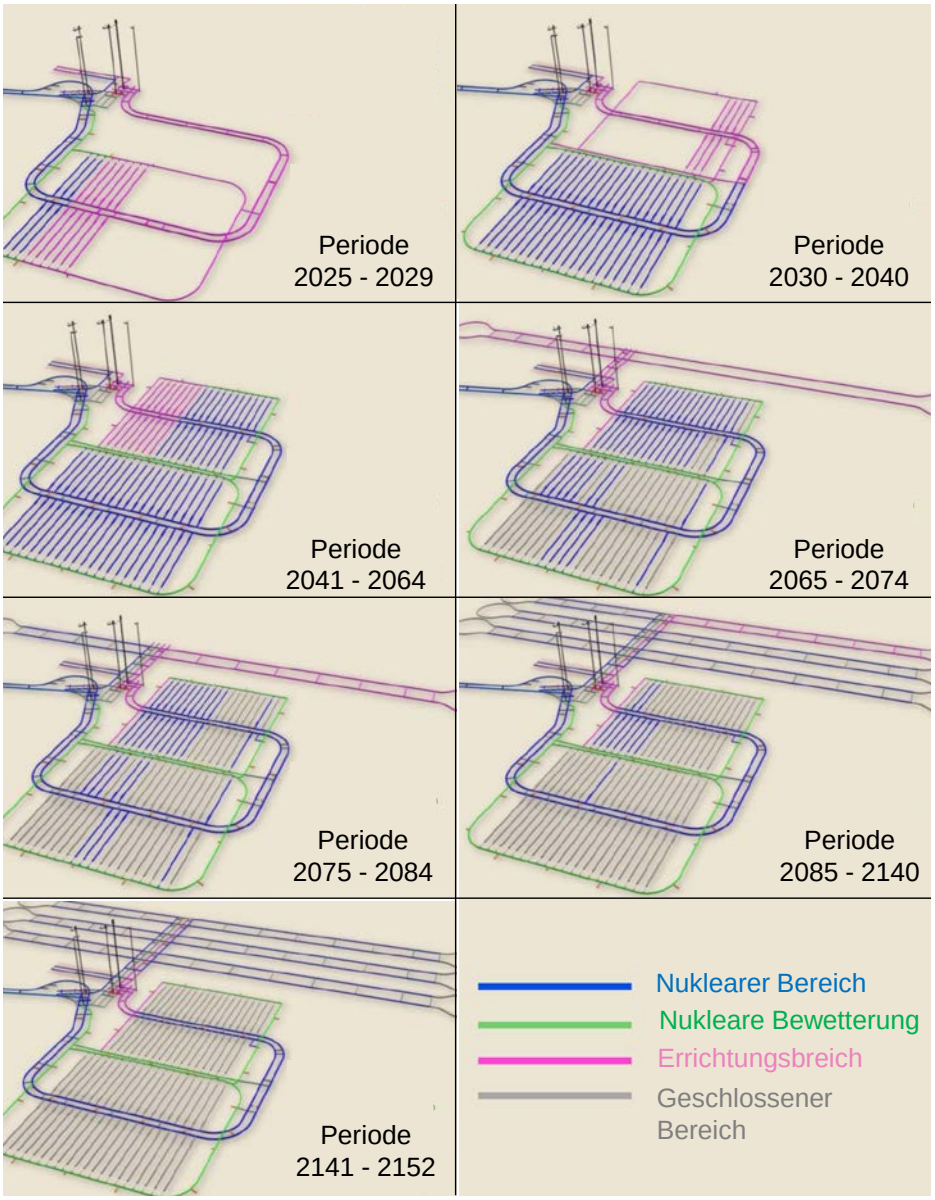


Abb. 3.12 Errichtung des Endlagers unter Tage während des Betriebs /VOI 14/ (bearbeitet)

3.3.4.1 Einlagerungszone HLW

Die HLW-Einlagerungskammern sind horizontale Sackgassen mit einem Durchmesser von ca. 70 cm /AND 13/, /ABA 15/. Es sind Endlagerkammern mit einer Länge von ca. 80 m und Endlagerkammern mit einer Länge von ca. 100 m geplant /ROC 17/. Aufgrund der verschiedenen Abfallarten und somit verschiedener Anzahlen an Endlagerpaketen sowie unterschiedlich starker Wärmeentwicklung haben die HLW-Einlagerungskammern auch unterschiedliche Abstände zueinander /IRS 17a/. Von Bohrlochmitte zu Bohrlochmitte sind Abstände bis zu 51 m vorgesehen /IRS 17a/. Zwi-

schen den Endlagerpaketen werden Abstandshalter eingeführt (s. Abb. 3.13). Die Temperatur im Wirtsgestein darf 90 °C nicht überschreiten, um den Ton nicht zu schädigen /AND 15/. Die Endlagerpakete werden ferngesteuert von der Zugangsstrecke in die Einlagerungskammer verbracht und mittels eines Roboters (Pusher) bis ans Ende der Kammer, bzw. bis an den nächsten Abstandshalter heran geschoben /VOI 14/.

Für die Einlagerung der HLW-Pakete gibt es zwei verschiedene abschirmende Behälter, je nach Durchmesser des Endlagerpakets. Die Einlagerung eines HLW-Endlagerpakets erfolgt jedoch grundsätzlich nach den gleichen Schritten. Die Transportgebinde können an der unteren Rampenstation durch ein Transportfahrzeug aufgenommen werden. Kreuzungen und Drehscheiben erlauben Richtungsänderungen und das Absetzen des Gebindes durch das Transportfahrzeug sowie die Wiederaufnahme durch ein spezielles Shuttle, welches das Gebinde von der Verbindungsstrecke bis vor die Fassade der Zieleinlagerungskammer befördert. Dort wird der Betriebsstrahlenschutzpfropf, welcher sich hinter dem letzten eingelagerten Gebinde befindet, durch den abschirmenden Behälter entfernt, das Endlagerpaket in der Kammer platziert und der Pfropf wieder eingesetzt. Anschließend dockt der Pusher-Roboter an die Fassade an, entfernt wiederum den Betriebsstrahlenschutzpfropf, schiebt das Endlagerpaket in der Kammer nach hinten und verschließt die Kammer anschließend wieder mit dem Pfropf /IRS 17a/.

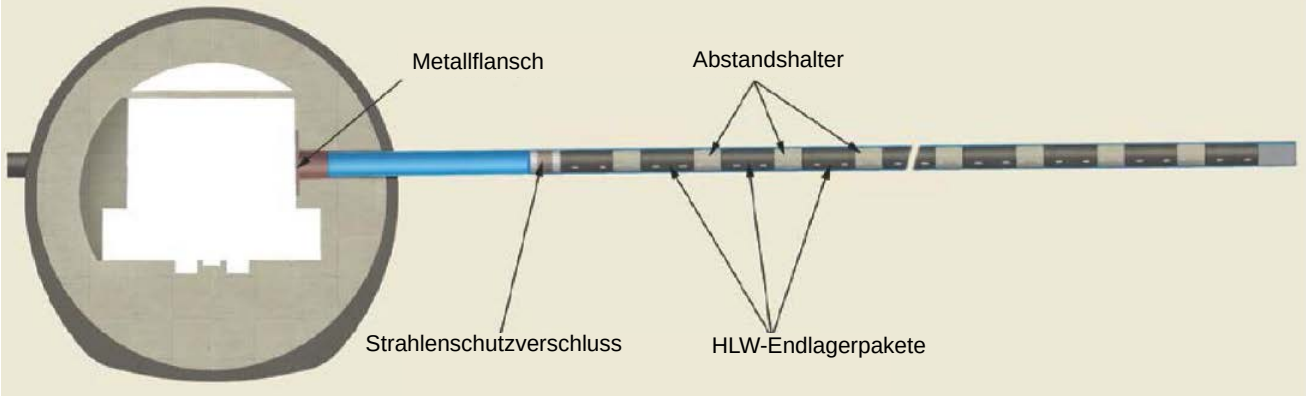


Abb. 3.13 HLW1/HLW2-Einlagerungskammer /IRS 17a/ (bearbeitet)

Die Kammern sind in Richtung der Hauptspannungsrichtung der Callovo-Oxfordian-Formation orientiert und haben eine Steigung von 2 % ± 1 % zum Ende der Kammer hin, sodass möglicherweise auftretendes Abwasser am Eingang zur Kammer gesammelt werden kann. Die Kammern haben einen Liner aus kohlenstoffarmem Stahl (minimale Dicke: 25 mm). Der ringförmige Spalt zwischen Liner und anstehendem Gebir-

ge wird mit einem Material mit günstigen Eigenschaften hinsichtlich des PH-Wertes aufgefüllt, das zurzeit noch nicht genau definiert ist /IRS 17a/. Die HLW-Kammern werden nicht bewettert /JOB 13/. Sobald eine Kammer vollständig gefüllt ist, soll sie einen Stopfen erhalten, der die Kammeratmosphäre von der Atmosphäre in den Zugangsstrecken trennt und somit verhindert, dass neuer Sauerstoff, der die Korrosion vorantreibt, in die Kammer gelangt /JOB 13/.

3.3.4.2 Einlagerungszone ILW

Für den langlebigen mittelradioaktiven Abfall werden Kammern mit einem Durchmesser von ca. 9 m und einer Länge von ca. 400 m ausgehoben /ABA 15/. Die Kammern erhalten einen dicken Betonliner und können im Querschnitt 2 x 2 oder 3 x 3 Endlagerpakete fassen, s. Abb. 3.14 /AND 15/. Insgesamt soll es 50 ILW-LL-Kammern geben /ROC 17/.

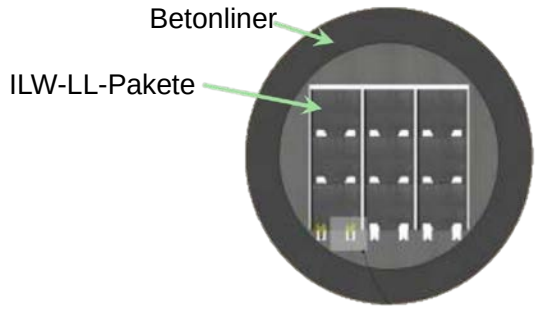


Abb. 3.14 Querschnitt durch eine ILW-LL-Einlagerungskammer /AND 15/ (bearbeitet)

In Abb. 3.15 ist der Schnitt durch eine ILW-LL-Einlagerungskammer dargestellt. Diese Kammern sind keine Sackgassen wie die HLW-Kammern, dies zeigt auch schon Abb. 3.11. Die Kammern sind so designt und angeordnet, dass sie auch wenn die Bewetterung ausfällt die Temperaturanforderungen einhalten würden /IRS 17b/. Grundsätzlich darf die Temperatur 90 °C nicht überschreiten, um den Ton nicht zu schädigen /AND 15/.

Die Transportgebinde kommen ferngesteuert von der Verbindungsstrecke zum Gebindeankunftsbereich, s. Abb. 3.15 /PEY 16/. Den Zugangsweg legen die Transportgebinde mit einem speziellen Shuttle zurück /IRS 17a/. In der Handhabungszelle befindet sich, wie auch bei den HLW-Kammern eine Abschirmungstür. An diese werden die Transportgebinde heran gefahren. Ebenfalls ferngesteuert wird dann das Endlagerpaket aus dem abschirmenden Behälter (s. Abb. 3.2) entnommen und in die Endlager-

kammer verbracht. Dort wird es mittels eines Krans (bzw. je nach Endlagerpaketart auch mit einem Gabelstapler /IRS 17a/) weiterhin ferngesteuert an die richtige Position in der Kammer transportiert /PEY 16/.

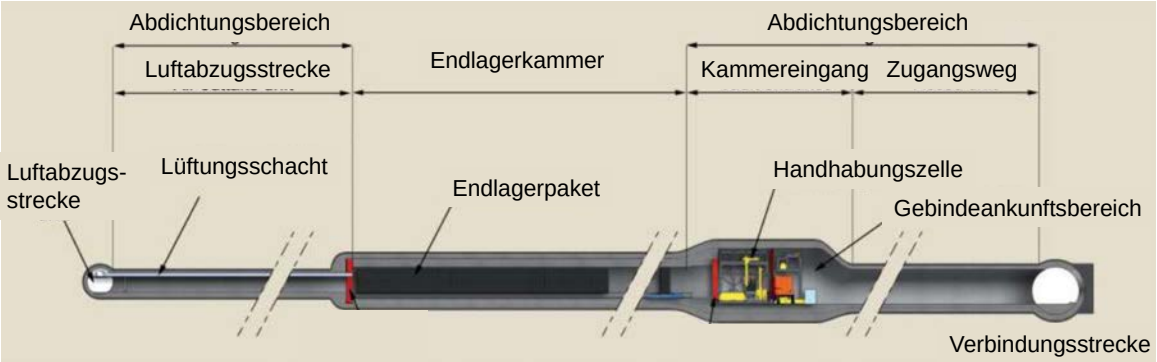


Abb. 3.15 Schnitt durch eine ILW-LL-Einlagerungskammer /AND 15/ (bearbeitet)

3.4 Co-Disposal

Cigéo dient der Endlagerung von mittelaktivem langlebigen radioaktiven Abfall und hochradioaktivem Abfall, somit findet Co-Disposal statt /AND 16d/. Beide Abfallarten nutzen die nukleare Rampe als Transportstrecke nach unter Tage. Wie bereits in Kap. 3.3.4 erläutert, gibt es unter Tage ein Einlagerungsfeld für ILW-LL, Einlagerungsfelder für HLW0 und HLW1 sowie HLW2.

Über den Betriebslogistikbereich (s. Abb. 3.11) sind die nuklearen Schächte und die Rampen mit der ILW-LL-Einlagerungszone und der HLW-Zone verbunden. Beide Abfallarten werden an der unteren Rampenstation von demselben schienengebundenen elektrisch angetriebenen Transportfahrzeug aufgenommen und bis zum Eingang der Kammerzugänge (Bsp. ILW-LL: Gebindeankunftsbereich, s. Abb. 3.15) gefahren. Ab da unterscheiden sich jedoch die Einlagerungstechniken (vgl. Kap. 3.3.4.1 und 3.3.4.2) und es werden unterschiedliche Transportstrukturen verwendet.

3.5 Verschluss

Wie die Inbetriebnahme wird auch die Schließung des Endlagers schrittweise vollzogen. Die Schließung bedarf einer weiteren Genehmigung. Die übertägigen Anlagen werden zurückgebaut wenn die untertägigen Strukturen verschlossen sind /AND 13/. Derzeit ist die endgültige Schließung im Jahr 2150 geplant /IRS 17a/. Die Schließung

erfolgt schrittweise. Geplant ist die Verschluss des HLW0-Bereichs für 2070, des ILW-LL-Bereichs für 2100 und der Verschluss des HLW1- und HLW2-Bereichs für das Jahr 2145 /IRS 17a/.

Zum Verfüllen der untertägigen Strukturen wird der Abraum verwendet, der beim Ausheben der Grube angefallen ist. Verbindungstrecken und Luftrückführungsstrecken werden verfüllt nachdem dort das Equipment entfernt worden ist /IRS 17a/. Feste Ausrüstung, z. B. in Beton verankertes Equipment, verbleibt grundsätzlich vor Ort. In den Schächten wird über der Sohle eine Wand aus steifem Beton errichtet, die als Begrenzung für die darüber liegende Versiegelung aus Ton dient. Die Tonversiegelung endet an der Basis des Oxfordian Kalksteins und wird mit einer weiteren Begrenzung abgeschlossen. In den Schächten und Rampen wird der Liner entfernt wenn die Versiegelung eingebracht wird, um direkten Kontakt zwischen anstehendem Gebirge und dem quellenden Ton herzustellen. Das untere Ende der Rampen sowie die Strecken werden zunächst verfüllt und anschließend wie die Schächte mit Ton zwischen zwei Begrenzungswänden versiegelt, s. Abb. 3.16 /ROC 17/.

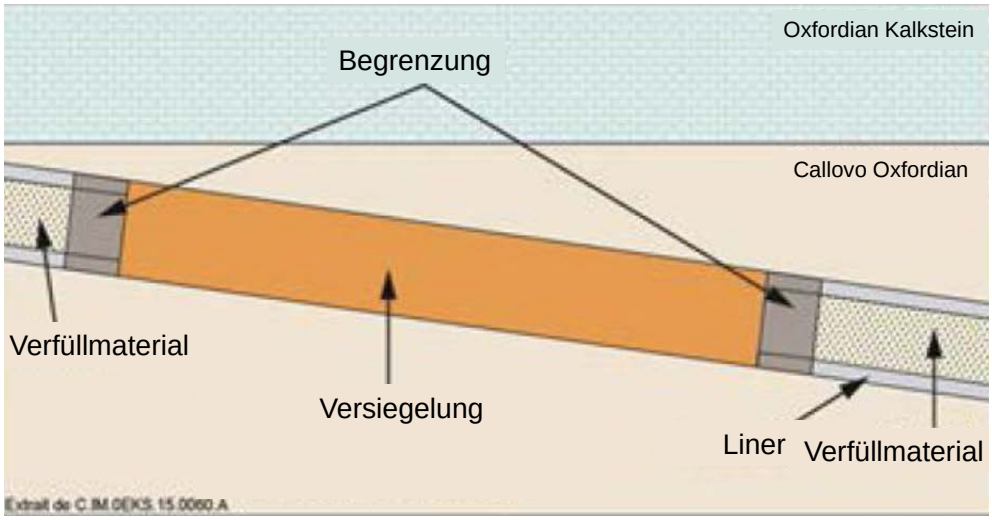


Abb. 3.16 Versiegelung der Rampen /ROC 17/ (bearbeitet)

Eine HLW-Kammer wird verschlossen, indem ein Strahlenschutzstopfen hinter das letzte eingelagerte Endlagerpaket eingebracht wird. Der Rest der Kammer wird anschließend mit einem Tonmaterial aufgefüllt. Die Bewetterung der Zugangsgalerie wird beendet und das Verfüllmaterial eingebracht /IRS 17a/.

Bei den ILW-LL-Kammern wird eine Wand aus Betonblöcken zwischen der letzten Reihe Endlagerpakete und dem Kammereingang errichtet. Auch am anderen Ende der

Kammern wird eine Betonwand installiert. Die Bewetterung wird bei Schließung der Kammern eingestellt. Die Handhabungszelle und die Luftabzugsstrecke werden komplett verfüllt. Wie genau verfüllt wird, ist zurzeit noch nicht festgeschrieben /IRS 17a/.

Versiegelungen in den horizontalen Strecken werden in ähnlicher Weise wie bei den Schächten und Rampen verwirklicht. Die Positionen der horizontalen Streckenversiegelungen sind in Abb. 3.17 dargestellt.

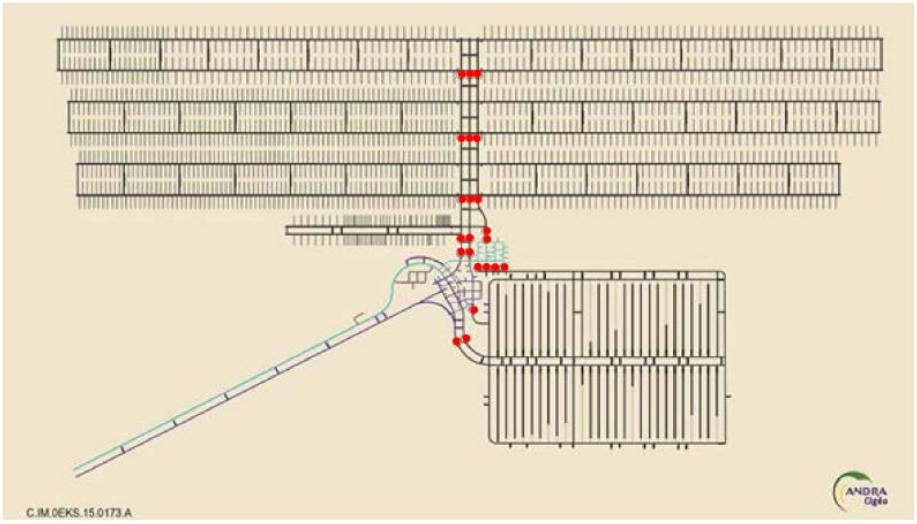


Abb. 3.17 Versiegelungen auf den horizontalen Strecken unter Tage /IRS 17a/

3.6 Rückholbarkeit

Für die Endlagerung in Cigéo ist die Rückholbarkeit für mindestens 100 Jahre gesetzlich festgelegt. Die Genehmigung für das Endlager wird erst erteilt, wenn die Bedingungen für die Rückholung der Abfälle festgeschrieben worden sind /AND 13/.

Für die eventuelle Rückholung der Abfälle wird wo möglich dasselbe Equipment genutzt wie für die Einlagerung. Wo die Einlagerungstechnik nicht für die Rückholung der Abfälle eingesetzt werden kann, können alternative Systeme verwendet werden. So ist zum Beispiel der Einsatz des Pusher-Roboters, der die HLW-Endlagerpakete in der Einlagerungskammer nach hinten schiebt nicht zum Herausholen der Abfälle geeignet. Stattdessen kann ein Puller-Roboter verwendet werden, der die Endlagerpakete hervorzieht /IRS 17a/. Der Einsatz der Einlagerungssysteme für eine mögliche Rückho-

lung ist jedoch weitestgehend möglich. So können zum Beispiel Kräne, Shuttles und andere Fahrzeuge die für eine Rückholung notwendigen Schritte durchführen /IRS 17a/.

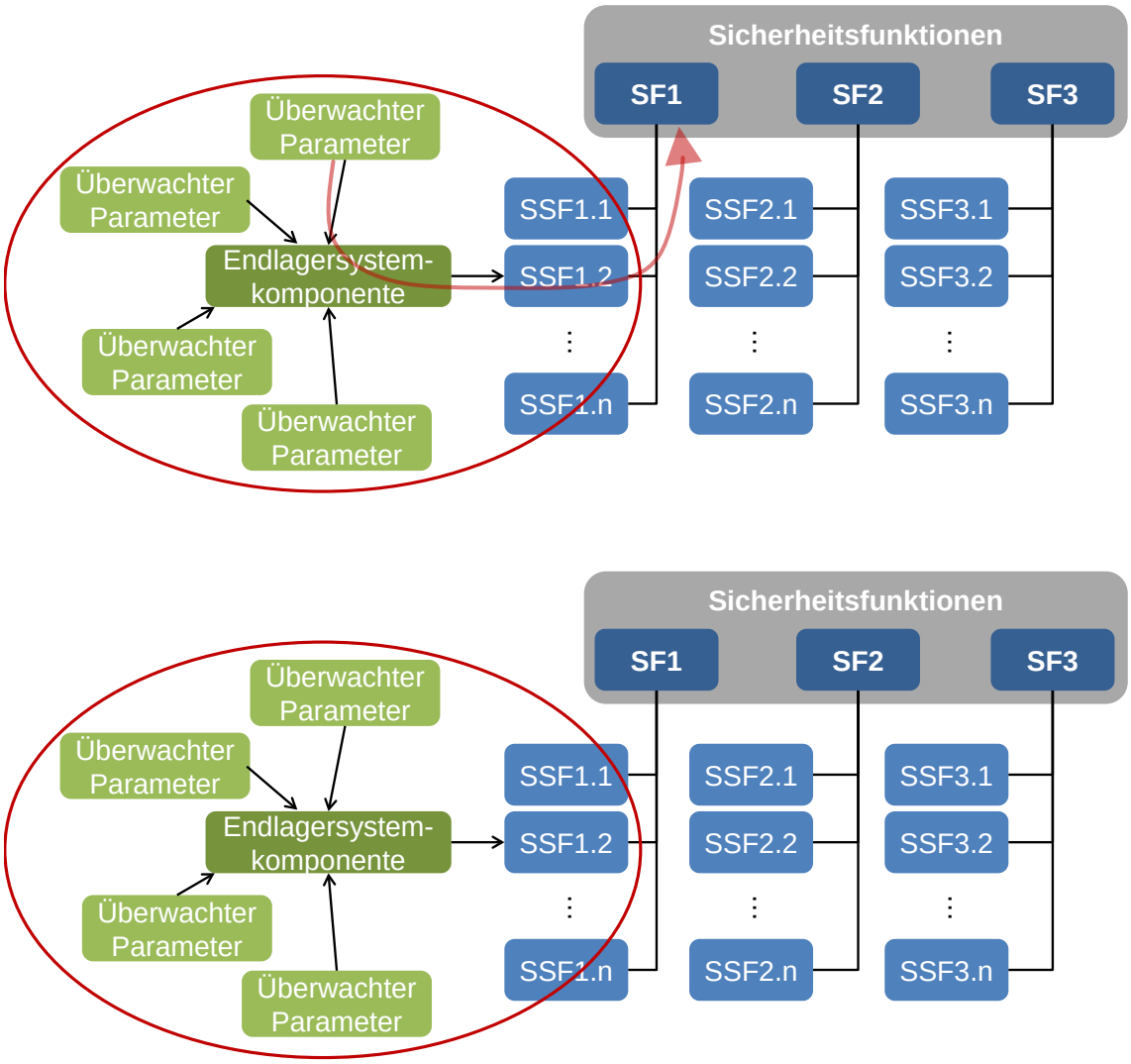
3.7 Monitoring

Das Monitoring in Frankreich dient insbesondere dazu, erwartete Entwicklungen und Modelle zu bestätigen, um Informationen für die fortlaufenden Entscheidungsprozesse zur Verfügung zu stellen und um eine höhere Sicherheit in Bezug auf die Langzeitsicherheitsanalyse zu erlangen. Eine Verbesserung dieser Modelle, zum Beispiel um Konservativitäten abzubauen, kann unter anderem ebenfalls Ziel des Monitorings sein /JOB 13/. Wie bereits in Abb. 3.1 zu sehen war, läuft das Projekt nach dem Verschluss in eine Monitoring-Phase. Die Überwachung wird nicht unendlich fortgesetzt, das Endlagersystem muss also passiv sicher sein, das heißt der Schutz von Mensch und Umwelt darf nicht abhängig vom Monitoring sein /IRS 17a/.

Das Bindeglied zwischen dem Safety Case und dem Monitoring stellen drei Sicherheitsfunktionen (SF) dar /JOB 13/:

- SF1: Wasserzirkulation entgegenwirken
- SF2: Radionuklidfreisetzung begrenzen
- SF3: Verzögern von Radionuklidmigration und Vermindern von Radionuklidkonzentration außerhalb der Endlagerkammern.

Diese übergeordneten drei Sicherheitsfunktionen werden weiter in Subsicherheitsfunktionen (SSF) herunter gebrochen. Den Subsicherheitsfunktionen können Komponenten des Endlagersystems zugeordnet werden. Parameter, die im Rahmen des Monitorings überwacht werden sollen, können über die Komponenten den Sicherheitsfunktionen zugewiesen werden. Durch redundante Systeme sollen falsche Informationen vermieden werden /JOB 13/.



Welche Parameter genau beobachtet werden, ist derzeit noch nicht festgeschrieben. Es gibt einige Kandidaten für Parameter um die Zustände der Endlagerpakete sowie in und um die Endlagerkammer zu erfassen. Eine Liste mit möglichen Kandidaten ist in Tab. 3.3 zu sehen.

Tab. 3.3 Kandidaten für Prozesse und Parameter für die Überwachung von HLW-Endlagerpaketzuständen /JOB 13/

Komponente und Einflussgebiet	Prozess	Parameter
Überverpackungs-material	Spezifische mechanische Festigkeit des Materials	Spannung (Druck, Zug)
		Dehnung
	Spezifische Korrosionseigenschaften des Materials	Korrosion unter in-situ-Bedingungen
Überverpackung	Korrosion	Oberflächenkorrosion
		Schweißnahtkorrosion
		Gleitkontaktkorrosion
Kammeratmosphäre	Wärmeabfuhr Wasseraustausch mit Nahfeld	Temperatur
		Relative Feuchtigkeit
		Flüssigwasseranteil
	Gasaustausch mit Zugangsstrecke	Sauerstoffkonzentration
	Anoxische Korrosion	Sauerstoffkonzentration
	Radiolyse	
	Strahlung	Wärmeeinstrahlung
Kammerliner	Thermomechanische Belastung	Temperatur
		Dehnung
	Radiale mechanische Belastung	Gesamtdruck an Kontaktflächen
		Lastposition
	Deformation	Radiale Deformation
	Ausgleichsvorgang zum hydraulischen Gleichgewicht	Relative Feuchtigkeit
		Hydraulischer Druck
Nahfeld	Wärmeabfuhr	Temperatur
	Ausgleichsvorgang zum mechanischen Gleichgewicht	Radiale Deformation
	Rücksättigung	Wassergehalt
		Interstitieller Druck

Die ersten ILW-LL-Kammern werden sehr viele Instrumente zur Überwachung beinhalten. Eine dieser Referenzkammern wird schon wenige Jahre nach dem Füllen versiegelt um auch ein geschlossenes System beobachten zu können /AND 13/.

Für das Monitoring einer HLW-Kammer existieren verschiedene Möglichkeiten. Der Liner der Kammer könnte mit Messinstrumenten ausgestattet werden. Eine weitere Möglichkeit ist, das Gestein um die Kammer herum mit Bohrlöchern zu versehen und diese zu instrumentieren. Eine dritte Option wäre, die Versiegelung mit dem Monitoringsystem auszurüsten /JOB 13/. Abb. 3.18 gibt einen Überblick, wie eine Verteilung der Monitoringinstrumente in der Einlagerungszone aussehen könnte. Die „Witness"-Kammern beinhalten viele Monitoringinstrumente und werden unter den ersten errichteten Kammern ausgewählt. Sie werden so gewählt, dass ihre Verteilung eine repräsentative Überwachung zulässt. Die „Current"-Kammern sind weniger instrumentiert. Die Standardkammern sind grundsätzlich nicht mit Messsystemen, die über das für die betriebliche Sicherheit notwendige Equipment hinaus gehen, ausgestattet /JOB 13/.

Am Rand eines Endlagermoduls können Randeffekte auftreten, z. B. dadurch dass die Seite zum Modul hin wärmer ist als die Außenseite einer Randkammer oder durch bereits erwärmte Wetter zum Ende eines Moduls hin. Deshalb werden die instrumentierten Kammern derart verteilt, dass sowohl Kammern mit Randeffekten als auch Kammern ohne Randeffekte überwacht werden können, s. Abb. 3.18. Zudem sollen falsche Messwerte durch Redundanz ausgeschlossen werden.

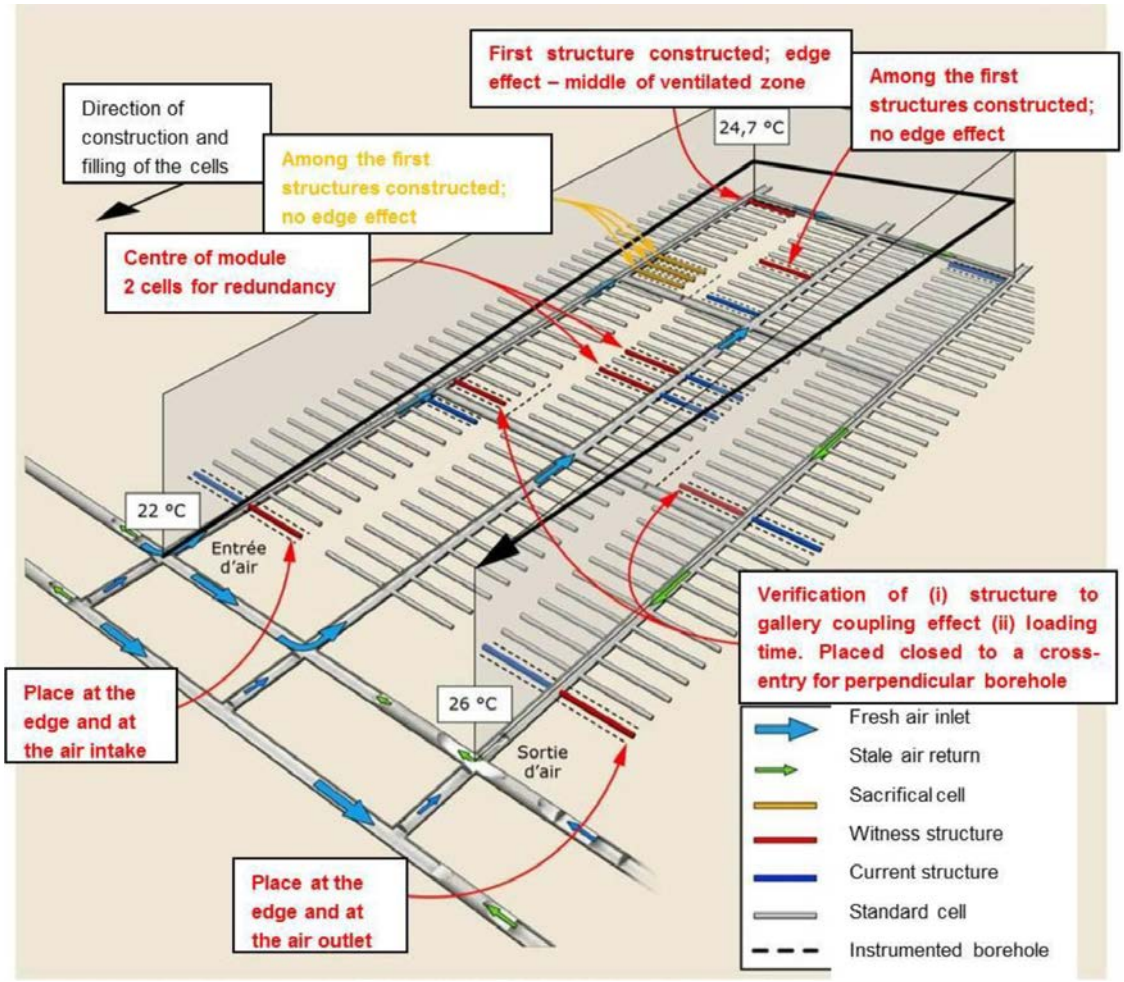


Abb. 3.18 Beispiel für die Verteilung von Monitoringinstrumenten in einem HLW-Modul /JOB 13/

Eine besondere Herausforderung stellt der Informationsfluss aus der Kammer hinaus dar. Eine Möglichkeit zur Bestimmung von Korrosionsgeschwindigkeiten besteht darin, eine oder mehrere „Sacrificial cells“ (Opferkammern) mit Materialproben bereitzustellen. Die Temperatur und Dosisleistung beeinflussen die Korrosionsgeschwindigkeit, daher müssen die Opferkammern richtige Endlagerpakete enthalten. Aufgrund der Erwartung, dass ein Übergang zu niedrigeren Korrosionsgeschwindigkeiten nach einigen Jahren bis Jahrzehnten stattfindet, müsste die Opferkammer 15, 30 oder möglicherweise 50 Jahre nach der Einlagerung und Verfüllung geöffnet werden und die Materialprobe entnommen werden. Da das Öffnen die Kammeratmosphäre nachteilig beeinflusst, müsste für jede Öffnung eine zusätzliche Kammer mit Probe zur Verfügung stehen. Demnach könnten zwei oder drei Opferkammern nötig sein /JOB 13/.

4 Anforderungen

Aus Angebot 857778: „[…] Grundanforderungen dieser Konzepte an Endlagerkonzepte abgeleitet. Berücksichtigt werden hierbei die Sicherheitskonzepte, Barrierenkonzepte und Behälterkonzepte und der Einfluss, den eine mögliche Endlagerung unterschiedlicher Abfallarten im selben Endlager (Co-Disposal) auf die Sicherheit des Endlagers hat.“

Auf die Sicherheitsfunktionen ist bereits kurz in Kap. 3.7 eingegangen worden. Die Sicherheitsfunktionen des Endlagers sollen nach dem Verschluss der Anlage der Wasserzirkulation entgegenwirken, die Radioaktivität einschließen und die Abfälle vor dem Menschen und der Biosphäre isolieren /ASN 08/.

Das Endlager folgt den Sicherheitsprinzipien aus dem „Guide de sûreté relatif au stockage définitif des déchets radioactifs en formation géologique profonde“, einem Leitfaden der ASN /ROC 17/. Dieser Leitfaden gibt grundlegende Richtlinien zum Entwurf des Endlagers /ASN 08/.

4.1 Anforderungen aus dem französischen Endlagerkonzept

Eine Anforderung, die sich speziell für den Fall eines geologischen Endlagers in Ton ergibt, ist eine Temperaturbeschränkung, um das Tongestein nicht zu schädigen. Des Weiteren ist der Ausbau der Strecken und Kammern, der Schächte und Rampen für Ton von Bedeutung. Im vorgestellten Konzept werden die meisten untertägigen Strukturen mit Beton ausgebaut und ggfs. einem kompressiblen Material zwischen Beton und anstehendem Gestein, dass eine geringe Konvergenz des Gesteins zulässt. Die HLW-Kammern erhalten Stahlliner. Anforderungen an die Behälter wie etwa die Handhabbarkeit und Begrenzung der Dosisleistung sind bereits in den Tab. 3.1 und Tab. 3.2 aufgezeigt worden.

Ein Mehrbarrierensystem ist ebenfalls Teil der Auslegung. Dies sollte grundsätzlich verfolgt werden. Im vorliegenden Fall sind die Primärpakete, Endlagerpakete, die Versiegelungen und das Gestein Teile davon. Das Endlagersystem folgt dem „Defence-in-depth“-Konzept. Für identifizierte Störfälle versucht Andra den Eintritt zu verhindern oder vorzubeugen und die Eintrittswahrscheinlichkeit zu verringern /AND 13/.

Eine weitere Anforderung ist, dass das Endlager nach Verschluss passiv sicher ist, sodass keine Maßnahmen mehr erforderlich sind um die Sicherheit in der Nachverschlussphase zu gewährleisten. Die verschiedenen Komponenten des Endlagersystems leisten unterschiedliche Beiträge zur Gesamtsicherheit der Anlage und müssen diese auch für unterschiedlich lange Zeiträume aufrechterhalten. Eine Komponente kann an einer oder mehreren Sicherheitsfunktionen beteiligt sein /ASN 08/. Die Erhaltung der Funktion des Wirtsgesteins wird gefordert /ASN 08/. Aufgrund der geringeren Festigkeit des Tons gegenüber anderen Gesteinen ist hier sicherzustellen, dass auch etwa bei klimatischen Veränderungen oder Gebirgshebungen-/senkungen die Wirtsgesteinseigenschaften der Formation noch gegeben sind. Bei plastisch-tonigen Sedimenten bzw. Sedimentgesteinen ist die geologische Barriere von besonderer Bedeutung. Temporär sind auch die technischen und geotechnischen Barrieren maßgeblich /BRA 08/.

Durch die Einlagerung von ILW-LL und HLW im selben Endlager und ebenso durch den gleichzeitigen Errichtungs- und Einlagerungsbetrieb darf die Sicherheit nicht beeinträchtigt werden. Der Errichtungs- und Einlagerungsbetrieb erfolgen komplett getrennt voneinander mit jeweils eigener Bewetterung und hauptsächlich von verschiedenen obertägigen Anlagen aus, sodass hier eine Beeinflussung der Sicherheit des Endlagers ausgeschlossen werden soll.

Neben der Anforderung, dass keine Sicherheitseinbußen durch das Co-Disposal entstehen dürfen, könnte die optimale Ausnutzung der gemeinsam genutzten Strukturen einen Anspruch an ein Endlager darstellen.

Abkürzungsverzeichnis

ANDRA	Agence Nationale pour la Gestion des Déchets Radioactifs
ASN	Autorité de sûreté nucléaire (französische Behörde für nukleare Sicherheit)
Cigéo	Centre industriel de stockage géologique
HLW	high-level waste (hochradioaktiver Abfall)
ILW-LL	intermediate-level long-lived waste (mittelradioaktiver langlebiger Abfall)
ZIRA	zone d'intérêt pour la reconnaissance approfondie (zone of interest for detailed reconnaissance)
ZT	zone de transposition (transposition zone)

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1 Wichtige Daten im Zusammenhang mit Cigéo 4

Abb. 2.2 Lage Cigéo in Frankreich /AND 12b/ (bearbeitet) 5

Abb. 2.3 Transposition Zone und ZIRA /AND 12b/ (bearbeitet) 6

Abb. 3.1 4 Phasen von Cigéo /AND 16b/ 9

Abb. 3.2 Behälter im Zusammenhang mit der Einlagerung 11

Abb. 3.3 HLW-Container (Beispiel) /IRS 17a/ (bearbeitet) 12

Abb. 3.4 HLW-Transportgebinde /PEY 16/ 12

Abb. 3.5 ILW-LL-Container (Beispiel) /IRS 17a/ (bearbeitet) 14

Abb. 3.6 Übertägige Einrichtungen am nuklearen Teil des Rampenbereichs „EP1“ /IRS 17a/ (bearbeitet) 17

Abb. 3.7 HLW-Transportgebinde-Transport nach unter Tage /PEY 16/ (bearbeitet) 18

Abb. 3.8 Obere Rampenstation /PEY 16/ (bearbeitet) 19

Abb. 3.9 Untere Rampenstation /PEY 16/ (bearbeitet) 19

Abb. 3.10 Bewetterung /WIN 13/ (bearbeitet) 20

Abb. 3.11 Überblick über den untertägigen Teil Cigéos /PEY 16/ (bearbeitet) 21

Abb. 3.12 Errichtung des Endlagers unter Tage während des Betriebs /VOI 14/ (bearbeitet) 22

Abb. 3.13 HLW1/HLW2-Einlagerungskammer /IRS 17a/ (bearbeitet) 23

Abb. 3.14 Querschnitt durch eine ILW-LL-Einlagerungskammer /AND 15/ (bearbeitet) 24

Abb. 3.15 Schnitt durch eine ILW-LL-Einlagerungskammer /AND 15/ (bearbeitet) 25

Abb. 3.16 Versiegelung der Rampen /ROC 17/ (bearbeitet) 26

Abb. 3.17 Versiegelungen auf den horizontalen Strecken unter Tage /IRS 17a/ 27

Abb. 3.18 Beispiel für die Verteilung von Monitoringinstrumenten in einem HLW-Modul /JOB 13/ 32

Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1 Gesteinsformationen am Standort des Endlagers /AND 05/ 7

Tab. 3.1 Aufgaben von Primärpaket und Endlagercontainer für HLW (Auswahl) /IRS 17a/ 13

Tab. 3.2 Aufgaben von Primärpaket und Endlagercontainer für ILW-LL (Auswahl) /IRS 17a/ 15

Tab. 3.3 Kandidaten für Prozesse und Parameter für die Überwachung von HLW-Endlagerpaketzuständen /JOB 13/ 30

Literaturverzeichnis

/ABA 15/ Abadie, P.-M.: CIGÉO The French HL and IL-LL waste repository in a clay formation. Präsentation, 16. September 2015.

/AND 12a/ Agence Nationale pour la Gestion des Déchets Radioactifs (ANDRA): Pre-disposal management of HLW and ILW-LL. 2 S., erreichbar unter , abgerufen am 10. Juli 2017.

/AND 15/ Agence Nationale pour la Gestion des Déchets Radioactifs (ANDRA): The research programme on argillaceous rock in France, Current status, future research needs. Präsentation, ESK-Workshop on German radioactive waste disposal research, 20. Januar 2015.

/AND 13/ Agence Nationale pour la Gestion des Déchets Radioactifs (ANDRA): The Cigeo Project, Meuse/Haute-Marne reversible geological disposal facility for radioactive waste. 104 S., 2013.

/AND 16a/ Agence Nationale pour la Gestion des Déchets Radioactifs (ANDRA): Andra Sites International - who are we? , 2 S., Stand vom 25. September 2014, erreichbar unter http://www.andra.fr/international/pages/en/menu21/andra/who-are-wer-1584.html, 2016.

/AND 12b/ Agence Nationale pour la Gestion des Déchets Radioactifs (ANDRA): Cigeo.com - Site of the facilities. 2 S., Stand vom 13. September 2012, erreichbar unter http://www.cigeo.com/en/site-of-the-facilities, 2016.

/AND 05/ Agence Nationale pour la Gestion des Déchets Radioactifs (ANDRA): Dossier 2005 Argile - Synthesis - Evaluation of the feasibility of a geological repository in an argillaceous formation. 241 S., Dezember 2005.

/AND 16b/ Agence Nationale pour la Gestion des Déchets Radioactifs (ANDRA): Position Paper on Reversibility. 32 S., Januar 2016.

/AND 16c/ Agence Nationale pour la Gestion des Déchets Radioactifs (ANDRA): Andra in Meuse / Haute-Marne. 20 S., November 2016.

/AND 16d/ Agence Nationale pour la Gestion des Déchets Radioactifs (ANDRA): Cigéo Project, Deep geological disposal facility for radioactive waste in Meuse / Haute-Marne departments. September 2016.

/ASN 08/ Autorité de sûreté nucléaire (ASN): Guide de sûreté relatif au stockage définitif des déchets radioactifs en formation géologique profonde. 32 S., 2008.

/BRA 08/ Brasser, T., Herbert, H.-J., Miehe, R., Schmidt, G.: Anhang Wirtsgesteine, Potenzielle Wirtsgesteine und ihre Eigenschaften. In: Müller-Lyda, I., Sailer, M. (Hrsg.): Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in Deutschland, BMWi-Vorhaben, FKZ 02E9783 & 02E9793. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Öko-Institut e.V., GRS-247, ISBN 978-3-939355-22-9: Braunschweig / Darmstadt, September 2008.

/ESK 11/ Entsorgungskommission: Rückholung/Rückholbarkeit hochradioaktiver Abfälle aus einem Endlager - ein Diskussionspapier. 45 S., 2. September 2011.

/IRS 17a/ Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN): RAPPORT IRSN N° 2017-00013 - Projet de stockage Cigéo - Examen du Dossier d'Options de Sûreté - TOME 1. 243 S., 2017.

/IRS 17b/ Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN): RAPPORT IRSN N° 2017-00013 - Projet de stockage Cigéo - Examen du Dossier d'Options de Sûreté - TOME 2. 209 S., 2017.

/JOB 13/ Jobmann, M. (Hrsg.): MoDeRn Case Studies Final Report, EC Deliverable: D-4.1. 148 S., DOI 10.2172/1151778, 2013.

/OEC 11/ OECD/NEA: Nuclear legislation in OECD and NEA countries: France, Regulatory and Institutional Framework for Nuclear Activities. 65 S., 2011.

/PEY 16/ Peyrolles, F., Bosgiraud, J.-M.: Joint NEA/IAEA Workshop OPERATIONAL SAFETY OF GEOLOGICAL REPOSITORIES, On-site transportation of radioactive waste. Präsentation, Agence Nationale pour la Gestion des Déchets Radioactifs (ANDRA), 29. Juni 2016.

/ROC 17/ Rocher, M.: Cigéo geological disposal project: Review of the safety options dossier (2016-2017). Präsentation, Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN), European Nuclear Safety Training & Tutoring Institute (enstti): Kaunas, 16. Juni 2017.

/VOI 14/ Voinis, S.: Cigéo project -Safety issues, Andra-experiences. Präsentation, Agence Nationale pour la Gestion des Déchets Radioactifs (ANDRA), 29. Mai 2014.

/WIN 13/ Winter, D. de, Claudel, D., Cite, O.: Operational safety in the underground facilities of a deep geological disposal of nuclear waste, General presentation Cigéo Project 2012 preliminary design. Präsentation, ITA-COSUF Publications, 2013.

Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH

Schwertnergasse 1
50667 Köln
Telefon +49 221 2068-0
Telefax +49 221 2068-888

Boltzmannstraße 14
85748 Garching b. München
Telefon +49 89 32004-0
Telefax +49 89 32004-300

Kurfürstendamm 200
10719 Berlin
Telefon +49 30 88589-0
Telefax +49 30 88589-111

Theodor-Heuss-Straße 4
38122 Braunschweig
Telefon +49 531 8012-0
Telefax +49 531 8012-200

www.grs.de

ISBN 978-3-946607-54-0