

Vergleich von Optionen für die Entsorgung schwach- und mittelradioaktiver Abfälle

Für den Österreichischer Beirat für die Entsorgung radioaktiver Abfälle

Wien, 2024

Impressum

Herausgeber: Österreichischer Beirat für die Entsorgung radioaktiver Abfälle -
Entsorgungsbeirat

Medieninhaber: Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität,
Innovation und Technologie, Radetzkystraße 2, 1030 Wien

Autorinnen und Autoren: Dr. Florian Krob, Dr. Matthias Englert, Julia Mareike Neles, Dr.
Christoph Pistner, Öko-Institut e. V.

Wien, 2024. Stand: Februar 2024

Rückmeldungen: Ihre Überlegungen zu vorliegender Publikation übermitteln Sie bitte an
kontakt@entsorgungsbeirat.gv.at.

Inhalt

Inhalt	4
1 Einleitung	6
2 Sachstand zu den radioaktiven Abfällen in Österreich	8
2.1 Abfallströme, Klassifizierung und Handhabung.....	8
2.1.1 Abfallströme	8
2.1.2 Klassifizierung und Abfallinventar in Österreich	10
2.2 Prognose der zukünftigen Abfallmengen	12
2.3 Nationale und internationale regulatorische Anforderungen.....	16
3 Optionen für die Entsorgung radioaktiver Abfälle	19
3.1 Oberflächenlagerung	24
3.1.1 Technische Beschreibung	24
3.1.2 Internationale Beispiele von Oberflächenlagerung.....	35
3.1.3 Vor- und Nachteile der Oberflächenlagerung	40
3.2 Lagerung mittlerer Tiefe	42
3.2.1 Technische Beschreibung	42
3.2.2 Internationale Beispiele für die Lagerung mittlerer Tiefe	48
3.2.3 Vor- und Nachteile der Lagerung mittlerer Tiefe	58
3.3 Endlagerung in geologischen Tiefenlagern.....	61
3.3.1 Technische Beschreibung	61
3.3.2 Internationale Beispiele von geologischen Tiefenlagern	69
3.3.3 Vor- und Nachteile von Endlagern in geologischen Tiefenlagern	80
3.4 Bohrlochlagerung.....	83
3.4.1 Technische Beschreibung	83
3.4.2 Internationale Beispiele von Bohrlochlagerung	98
3.4.3 Vor- und Nachteile von Bohrlochlagerung	104
3.5 Internationale Entsorgungsoptionen.....	106
4 Vergleichende Bewertung	112
4.1 Endlageroptionen für LILW-SL-Abfälle.....	114
4.2 Endlageroptionen LILW-LL-Abfällen	126
4.3 Konsequenzen und Schlussfolgerungen	130
Tabellenverzeichnis	134
Abbildungsverzeichnis	135

Literaturverzeichnis	139
Abkürzungen.....	148

1 Einleitung

Österreich hat sich im Jahr 1978 gegen einen Einstieg in die Nutzung der Kernenergie zur kommerziellen Stromerzeugung entschieden. Österreich wurde vertraglich zugesichert, dass abgebrannte Brennelemente aus dem Forschungsreaktor TRIGA der TU Wien an den Lieferanten in die USA zurückgegeben werden. Auch für die Zukunft ist gesetzlich geregelt, dass in Österreich keine abgebrannten Brennelemente zur Entsorgung hinzukommen werden. Allerdings fallen in Österreich aus Medizin, Industrie und Forschung schwach- und mittelradioaktive Abfälle (LILW) an.

Bis zu einer Entscheidung über die endgültige Entsorgung lagern die radioaktiven Abfälle im Zwischenlager der Nuclear Engineering Seibersdorf GmbH (NES) am Standort Seibersdorf. Diese Zwischenlagerung ist durch einen Entsorgungsvertrag bis vorerst 2045 vertraglich abgesichert (BMK 2022).

Für den Großteil der LILW-Abfälle ist ein Isolationszeitraum von 300 – 500 Jahren bis zum Abklingen der Abfälle ausreichend (Pusch et al. 2017). Dagegen ist für einen kleinen Teil der LILW-LL-Abfälle ab einem bestimmten Anteil von langlebigen Radionukliden der sichere Einschluss und die Isolation der radioaktiven Abfälle von Mensch und Umwelt für einige Tausend Jahre vorgesehen (IAEA 2011a).

In seinem Nationalen Entsorgungsprogramm hat Österreich das Ziel formuliert, bis 2045 eine langfristige Lösung für die Lagerung der radioaktiven Abfälle zu finden. Denkbar ist in diesem Zusammenhang auch eine Kooperation mit anderen Staaten unter den Bedingungen der EURATOM Richtlinie 2011/70 (Euratom 2011).

Das Ziel einer sicheren Entsorgung ist gemäß § 1 Absatz 1 des Strahlenschutzgesetzes (StrSchG 2020) wie folgt definiert:

„§ 1. (1) Ziel dieses Bundesgesetzes ist

1. der Schutz von Personen, einschließlich ihrer Nachkommenschaft, sowie der Umwelt im Hinblick auf einen langfristigen Schutz der menschlichen Gesundheit vor Gefahren durch ionisierende Strahlung,

2. die Gewährleistung eines hohen Maßes an nuklearer Sicherheit sowie

3. die verantwortungsvolle und sichere Entsorgung von abgebrannten Brennelementen und radioaktiven Abfällen

*unter Berücksichtigung international anerkannter Sicherheitsstandards.“
(StrSchG 2020)*

Für die Entsorgung der in Österreich anfallenden radioaktiven Abfälle soll eine optimale und akzeptierte Lösung gefunden werden (BMK 2022).

Die Österreichische Agentur für Gesundheit und Ernährungssicherheit GmbH hat im Auftrag des Entsorgungsbeirats von Österreich das Öko-Institut e.V. mit Schreiben vom 07.02.2023 auf Basis des Angebots vom 21.11.2022 beauftragt, eine Studie zu erstellen, die die potenziell geeigneten Entsorgungsoptionen Oberflächenlagerung, Lagerung mittlerer Tiefe, geologische Tiefenlagerung und Bohrlochlagerung sowie mögliche sinnvolle Kombinationen dieser Optionen allgemeinverständlich darstellt. Darin werden jeweils Vor- und Nachteile sowie Unsicherheiten bzw. Ungewissheiten aufgezeigt. Internationale Beispiele werden vorgestellt, so weit recherchierbar wird dabei auch auf die jeweiligen Kosten eingegangen.

Im Einzelnen gliedert sich der vorliegende Bericht wie folgt: In Kapitel 2 wird der Sachstand hinsichtlich der zu entsorgenden Abfallmengen und Abfallkategorien bis 2045 sowie der aktuell bestehenden regulatorischen Anforderungen zusammengefasst. Kapitel 3 stellt die einzelnen Entsorgungsoptionen anhand technischer Beschreibungen, bereits vorhandener internationaler Beispiele und deren Vor- und Nachteile vor, wobei auch auf Kombinationen verschiedener Endlagertypen und den Sachstand multinationaler Entsorgungsoptionen eingegangen wird. In Kapitel 4 werden die Erkenntnisse aus Kapitel 3 den Randbedingungen und Anforderungen in Österreich (Kapitel 2) gegenübergestellt und Einschätzungen abgeleitet.

2 Sachstand zu den radioaktiven Abfällen in Österreich

Dieses Kapitel gibt einen kurzen Überblick über die Bestandsaufnahme der radioaktiven Abfälle in Österreich. Diese Bestandsaufnahme dient der Aufbereitung der Randbedingungen in Österreich und deren Einordnung im Hinblick auf verschiedene Endlageroptionen, die für Österreich in Frage kommen. Die hier dargestellten Angaben basieren auf den Ausführungen des nationalen Entsorgungsprogramms (BMK 2022) und der Studie des NES (NES 2022).

Zunächst geht Kapitel 2.1 auf die unterschiedlichen Abfallströme und die Klassifizierung der in Österreich endzulagernden radioaktiven Abfälle ein. Kapitel 2.2 führt aus, mit welchen Abfallmengen und Volumina bis 2045 zu rechnen ist und zeigt auf, mit welchen Mengen an endzulagernden radioaktiven Abfällen in Österreich für die verschiedenen Endlageroptionen geplant werden muss. In Kapitel 2.3 erfolgt dann ein knapper Überblick über regulatorische Anforderungen mit Blick auf die Entsorgung der in Österreich zukünftig vorhandenen radioaktiven Abfälle.

2.1 Abfallströme, Klassifizierung und Handhabung

2.1.1 Abfallströme

Gemäß dem Nationalen Entsorgungsprogramm (BMK 2022) fallen in Österreich ausgehend von heutigem Kenntnisstand keine abgebrannten Brennelemente zur Entsorgung im Inland an. Weiterhin ist die Errichtung und der Betrieb von Kernkraftwerken zur Energieerzeugung gesetzlich untersagt. Daher fallen abgebrannte Brennelemente ausschließlich beim Betrieb des Forschungsreaktors des TRIGA Center am Atominstitut der Technischen Universität Wien an. Forschungsreaktoren dürfen laut § 141 Absatz 3 Strahlenschutzgesetz (StrSchG 2020) in Österreich nur betrieben werden, wenn sich der Hersteller oder die Lieferanten der Brennelemente zu deren Rücknahme verpflichtet haben (BMK 2022).

Die Rückführung sämtlicher in Österreich angefallener abgebrannter Brennelemente nach der Stilllegung des Forschungsreaktors TRIGA (geplant für 2025 oder später (BMK 2022)) ist

zwischen dem United States Department of Energy, der TU Wien und EURATOM vertraglich zugesichert (FMRA 2020). Demnach ist davon auszugehen, dass in Österreich keine hochradioaktiven wärmeentwickelnden Abfälle (HLW) zu entsorgen sind. Solche werden in dieser Studie fortan nicht weiter betrachtet.

Daraus ergibt sich, dass die in Österreich vorhandenen und weiter anfallenden radioaktiven Abfälle aus vornehmlich zwei Abfallströmen entstehen (BMK 2022):

Der mengenmäßig wesentlich größere Abfallstrom (> 90%) der jährlich anfallenden Abfälle (~ 300 Tonnen (t)/Jahr (a)) setzt sich aus den Abfällen aus der Dekontaminierung und dem Rückbau sämtlicher kerntechnischer Anlagen (Dekommissionierung, kurz: Deko-Abfälle) zusammen. Der Hauptteil dieser Abfälle besteht aus möglicherweise radioaktiv kontaminierten Anlagenteilen, Labor- und Einrichtungsgegenständen, Bauschutt oder ähnlichen Stoffen (BMK 2022). Für weitere Details zu der Zusammensetzung der Deko-Abfälle, den jährlich anfallenden Mengen und den einzelnen Rückbauprojekten ist an dieser Stelle auf den Bericht der NES (NES 2022) zu verweisen.

Die anfallenden Abfälle werden zunächst hinsichtlich ihrer Kontamination sortiert. Der große Teil der jährlich anfallenden Deko-Abfälle (~ 78,2% der insgesamt anfallenden Abfälle) weist dabei keine bzw. eine so geringe Kontamination auf, dass er nicht als radioaktiver Abfall klassifiziert wird. Diese Abfälle können nach der Freimessung konventionell entsorgt werden (BMK 2022) und werden in dieser Studie somit nicht weiter betrachtet. Die restlichen Deko-Abfälle (~ 46 t/a entsprechen 15,3% der insgesamt anfallenden Abfälle) werden von der NES als radioaktiver Abfall behandelt und konditioniert (NES 2022).

Der mengenmäßig wesentlich kleinere Abfallstrom (~ 6,5%; ~ 19,5 t/a) ergibt sich aus den Abfällen, die in der Medizin, der Industrie und der Forschung (kurz: MIF-Abfälle) anfallen. Es handelt sich zum großen Teil um brennbares Material aus Medizin und Forschung, wie z. B. Schutzkleidung, Verbandsmaterial, medizinisches Besteck, Reinigungsmaterial und Chemikalien. Kontaminierter Bauschutt, welcher bei dem Rückbau von Laboratorien aus der Forschung und Industrie anfällt, wird ebenfalls den MIF-Abfällen anteilig zugerechnet (NES 2022). Weiterhin fallen in der Industrie überwiegend nicht brennbare Abfälle wie umschlossene Strahlenquellen oder kontaminierte Anlagenteile an (BMK 2022). Ihr Anteil ist jedoch so gering, dass er bei den Tonnagen keine Rolle spielt (NES 2022). Für weitere Details zu der Zusammensetzung der MIF-Abfälle, des jährlichen Abfallaufkommens und den einzelnen Mengenanteilen ist an dieser Stelle auf den Bericht der NES (NES 2022) zu verweisen.

2.1.2 Klassifizierung und Abfallinventar in Österreich

Die Klassifizierung der anfallenden Abfälle richtet sich nach der Empfehlung der EU-Kommission (Commission Recommendation of 15 September 1999 on a classification system for solid radioactive waste 1999/669/EC, (Euratom 1999)) und basiert auf den Richtlinien der International Atomic Energy Agency (IAEA), (IAEA 2009b). Aus den internationalen Richtlinien erfolgt die in Österreich derzeit gültige Klassifizierung radioaktiver Abfälle als:

- **Abklingabfall (Transition radioactive waste/ Very Short-Lived Waste (VSLW))**

Als Abklingabfälle gelten Abfälle, welche eine Halbwertszeit von unter 100 Tagen aufweisen. Diese Abfälle werden gelagert, bis die Radioaktivität abgeklungen ist. Nach der Abklinglagerung werden die Abfälle freigemessen und fortan als inaktive konventionelle Abfälle freigegeben und behandelt. Daher sind Mengen und Handhabung in dieser Studie nicht weiter zu berücksichtigen (siehe oben).

- **LILW (Low and Intermediate Level Waste)**

Short-Lived (LILW-SL):

Zu dieser Kategorie zählen Abfälle mit Halbwertszeiten von maximal 30 Jahren ähnlich denen von ^{137}Cs und ^{90}Sr . Die Konzentration der langlebigen Alphastrahlenden Nuklide in solchen Abfällen ist dabei begrenzt und beträgt auf Empfehlung der EU-Kommission für diese Kategorie weniger als 4.000 Bq/g als Aktivität für Einzelgebinde.

Die Begrenzung der durchschnittlichen Aktivität der langlebigen Radionuklide für das gesamte Abfallaufkommen liegt jedoch bei 400 Bq/g. Daher behält sich die NES vor, diesen Grenzwert ebenfalls als Richtlinie für Einzelgebinde zu nutzen, um in jedem Fall sicherzugehen, dass die Grenzwerte des gesamten Abfallaufkommens nicht überschritten werden (NES 2022). Die NES weist in diesem Zusammenhang darauf hin, dass diese konservative Kategorisierung Auswirkungen auf die Mengen der langlebigen Abfälle hat.

Mit Stand 31.12.2021 lagerten in Österreich laut NES ~ **2.512 m³ an LILW-SL-Abfällen** mit einer Gesamtaktivität von **4,02·10¹⁵ Bq**. Bei den Angaben der NES handelt es sich um fertig konditionierte Gebinde im Zwischenlager.

Long-Lived (LILW-LL):

Zu den LILW-LL-Abfällen zählen Abfälle, die die oben aufgeführten Grenzwerte für LILW-SL-Abfälle übersteigen.

Mit Stand 31.12.2021 lagerten in Österreich laut NES ~ **52 m³ an LILW-LL-Abfällen** mit einer Gesamtaktivität von **5,66·10¹² Bq**.

Insgesamt lagerten mit Stand 31.12.2021 im Zwischenlager der NES somit ~ **2.564 m³ radioaktive (Roh-)Abfälle** mit einer Gesamtaktivität von **4,03·10¹⁵ Bq** (NES 2022).

Die radioaktiven Abfälle sind in chemisch und physikalisch stabiler Form in der Regel in 200-Liter-Fässern eingebracht. In diesen Zwischenlager-Abfallgebinden sind die Abfälle in einer Matrix eingebunden und in den Fässern verschlossen. Dabei bilden Pellet-, Asche-, und homogen-zementierte Fässer je nach chemischen und physikalischen Eigenschaften und Einbringung der Abfälle die drei Haupttypen an Abfallgebinden. Sie erfüllen alle die ADR-Norm (UNECE 2023) zur Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße für zugelassene Typ-A Transportbehälter. Strahlenquellen werden in sogenannten Quellen-Fässern konditioniert, in dem sie z. B. in Edstahlkartuschen oder Bleibehältern eingelassen und ebenfalls in die 200-Liter-Fässer einbetoniert wurden.

Des Weiteren werden alle Abfallgebinde, die nicht den 200-Liter-Fässern entsprechen, als Sondergebinde bezeichnet (NES 2022). Hierbei handelt es sich vornehmlich um sogenannte Konrad Container (á ca. 5 m³) sowie Mosaik® Behälter (á 1,3 m³) und 400-Liter-Fässer. Die 400-Liter-Fässer beinhalten in den meisten Fällen 200-Liter-Fässer, die aus besonderen Abschirmungszwecken in 400-Liter-Fässer eingelagert wurden (NES 2022).

Nach der Aufstellung der NES lagern im Zwischenlager mit Stand Dezember 2021 insgesamt **12.532 Abfallgebinde** (Tabelle 1).

Tabelle 1: Übersicht der Abfallgebände im Zwischenlager der NES nach Abfallklassifizierung. Quelle: NES 2022

Abfallgebäude	LILW-SL	LILW-LL
200-Liter-Fässer	12.149	243
400-Liter-Fässer	120	9
Konrad Container	5	-
Mosaik® Behälter	5	-
Quellenbehälter	1	-
Gesamt	12.280	252

Die Gebinde teilen sich auf mehrere verschiedene Transferlagerhallen auf (NES 2022). Dabei kann die NES nach Angaben des (BMK 2022) auf eine lückenlose Dokumentation der Abfallbestände zurückgreifen. Dadurch besitzt die NES alle notwendigen Informationen wie z. B. den Lagerort oder die Zusammensetzung und Klassifizierung der Abfälle in den jeweiligen Abfallgebänden, die ein weiteres Abfallmanagement, wie z. B. für die spätere Behandlung der Abfälle, für die zukünftige Endlagerung beziehungsweise eine etwaige spätere Freigabe nach Abklingen der Radioaktivität ermöglicht (BMK 2022).

Die sichere Zwischenlagerung in den Transferlagerhallen ist mindestens bis 2045 vorgesehen.

2.2 Prognose der zukünftigen Abfallmengen

Die NES berücksichtigt bei der Aufstellung einer Prognose der Anzahl von Abfallgebänden, welche bis 2045 anfallen, sowohl bisherige Entwicklungen bei der Abfallproduktion als auch die abzusehenden Abfallmengen der noch anstehenden Rückbauprojekte und die Re- sowie Nachkonditionierung einer großen Menge von Abfällen (NES 2022).

Bei den MIF-Abfällen geht man bei der Prognose von den bisherigen Entwicklungen der entstehenden radioaktiven Abfälle aus. Demnach geht die NES bis 2045 von weiteren 700 Abfallgebänden aus. Gemäß (BMK 2022) wird eine Reduzierung der jährlich anfallenden Abfälle erwartet.

Größere Rückbauprojekte bis 2045 umfassen vor allem den TRIGA Forschungsreaktor des Atominstitutes der TU Wien und weitere Dekommissionierungsprojekte am Standort der NES in Seibersdorf. Diese weiteren Dekommissionierungsarbeiten werden mit insgesamt weiteren 6.000 Abfallgebinden ins Gewicht fallen.

Bei den laufenden Re- und Nachkonditionierungsprojekten sollen bereits konditionierte Abfallgebinde geöffnet, untersucht und die Abfälle neuerlich nach neuestem Stand der Technik konditioniert werden. Dadurch erwartet die NES eine Reduktion der Abfallmenge um mindestens 1.500 Abfallgebinde (NES 2022).

Bis 2045 ergibt sich so eine konservativ geschätzte Prognose laut (NES 2022), von insgesamt **17.200 Abfallgebinden**¹. Damit käme man auf ein Gesamtvolumen von **3.500 m³** endzulagernden Abfälle. Dabei geht man von einem **LILW-LL-Anteil von maximal 100 m³²** aus.

Bei dem prognostizierten Volumen handelt es sich noch nicht um das tatsächlich endzulagernde Abfallgebindevolumen, da der Endlagerbehälter noch nicht berücksichtigt ist.

Die NES weist darauf hin, dass von einer Einbringung der Abfallbehälter in sogenannte Überbehälter (disposal module) vor der eigentlichen Einlagerung in ein Endlager auszugehen ist. Aus dem Bericht der NES ist abzuleiten, dass eine Anzahl von 200-Liter-Fässern in Überbehälter einbetoniert werden. Diese dienen zusammen mit den eingeschlossenen Abfallgebinden als erste, technische Barriere in Hinblick auf die Endlagerung (NES 2022). Diese Angaben der NES basieren auf den Vorgaben der IAEA (IAEA 2022b).

Die Verwendung der Überbehälter wirkt sich maßgeblich auf das Volumen der zu entsorgenden Abfälle aus, wodurch die benötigte Lagerkapazität erhöht wird. Des Weiteren hängen die Größe, Form und Ausgestaltung der Überbehälter stark von der Art des Endlagers und dessen technischen Voraussetzungen, wie z. B. Hebe- oder Seilzügen ab sowie den technischen Möglichkeiten und geologischen Begebenheiten. Gleichermaßen haben die Volumina und Aktivitäten der Überbehälter maßgeblichen Einfluss auf das zu wählende Endlager

¹ Sowohl (NES 2022) und (BMK 2022) geben bis 2045 ein Gesamtaufkommen von 17.200 Abfallgebinden an. Ihren Berechnungen folgend müssten bis 2045 jedoch 17.732 Abfallgebinde anfallen, was in den Angaben zu einer Differenz von 532 Abfallgebinden führt.

² Das (BMK 2022) geht nur von einem maximalen LILW-LL-Anteil von 60 m³ aus.

bzw. vielmehr müssen gegebenenfalls die Endlagerbehälter an die gewählte Endlageroption angepasst werden.

Die NES zieht zur Abschätzung der Volumenvergrößerung durch die Verwendung von Überbehältern der geplanten oberflächennahen Entsorgung in Dessel, Belgien als Beispiel heran. In Belgien werden Fässer in Betoncontainer einbetoniert, bevor sie in die einzelnen Lagerabteile eingebracht werden. Je nach Typ können dort fünf 200-Liter-Fässer oder vier 400-Liter-Fässer in sogenannten Monolith Type I Überbehälter einbetoniert, bzw. einzelne Sondergebilde einzeln in Monolith Type II und III Überbehälter eingebracht werden (Seetharam et al. 2011).

Abbildung 1: Darstellung der Monolith Type I, II, und III Stahlbetonbehälter (Überbehälter) nach dem Beispiel in der Anlage zur Oberflächenlagerung in Dessel, Belgien. Quelle: (van Geet et al. 2019)



Auf Basis der Annahmen der NES ergibt sich für das bis 2045 prognostizierte Abfallvolumen von 3.500 m³ ein Volumenbedarf für ein hypothetisches Endlager nach belgischem Vorbild

von **17.700 m³**. Ein solches Vorgehen würde das Abfallvolumen somit um ein fünffaches erhöhen und sollte bei den Planungen des Endlagers berücksichtigt werden (NES 2022). Die NES gibt dabei keine getrennte Betrachtung für die zu erwartenden LILW-SL- und LILW-LL-Abfallgebinde bis 2045 an.

Da die in Frage kommenden Entsorgungsoptionen für die Endlagerung der österreichischen Abfälle jedoch maßgeblich von der Menge und Volumina der unterschiedlich klassifizierten radioaktiven Abfälle abhängen, zeigen wir im Folgenden auf, mit welchen Mengen und Volumina bis 2045 zu planen ist:

Nach Angaben der NES zur aktuellen Bestandsaufnahme der Abfallgebinde sind die LILW-LL-Abfälle zum jetzigen Zeitpunkt in 243 Stück 200-Liter-Fässern und 9 Stück 400-Liter-Fässern (Tabelle 1) mit einem Volumen von $\sim 52 \text{ m}^3$ eingebracht. Basierend auf der Annahme, dass bis 2045 nach der konservativen Prognose maximal 100 m^3 LILW-LL-Abfälle zu erwarten sind, gehen wir von einer konservativ geschätzten Verdopplung der Abfallgebinde, also maximal 485 Fässern (~ 468 Stück 200-Liter-Fässer und ~ 18 Stück 400-Liter-Fässer) bis 2045 aus. Bei dieser Hochrechnung wäre jedoch zum jetzigen Zeitpunkt nicht abzusehen, wie viel des radioaktiven Abfalls davon in 200-Liter-Fässern bzw. 400-Liter-Fässern eingebracht sind. Demnach würden ~ 485 Abfallgebinde in ~ 100 Monolith Type I Überbehältern für die Einbringung der LILW-LL-Abfälle benötigt werden. Aus den Angaben von (Seetharam et al. 2011) geht hervor, dass ein Monolith Type I Überbehälter mit den Maßen $1,94 \text{ m} \times 1,94 \text{ m} \times 1,35 \text{ m}$ ein nutzbares Volumen von $\sim 5 \text{ m}^3$ aufweist. Daher gehen wir von ca. 500 m^3 an Volumenbedarf für ein hypothetisches Endlager nach belgischem Vorbild allein für die LILW-LL-Abfälle aus. Aus diesen Annahmen ergibt sich eine Restmenge von etwa 17.200 m^3 an Volumina von LILW-SL-Abfällen. Diese Berechnungen implizieren eine getrennte Einbringung der LILW-LL-Abfälle in die Überbehälter nach belgischem Vorbild und sollten bei der weiteren Betrachtung der Optionen für Endlagertypen und des Optionenvergleichs unbedingt berücksichtigt werden.

Allerdings sind diese Angaben nur als vorläufige Abschätzungen anzusehen, da die Größe, Form und Ausgestaltung der Überbehälter und somit die Aufnahmekapazitäten an Abfallgebinden stark vom jeweiligen Endlagertyp abhängen. So ist zum Beispiel anzunehmen, dass eine Einbringung der LILW-LL-Abfälle in Monolith Type I Behälter mit der Option der Bohrlochlagerung nicht kompatibel ist. Die tatsächlichen Volumina und Anzahl der Abfallgebinde kann daher nur nach Festlegung der zu verfolgenden Endlagerstrategie genauer bestimmt werden.

2.3 Nationale und internationale regulatorische Anforderungen

Regulatorische Grundlage der Entsorgung radioaktiver Abfälle in Österreich ist das Bundesgesetz über Maßnahmen zum Schutz vor Gefahren durch ionisierende Strahlung (Strahlenschutzgesetz – StrSchG) von 2020 (StrSchG 2020). Ziel des Gesetzes ist unter Berücksichtigung international anerkannter Sicherheitsstandards

„3. die verantwortungsvolle und sichere Entsorgung von abgebrannten Brennelementen und radioaktiven Abfällen“ § 1., Absatz 1 (StrSchG 2020)

Mit dem Strahlenschutzgesetz wurden Vorgaben der EURATOM umgesetzt. In § 53 (StrSchG 2020) werden die Anforderungen für die Errichtungsbewilligung von Entsorgungsanlagen, darin ist ein Endlager eingeschlossen, festgelegt. U. a. wird eine Standortauswahl nach international anerkannten Sicherheitsstandards vorausgesetzt (Wagner, Erika, M. und Semmelrock-Picej, Maria, Th. 2022).

Das (StrSchG 2020) ermöglicht auch die Kooperation mit anderen EU-Staaten bzw. Staaten die das gemeinsame Übereinkommen über die Sicherheit der Behandlung abgebrannter Brennelemente und über die Sicherheit der Behandlung radioaktiver Abfälle (Joint Convention) ratifiziert haben (§ 141 Absatz 2. StrSchG). Die Grundsätze der Entsorgung (§ 141 Absatz 4. StrSchG) sehen u. a. vor, dass langfristig passive Sicherheit zu berücksichtigen ist, ein nach Risikograd abgestuftes Konzept angewendet werden soll und ein faktengestützter, dokumentierter Entscheidungsprozess zur Anwendung kommen soll.

Österreich ist eingebunden in internationale Abkommen wie die bereits genannte Joint Convention, an deren Review-Meetings das Land regelmäßig teilnimmt (FMRA 2020) und unterzieht sich gemäß § 144 StrSchG internationalen Reviews der IAEA (IAEA 2018; 2022a). Daraus resultieren jeweils Hinweise für die nationalen Planungen zur Entsorgung.

Gemäß dem Nationalen Entsorgungsprogramm (BMK 2022) ist eine Entscheidung über die Art der Endlagerung der in Österreich anfallenden radioaktiven Abfälle noch nicht gefallen. Die Zwischenlagerung der radioaktiven Abfälle ist über einen Entsorgungsvertrag bis 2045 gesichert. In der Unterlage wird von einem komplexen mehrstufigen Entscheidungsprozess für ein Endlager unter Beteiligung der Öffentlichkeit ausgegangen, der aber bis jetzt nur beispielhaft beschrieben ist. Ebenso gibt es noch keine Festlegung hinsichtlich eines Endlagertyps bzw. mehrerer Endlagertypen.

Ein vom Entsorgungsbeirat veröffentlichter Bericht mit einem Vorschlag für Sicherheitskriterien für eine Anlage zur langfristigen Entsorgung radioaktiver Abfälle (Entsorgungsbeirat Österreich 2022) empfiehlt operationelle Schutzziele und Sicherheitskriterien eines Endlagers in Österreich. Da noch keine Entscheidung für einen oder mehrere Endlagertypen gefallen ist, sind die Sicherheitskriterien über alle Endlagertypen abdeckend gehalten. Oberstes Ziel ist, wie auch im (StrSchG 2020) festgelegt, der sichere Einschluss der radioaktiven Stoffe, die Vermeidung unnötiger Strahlenexposition und die Begrenzung und Kontrolle dieser.

Potenzielle Anforderungen für die Ausgestaltung eines Endlagers bzw. die Wahl eines Endlagertyps ergeben sich allerdings aus den Vorschlägen:

„Das Endlagerkonzept, einschließlich der benötigten Technologien und der Behälter muss von Anfang an so ausgelegt werden, dass Optionen zur Rückholung oder Bergung nicht unterlaufen werden. Diese Forderung hat auch Einfluss auf die Anforderungen an die langfristige Haltbarkeit der Behälter. (Reversibilität von Entscheidungen)“ S. 21 (Entsorgungsbeirat Österreich 2022)

sowie:

„Das Endlager ist so zu errichten und zu betreiben, dass für den zuverlässigen langfristigen Einschluss der radioaktiven Abfälle in der Nachverschlussphase keine Eingriffe oder Wartungsarbeiten erforderlich werden (Vermeidung unzumutbarer Belastungen für zukünftige Generationen).“ S. 21 (Entsorgungsbeirat Österreich 2022)

Die Aspekte, dass das Endlagerkonzept eine Rückholung oder Bergung berücksichtigen sowie passive Sicherheit bieten soll, sowie alle weiteren Anforderungen, die sich derzeit aus dem Regelwerk ergeben, werden in Kapitel 4 mit den potenziell geeigneten Endlagertypen abgeglichen.

Darüber hinaus formulieren die Sicherheitskriterien (Entsorgungsbeirat Österreich 2022) allgemeine Anforderungen, die später den Waste Acceptance Criteria (WAC) eines Endlagers zugrunde gelegt werden sollen. Dazu gehören z. B. Anforderungen an das Abfallprodukt wie das Vorliegen ausschließlich fester, biologisch und chemisch stabiler Abfälle und eine Begrenzung spaltbarer Stoffe im Hinblick auf die Kritikalitätssicherheit. Es werden Vorgaben an das Abfallgebilde z. B. hinsichtlich der Dosisleistung angegeben, die für die Handhabung und Transporte von Bedeutung sind. Außerdem enthalten die Sicherheitskriterien

Vorgaben zur Kennzeichnung und Dokumentation, die bereits bei der Herstellung der Abfallgebinde zu beachten sind.

3 Optionen für die Entsorgung radioaktiver Abfälle

Die Endlagerung radioaktiver Stoffe erfolgt in Entsorgungsanlagen mit dem Ziel, die Radionuklide langfristig zu isolieren und einzuschließen. Die Entsorgung meint einerseits die permanente langfristige Lagerung sowie die endgültige Endlagerung radioaktiver Abfälle durch den sicheren Einschluss und die Isolation der Abfälle zum Schutz von Mensch und Umwelt andererseits (IAEA 2011b). Während die permanente langfristige Lagerung von LILW-SL-Abfällen für einen Isolationszeitraum von mindestens 300 – 500 Jahren der Abfälle angestrebt wird (Pusch et al. 2017), muss für LILW-LL-Abfälle eine Endlagerung mit langfristiger und passiver Sicherheit für mindestens einige Tausend Jahre gewährleistet sein (IAEA 2011a; 2014).

Der sichere Einschluss kann dabei je nach Entsorgungsoption durch die Kombination natürlicher und technischer Barrieren gewährleistet werden und je nach Konzept auf eine aktive institutionelle Überwachung und Kontrolle angewiesen oder auf langfristige passive Sicherheit ausgelegt sein (IAEA 2014; 2011a).

Im Falle der oberflächennahen Entsorgung ist eine aktive institutionelle Überwachung und Kontrolle der Entsorgungsanlagen notwendig und hat zum Ziel, die Anlagen vor unerwünschtem menschlichem Eindringen und Schäden an den Anlagen durch Einwirkungen – sowohl menschlicher als auch natürlicher Art – zu schützen (IAEA 2011a). Die Überwachungsmaßnahmen sollen so lange aktiven Schutz gewährleisten, bis die Radioaktivität der Abfälle auf Werte abgeklungen ist, die keine Gefahr mehr für Mensch und Umwelt darstellen. Je höher die Konzentration an längerlebigen Radionukliden der radioaktiven Abfälle ist, desto anfälliger gelten die Anlagen für mögliche Störfälle und desto länger muss der aktive Überwachungszeitraum ausgestaltet sein (IAEA 2014).

Dabei wird international davon ausgegangen, dass bei erforderlichen Einschlusszeiträumen von mehr als 300 – 500 Jahren ein sicherer Einschluss und Isolation der Abfälle zum Schutz von Mensch und Umwelt nur durch langfristige passive Sicherheitskonzepte gewährleistet werden kann. Der Standort und die Art des Endlagers werden so gewählt, dass die Abfälle von natürlichen und menschlichen Störungen geschützt sind (IAEA 2020b). Die IAEA formuliert unter dem Punkt passive Sicherheit die Anforderung, dass „der Betreiber den Standort

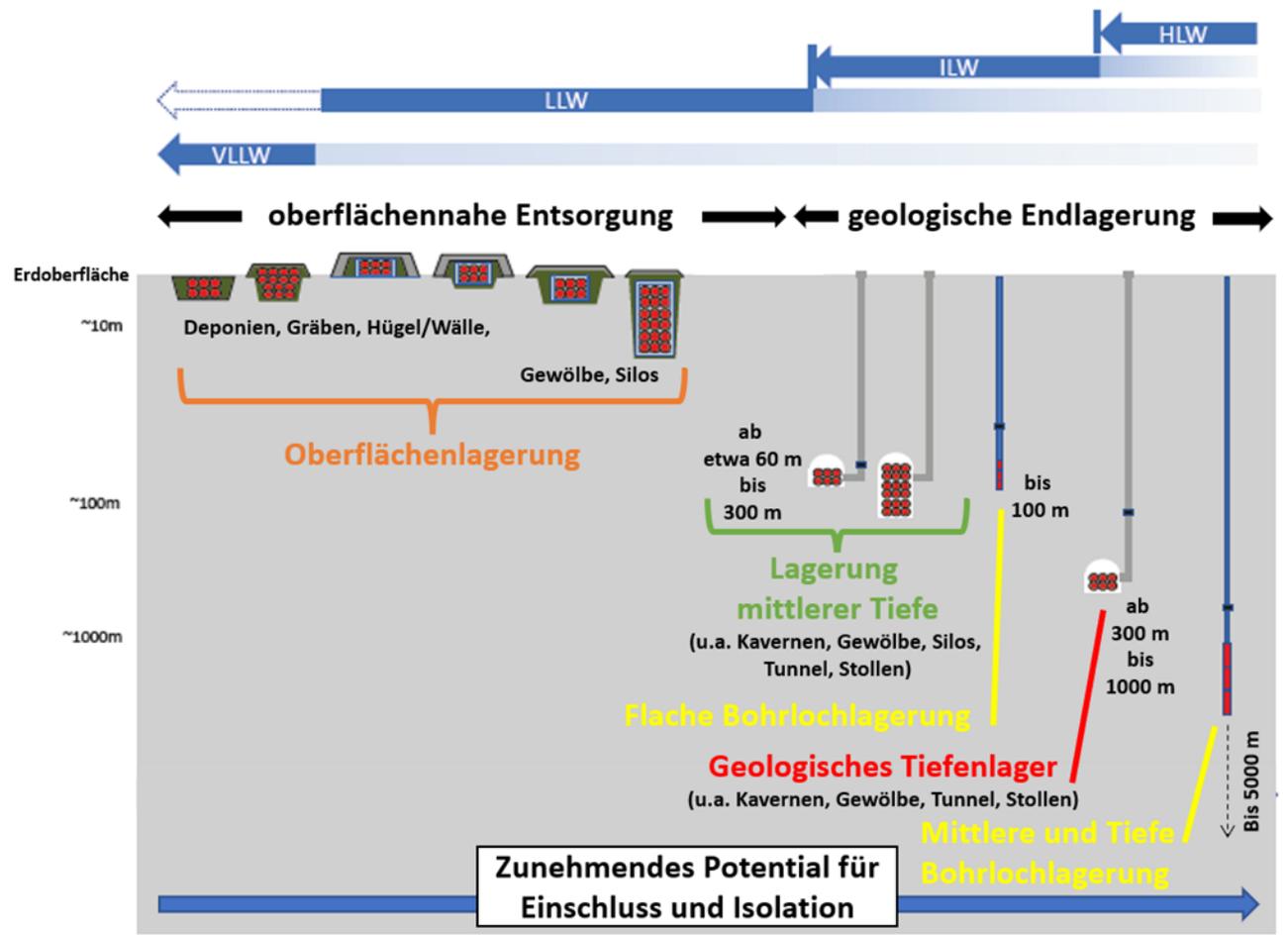
so plant, baut, betreibt und schließt, dass die Sicherheit durch passive Maßnahmen in größtmöglichem Umfang gewährleistet ist und die Notwendigkeit von aktiven Maßnahmen nach dem Verschluss der Anlagen auf ein Mindestmaß reduziert werden soll“ (IAEA 2011a). Demnach basiert das Sicherheitskonzept der geologischen Endlagerung hauptsächlich auf der Kombination langfristig und passiv wirkender natürlicher und geotechnischer Barrieren (IAEA 2011a).

Abbildung 2 zeigt Beispiele für verschiedene Optionen, die für die Entsorgung von LILW-Abfällen in Frage kommen (IAEA 2020a) und auf die der Bericht im Folgenden eingeht. Die IAEA unterscheidet bei der Entsorgung radioaktiver Abfälle generell zwischen oberflächennaher Entsorgung und geologischer Endlagerung (IAEA 2022b). Dieser Bericht unterteilt darüber hinaus auftragsgemäß die Optionen oberflächennaher Entsorgung im Sinne der IAEA in Oberflächenlagerung (siehe Abbildung 2, orange; Kapitel 3.1) und Lagerung mittlerer Tiefe (siehe Abbildung 2, grün; Kapitel 3.2). Bei den Optionen zur geologischen Endlagerung wird zwischen der Entsorgung der Abfälle in einem End- oder Tiefenlager in tiefen geologischen Formationen (siehe Abbildung 2, rot; Kapitel 3.3) und der Bohrlochlagerung (siehe Abbildung 2, gelb; Kapitel 3.4) differenziert.

Oft handelt es sich jedoch bei den verschiedenen Endlageroptionen um Mischformen und Abgrenzungen zwischen den technischen Anlagen sind nicht immer klar definiert bzw. werden je nach Quelle unterschiedlich klassifiziert. Einige Projekte sind historisch gewachsen und sind abhängig von den zur Verfügung stehenden geologischen Gegebenheiten, den nationalen technischen Anforderungen, den vorhandenen Abfallarten und dem ökonomischen Aufwand.

In Kapitel 3.5 wird darüber hinaus auch auf internationale Entsorgungsoptionen eingegangen.

Abbildung 2: Schematische Darstellung verschiedener Entsorgungsoptionen. Quelle: verändert nach (IAEA 2020a). Darstellung der Tiefe nicht maßstabsgerecht.



Im Folgenden werden die unterschiedlichen Entsorgungsoptionen hinsichtlich ihrer technischen Aspekte dargestellt. Die technische Beschreibung beginnt zunächst mit der Erläuterung von Begrifflichkeiten aus dem internationalen Sprachgebrauch und deren Verwendung in dieser Studie. Neben den wesentlichen technischen Merkmalen der verschiedenen Endlagertypen werden die Abfalltypen aufgeführt, welche für die jeweilige Option in der internationalen Praxis berücksichtigt werden. Die Beschreibung geht anschließend auf den konzeptionellen Aufbau, wie die Errichtung, den Betrieb sowie den Verschluss ein. Weitere Aspekte umfassen das Sicherheitskonzept und die üblicherweise betrachteten Wirtsgesteine für den jeweiligen Entsorgungstyp.

Darüber hinaus werden zu jeder Entsorgungsoption Beispiele aus der internationalen Praxis vorgestellt und – sofern veröffentlicht – Kosten der einzelnen Projekte zusammengestellt. Die internationalen Beispiele wurden so ausgewählt, dass sie auf Grund ihrer technischen

Merkmale interessant und passend für die österreichische Entsorgungssituation sind. Diese Merkmale werden als Fokus bei der Beschreibung der einzelnen Beispiele hervorgehoben.

Die Vorstellungen der Entsorgungsoptionen schließen jeweils damit, dass Vor- und Nachteile der jeweiligen Optionen anhand konkreter Bewertungskriterien benannt und erklärt werden. Damit nehmen wir eine erste generische Bewertung der jeweiligen Entsorgungsoption vor. Hierbei werden die einzelnen Optionen vorläufig und für sich alleinstehend betrachtet, bevor in Kapitel 4 die vergleichende Bewertung der Optionen den Bericht abschließt. Diese Bewertungen erfolgen auf der Basis folgender vorformulierter Bewertungskriterien, welche die Ausführungen der nationalen und internationalen regulatorischen Anforderungen an die Endlagerung in Österreich (siehe Kapitel 2.3) berücksichtigen:

- Einschluss und Isolation (Sicherheitskonzept im Hinblick auf den Anspruch der langfristigen passiven Sicherheit und der Barrierenwirksamkeit, Betrachtung der natürlichen und technischen Barrieren)
- Technische Machbarkeit (Vorhandensein konkreter Konzepte (Verweis auf Beispiele), vergleichbare Anlagen in Bau oder Betrieb, Berücksichtigung des technischen Aufwands und etwaiger Schwierigkeiten)
- Zeitbedarfe (für Planung einschl. ggf. Entwicklung der Entsorgungsoption, Errichtung, Betrieb, Verschluss im Hinblick auf das Ziel der langfristigen Lösung bis 2045 und Auswirkungen auf die Zwischenlagerung)
- Charakterisierung des Standorts (Umsetzbarkeit und Aufwand bei den Erkundungen zum Nachweis der spezifischen geologischen Eignung des Standorts)
- Abfallflexibilität (Eignung für verschiedene Abfallarten gemäß Abfallklassifizierung, Möglichkeit der Anwendung eines nach Risikograd abgestuften Konzeptes)
- Aufnahmekapazität (Eignung der Entsorgungsoption für Massenströme von Abfällen)

- Oberflächenanlagen³ (Flächenbedarf der industriellen Anlagen auf der Erdoberfläche, Stilllegung und Rückbau)
- Rückholbarkeit und Bergung⁴ (Machbarkeit, Aufwand und Anforderungen an die Haltbarkeit der Behälter)
- Kosten (Entwicklung, Planung, Errichtung, Betrieb, Verschluss und Überwachung)
- Forschungs- und Entwicklungsbedarfe (F&E-Bedarfe, zukünftiger Bedarf an Forschung und Entwicklung im Hinblick auf die allgemeine Umsetzbarkeit der Entsorgungsoption)

Einige Aspekte gelten für alle Entsorgungsoptionen gleichermaßen. Diese wurden, um Wiederholungen zu vermeiden, nicht weiter betrachtet. Dazu zählen:

- Die Erfüllung der jeweiligen regulatorischen Anforderungen ist in einem Genehmigungsverfahren nachzuweisen. Dazu gehören der Nachweis der Eignung des Standortes (bspw. hinsichtlich Einwirkungen von außen wie Hochwasser oder zivilisatorischer Einwirkungen), die Einhaltung der Waste Acceptance Criteria (WAC) der jeweiligen Entsorgungsoption und der langfristige sichere Einschluss sowohl im Normalbetrieb als auch bei Abweichungen davon.
- Der Standort ist mit einem transparenten, faktengestützten und dokumentierten Entscheidungsprozess in einem komplexen mehrstufigen Standortauswahlverfahren zu bestimmen. Aspekte wie die Standortauswahl und Akzeptabilität der Anlagen hängen maßgeblich vom Entscheidungsprozess und der Sicherheitswahrnehmung der Bevölkerung ab und werden deshalb im Folgenden nicht betrachtet.
- Die Konditionierung und Verpackung der radioaktiven Abfälle ist bei allen Entsorgungsoptionen erforderlich. Diese Entsorgungsschritte können am Endlagerstandort durchgeführt werden. Sie können aber auch bereits (vollständig oder teilweise) beim Abfallerzeuger, am Zwischenlagerstandort oder ggf. bei einem Dienstleister durchgeführt werden. Da die Festlegungen hierzu unabhängig von der

³ Mit Oberflächenanlagen sind alle industriellen Anlagen an der Erdoberfläche gemeint, welche für die Errichtung und den Betrieb der Entsorgungsoption benötigt werden. In der Regel sehen es die Endlagerkonzepte vor, dass die Oberflächenanlagen nach der Einlagerung und dem Verschluss stillgelegt und rückgebaut werden.

⁴ Rückholung bezieht sich auf die Auslagerung radioaktiver Abfälle aus einer noch nicht vollständig verschlossenen Anlage vor Ende der Betriebsphase. Bergung bezieht sich dagegen auf die Auslagerung aus einer stillgelegten Anlage nach vollständigem Verschluss nach der Betriebsphase.

abschließenden Entsorgungsoption sind, wurden die Prozesse und Anlagen z. B. bei der Bewertung der Oberflächenanlagen nicht betrachtet.

- Der Transport der radioaktiven Abfälle zum Standort: Diesbezügliche Unterschiede aufgrund der konkreten Lage des Standorts sind in einem Standortauswahlverfahren mit zu berücksichtigen.
- Umweltauswirkungen, wie Emissionen, Transporte und Landschaftsauswirkungen entstehen bei allen Entsorgungsoptionen, sind jedoch stark konzept- bzw. standortspezifisch und werden daher nicht gesondert betrachtet.
- Radioaktive Abfälle können auch entsorgungsrelevante chemotoxische Abfallstoffe enthalten, die jedoch bei der Betrachtung der Entsorgungsoptionen nicht gesondert betrachtet werden.

3.1 Oberflächenlagerung

3.1.1 Technische Beschreibung

Begrifflichkeiten

Die Oberflächenlagerung ist Teil der oberflächennahen Entsorgung (Abbildung 2) und sieht die permanente langfristige Lagerung fester oder verfestigter radioaktiver Abfälle in Anlagen direkt unter, an oder unmittelbar über der Erdoberfläche vor (Pusch et al. 2017). Die oberflächennahe Entsorgung beabsichtigt keine Weiterhandhabung oder Rückholung der Abfälle, was nicht bedeutet, dass die Rückholbarkeit und Bergung prinzipiell nicht gegeben ist (IAEA 2014). Das Ziel der Oberflächenlagerung ist es, die Abfälle einzuschließen und von der Biosphäre zu isolieren. Sie gehört dabei bewusst zu den Entsorgungsoptionen für radioaktive Abfälle und ist von der Zwischenlagerung der radioaktiven Abfälle, die bis zur Endlagerung zukünftige Aktivität erfordert, und deren Anlagen und Sicherheitsanforderungen klar abzugrenzen (Kreusch et al. 2019).

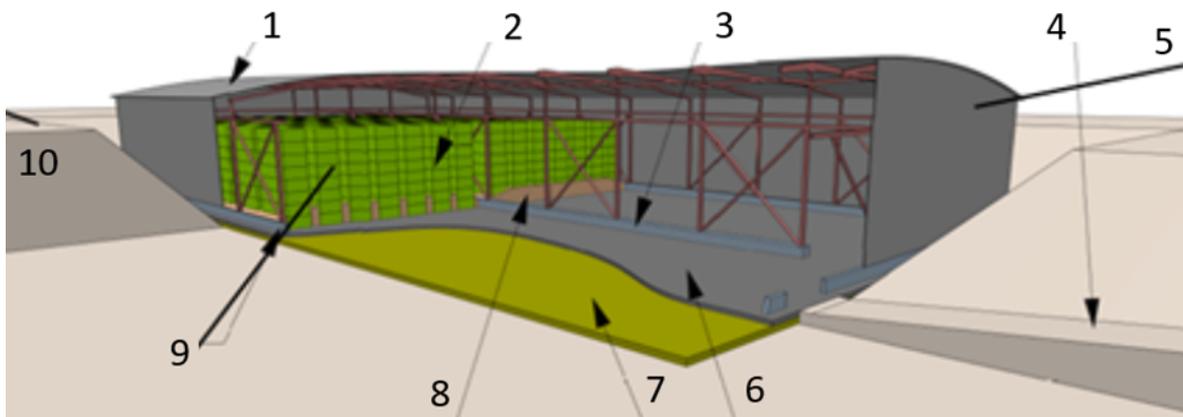
In der internationalen Literatur werden für diese Art der Entsorgung je nach Konzept vor allem die Begriffe „above-“ oder „on-ground disposal“ und „near-surface landfill“ gebraucht (Pusch et al. 2017).

Endlagertypen

Das Konzept der oberflächennahen Entsorgung deckt eine große Bandbreite an verschiedenen Konzepten der Oberflächenlagerung von radioaktiven Abfällen ab, welche wiederum sehr unterschiedlich ausgestaltet sein können bzw. deren Konzeption auf der Abfallzusammensetzung aufbaut (IAEA 2020a).

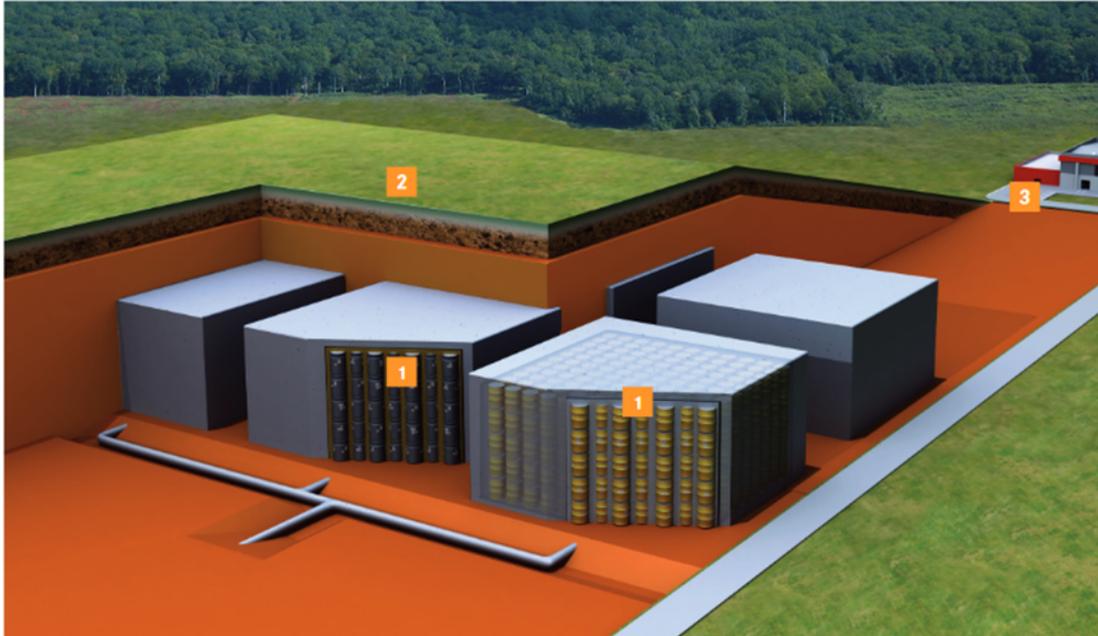
Konzepte umfassen einerseits die oberflächennahe Entsorgung in deponieähnlichen Oberflächenhügeln oder -wällen (Abbildung 3).

Abbildung 3: Darstellung des Aufbaus eines Betongewölbes als Oberflächenhügel zur Oberflächenlagerung von LILW-SL-Abfällen. Quelle: modifiziert nach (DES 2023). 1: Gewölbedach; 2: Behälter; 3: Trennmauer; 4: Zugangsrampe; 5: Betonwand; 6: Betonsockel; 7: Bentonit angereicherter Sand (BES); 8: Granulatfüllung; 9: Betongewölbe; 10: Absperrwand.



Andere Konzepte umfassen die Lagerung in Gräben, die in die Oberfläche eingelassen wurden, oder technisch ausgestatteten Betongewölben oder -silos (Abbildung 4), welche in unterschiedliche Tiefen – von einigen Metern bis zu einigen zehn Metern – unter die Erdoberfläche reichen (IAEA 2014). Der Lagertyp, die Tiefe der Entsorgungsanlage und die Ausgestaltung technischer Barrieren hängen dabei u. a. von den zu endlagernden Abfallkategorien, der geologischen Umgebung und den Umweltbedingungen ab (Pusch et al. 2017). Grundsätzlich bieten technische ausgestattete Gewölbe und Silos einen höheren Einschluss und bessere Isolation als deponieähnliche Anlagen und Gräben (IAEA 2014).

Abbildung 4: Gewölbedesign der Oberflächenlagerung für Endlageranlagen für LILW-SL-Abfälle. Quelle: (ANDRA 2023b). 1: Betongewölbe mit Abfallgebinden; 2: geologische Bodenformationen; 3: undurchlässige Tonschicht.



Die Entscheidung zwischen einem Graben oder einem komplexeren Betonbauwerk für die Entsorgung hängt von vielen Faktoren, wie den geologischen und klimatischen Standortbedingungen, die von den Abfällen ausgehende Gefahr, die öffentliche Akzeptanz und die nationale Politik sowie Finanzierungsüberlegungen ab (IAEA 2020a).

Abfallarten

Für HLW- und LILW-LL-Abfälle ist der sichere Einschluss und die Isolation der radioaktiven Abfälle von Mensch und Umwelt bei den Sicherheitskonzepten der Oberflächenlagerung nicht gegeben (Pusch et al. 2017; IAEA 2020a; 2020b; 2014). Eine sichere Entsorgung von Abfällen mit Halbwertszeiten größer 30 Jahre oder höherer Anfangsaktivität, die in Zeiträumen von ca. 300 Jahren noch nicht auf ein akzeptables Aktivitätsniveau abgeklungen sind, ist nicht vorgesehen. Daher wird im Folgenden diese Entsorgungsoption für die Endlagerung von LILW-LL-Abfällen nicht mehr betrachtet.

Anlagen der Oberflächenlagerung sind ausschließlich für die permanente langfristige Lagerung von VLLW und LILW-SL-Abfällen mit sehr begrenzten Mengen an langlebigen Radionukliden ausgelegt und bieten sicheren Einschluss und die Isolation der radioaktiven Abfälle von Mensch und Umwelt für 300 – 500 Jahre (IAEA 2014). Besonders für große Mengen von

LILW-SL-Abfällen aus der Stilllegung und dem Rückbau kerntechnischer Anlagen stellen oberflächennahe Entsorgungsanlagen eine schnelle und kostengünstige Lösung dar. Die technische Machbarkeit von Anlagen der Oberflächenlagerung auf internationaler Ebene befindet sich auf einem hohen Niveau. Es kann auf Erfahrungen und Konzepte zur Planung, Errichtung und dem Betrieb von Anlagen zur oberflächennahen Entsorgung zurückgegriffen werden (IAEA 2020a). Konzepte sind in vielen Staaten in der Planung bereits weit fortgeschritten, bzw. werden Anlagen zur Lagerung von LILW-SL-Abfällen u. a. in Finnland, Frankreich, Spanien, dem Vereinigten Königreich und einigen weiteren Staaten bereits erfolgreich betrieben (DES 2023).

In der Vergangenheit ist es vorgekommen, dass bei einigen bereits bestehenden oberflächennahen Entsorgungsanlagen der Oberflächenlagerung die WAC in den ersten Betriebsjahren nicht definiert waren oder unzureichend angewandt wurden, und somit nicht dem heutigen Stand von Wissenschaft und Technik (W&T) entsprechen. Dies hatte zu Folge, dass Abfälle oder Arten von Abfallgebinden in die Anlagen eingelagert wurden, die nach heutigem Ermessen nicht mehr für die Oberflächenlagerung geeignet wären. Infolgedessen haben bspw. in Frankreich zu hohe Radonemissionen in der oberflächennahen Anlage „Centre de la Manche“ zu einer strengeren Auslegung der WAC für Radium-226-Werte für die derzeit in Betrieb befindlichen Anlage „Centre de l’Aube“ geführt. So sind radiumhaltige Abfälle aus der chemischen und metallurgischen Industrie sowie aus der Sanierung von Altstandorten für die oberirdische Entsorgung nicht mehr zulässig (IAEA 2009c). Auch ist es vorgekommen, dass während der Betriebsphase oder bei der Stilllegung nachträglich festgestellt wurde, dass bereits bestehende und betriebene Anlagen unzureichend geplant wurden, bzw. der Standort und das Sicherheitskonzept nicht auszureichend Einschluss und Isolation bot (IAEA 2009c). Dementsprechend mussten Teile der Abfälle wieder rückgeholt oder geborgen werden (IAEA 2014).

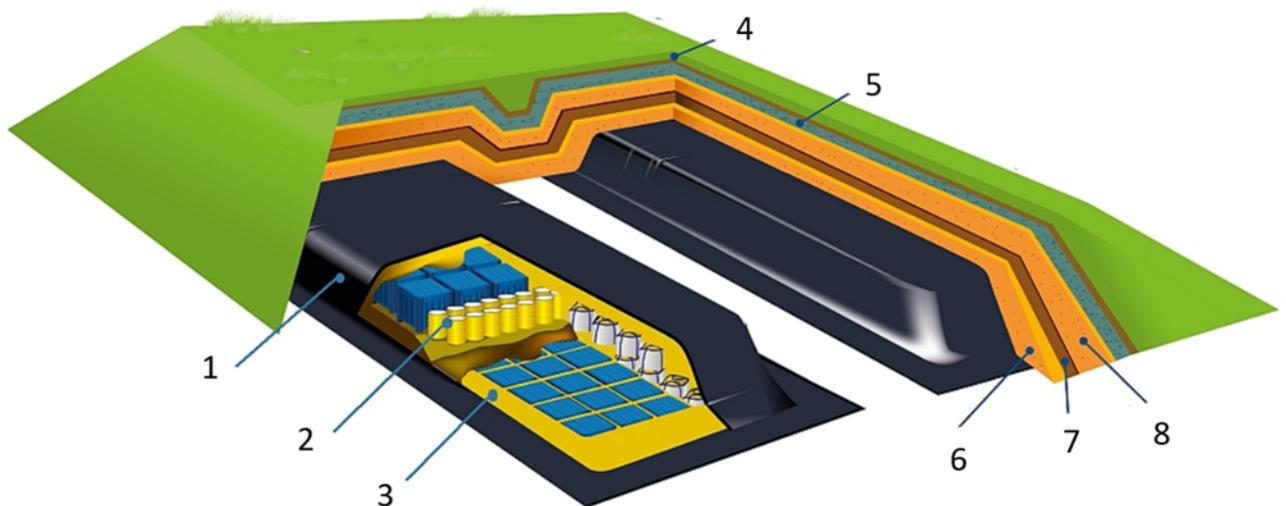
Daher sind WAC und Qualitätskontrollen bei der Oberflächenlagerung von großer Wichtigkeit, um sicherzustellen, dass sich der Radionuklidgehalt, insbesondere der Gehalt an langlebiger Aktivität, auf einem sehr niedrigen Niveau befindet, welches mit den begrenzten Einschließungs- und Isolierungsmöglichkeiten dieser Art der Entsorgung vereinbar ist (IAEA 2009c).

Errichtung, Betrieb und Verschluss

Grundsätzlich ähneln Anlagen der Oberflächenlagerung zur oberflächennahen Entsorgung in ihrem konzeptionellen Aufbau in vielen Aspekten konventionellen kommunalen oder

industriellen Abfallentsorgungsanlagen (IAEA 2020a). Die Anlagen zur Oberflächenlagerung sehen die oberflächennahe Entsorgung der radioaktiven Abfälle in unterschiedlichen errichteten Bauwerken vor. Viele der sich in Betrieb oder Konzeption befindlichen Anlagen weisen gemeinsame Merkmale auf. So werden die Abfälle meist entweder in Gewölbezellen bzw. Betongewölben eingelagert, welche auf einem stabilen Betonfundament in die Erdoberfläche eingelassen sind (IAEA 2020a). Die Anlagen werden oft so errichtet, dass die Entwässerung durch ein Gefälle der Anlagen eingeplant wird und die Wässer über ein speziell konzipiertes Wasserbewirtschaftungs- und Entwässerungssystem abgeleitet werden können. Wo keine Betongewölbe zum Einsatz kommen, wird eine Geomembran als Ummantelung verwendet (Abbildung 5).

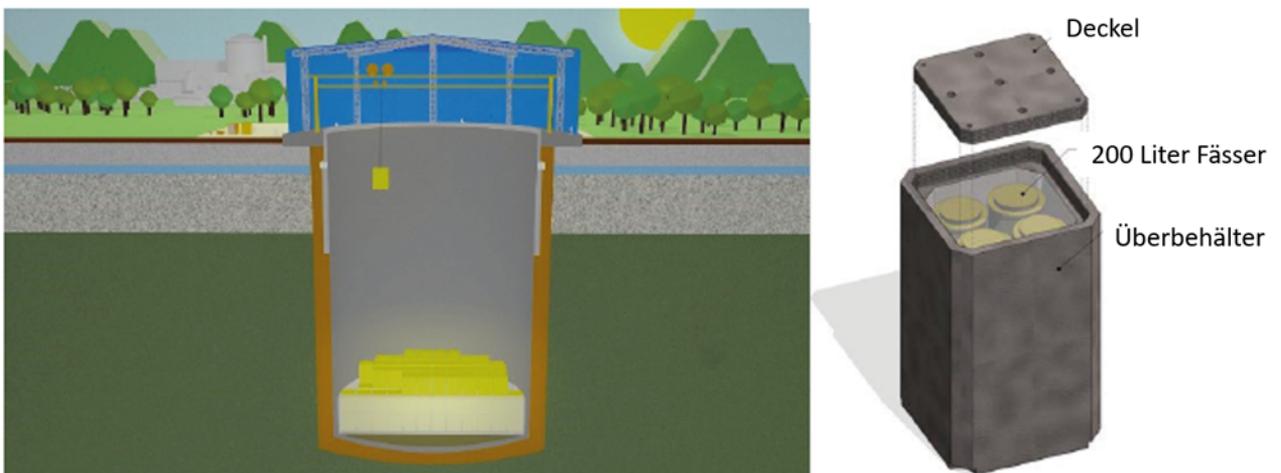
Abbildung 5: Schematische Darstellung der Gewölbezellen der Oberflächenlagerung in Grabenform für Endlageranlagen für LILW-SL-Abfälle in Frankreich. Quelle: (ANDRA 2023a). 1: Geomembran; 2: Abfallgebinde; 3: Auffüllung; 4: obere Bodenschicht; 5: Entwässerungsschicht; 6: Sand; 7: Ton; 8: Sand



Nach der Errichtung folgt die Einlagerung während dem Betrieb. Auch wenn in der Vergangenheit lose Abfallgebinde oberflächennah entsorgt wurden, gehen die Entwicklungen mittlerweile dahin, dass die Abfallgebinde zusätzlich konditioniert und verpackt werden. In der Regel werden die konventionellen Abfallgebinde (200-Liter-Fässer) in speziell konstruierten Stahlbetonbehältern, sogenannte Überbehälter (Abbildung 1), eingebracht, welche anschließend mit Beton verfüllt werden (Pusch et al. 2017). Hohlräume zwischen den Überbehältern in den Betongewölben werden je nach Konzept ebenfalls mit Sand- und Tongemischen sowie Beton verfüllt (Abbildung 5). Die Einlagerung kann ohne spezielle

Abschirmmaßnahmen erfolgen (IAEA 2020a). Die Abfallgebinde werden in den flachen Betonzellen oder -gewölben oder auch in Silos (Abbildung 6) eingelagert und gestapelt. Dabei liegt die Basis der Betongewölbe maximal wenige Meter unter der Erdoberfläche. Das Gewölbe selbst reicht bis zur Geländeoberkante und liegt somit auf dem Niveau der Erdoberfläche (NDA 2020). Während dem Betrieb können die Anlagen durch temporäre und mobile Abdeckungen, sogenannte Kappen, vor Niederschlägen geschützt und die Abfälle trocken gehalten werden (IAEA 2020a). Nach der Einlagerung werden die Anlagen verfüllt und je nach Barrierenkonzept mit einem Abdichtungssystem, bestehend aus verschiedenen undurchlässigen Materialien, wie z. B. einer Geomembran, Tonen oder Sanden, schichtweise überdeckt und so wasserdicht verschlossen. Den Abschluss bilden die geologischen Bodenformationen (Abbildung 4).

Abbildung 6: Schematische Darstellung der oberflächennahen Entsorgung in Form eines Silos zur Oberflächenlagerung in Slowenien. Quelle: (IAEA 2020a)



Neben den eigentlichen Anlagen zur Oberflächenlagerung sind bei der oberflächennahen Entsorgung zusätzliche industrielle Anlagen an der Oberfläche erforderlich. So sind Infrastrukturanlagen für Materialströme wie Aushub oder Baumaterial sowie Brandschutz und Sozialbauwerke und Infrastruktur zur Strom- und Wasserversorgung zu berücksichtigen. Weitere Anlagen dienen speziell der nuklearen Entsorgung wie der Anlieferung und der Annahme der radioaktiven Abfälle. Dazu gehören auch Werkstätten, Labore für den Strahlenschutz und das Umweltmonitoring sowie Bürogebäude für administrative Aufgaben. Darüber hinaus können je nach Konzept zusätzliche Anlagen für Konditionierung, Verpackung und Betonverfüllung der Abfälle hinzu kommen (Pusch et al. 2017). Auch sind Einrichtungen

für die institutionelle Kontrolle und Überwachung während und nach der Betriebsphase mitzudenken.

Die Konzepte der Oberflächenlagerung sehen in aller Regel nach Ende der Einlagerungsphase eine institutionelle Kontrolle und Überwachung von einigen hundert Jahren vor. Damit soll sichergestellt werden, dass die Anlage anforderungsgerecht funktioniert. Sie ist auch Teil der Maßnahmen des erforderlichen Schutzes der Anlagen vor Einwirkungen Dritter. Für diese Aufgaben werden große Teile der Oberflächenanlagen bestehen bleiben und nach der Betriebsphase nicht rückgebaut werden können. Dadurch können die Flächen nach der Stilllegung auch weiterhin nicht für bspw. Gewerbe- oder landwirtschaftliche Nutzung verwendet werden. Auch eine Renaturierung ist dadurch nur bedingt möglich und Landschaftsveränderungen bleiben während des Überwachungs- und Isolationszeitraums bestehen (Pusch et al. 2017).

Zeitbedarfe und Kosten von Entsorgungsanlagen der Oberflächenlagerung werden im Vergleich zur geologischen Lagerung als eher gering eingeschätzt (Pusch et al. 2017). Konkrete Vergleichszahlen insbesondere bei der geologischen Lagerung fehlen jedoch. Beispielsweise könnten nach Schätzungen der Nuclear Decommissioning Authority (NDA) des Vereinigten Königreichs bis zum Jahr 2040 bis zu 21.000 m³ der LILW-SL-Abfälle in Anlagen der Oberflächenlagerung entsorgt werden (DES 2023). Die NDA geht von einer Planung und Standortauswahl von etwa zehn Jahren aus. Für den Betrieb bis zum endgültigen Verschluss nimmt die NDA einen Zeitrahmen von 45 Jahren an. Demnach könnten sich die Kosten für Planung, Errichtung und Betrieb für eine Anlage der Oberflächenlagerung in Form eines in die Oberfläche eingelassenen Betongewölbes im Bereich von 300 – 500 Mio. Euro belaufen (DES 2023). Die in Kapitel 3.1.2 dargestellten Beispiele zeigen jedoch, dass Kostenschätzungen in aller Regel überschritten werden.

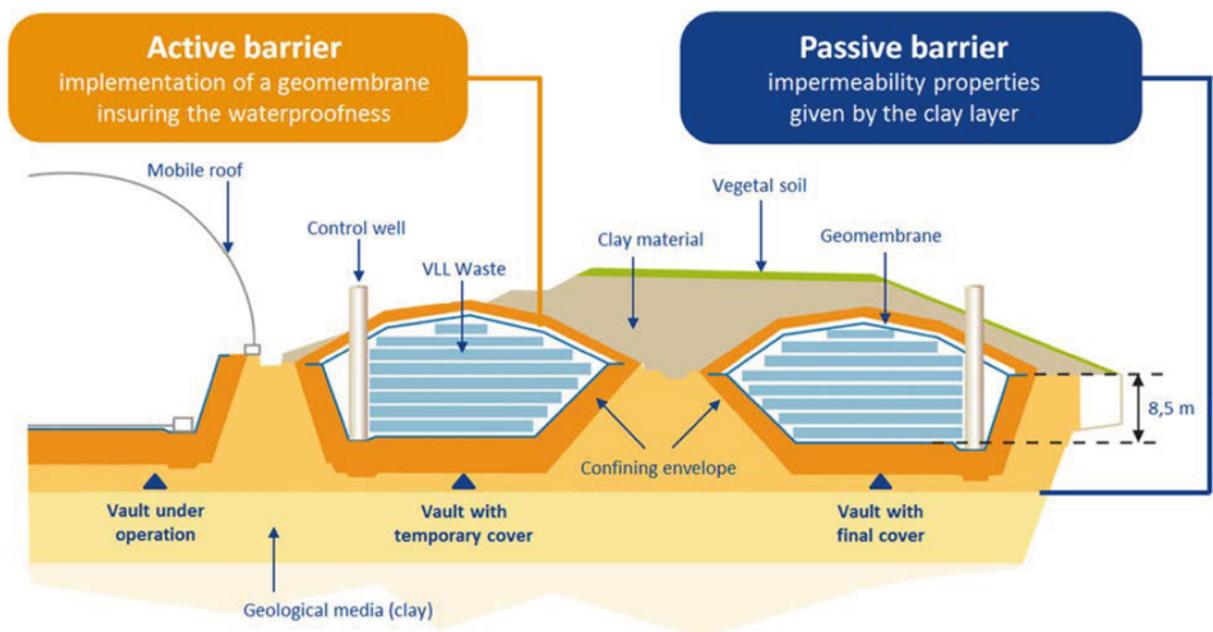
Sicherheitskonzept

Je nach Typ der Anlagen zur Oberflächenlagerung kann das Sicherheitskonzept, welches für den sicheren Einschluss und die Isolation der radioaktiven Abfälle sorgen soll, stark variieren (IAEA 2020a). (Pusch et al. 2017) betonen, dass die WAC und deren Kontrolle und Einhaltung bei der Oberflächenlagerung – als erste Sicherheitsmaßnahme bei der Annahme der Abfälle – eine besondere Rolle bei der Einhaltung des Sicherheitskonzeptes spielen. Ebenso müssen alle Anlagen gewährleisten, dass sowohl das Eindringen von Wasser in die Anlage in Richtung Abfälle als auch die Migration von Radionukliden aus den Abfällen in Richtung Biosphäre so weit wie möglich verhindert oder begrenzt wird (IAEA 2014). Der Einschluss

umfasst nicht nur die Freisetzung von Radionukliden durch Migration in der flüssigen Phase (d. h. in Lösung) sondern auch die Freisetzung von Radionukliden in gasförmiger Form (IAEA 2014).

Der sichere Einschluss und die Isolation der radioaktiven Abfälle vor Mensch und Umwelt können bei der oberflächennahen Entsorgung in Anlagen zur Oberflächenlagerung durch eine Reihe komplementärer Barrieren gewährleistet werden (IAEA 2014). Dieses sogenannte Multibarrierensystem fußt auf dem Zusammenspiel natürlicher passiver und technisch aktiver Barrieren (Abbildung 7). Das Multibarrierensystem beginnt mit den Abfallgebünden, insbesondere durch die Konditionierung der Abfälle und das Einbinden in eine feste Matrix z. B. Beton und reicht über die Endlagerüberbehälter, die Verfüllmaterialien, die Ausgestaltung des Endlagers mit beispielsweise Verkleidungen aus Polyethylen oder den Betongewölben als technische Barrieren und endet zu guter Letzt mit der geologischen Umgebung oder zumindest Basis als natürliche Barriere (IAEA 2020a).

Abbildung 7: Schematischer Aufbau des Multibarrierensystems einer oberflächennahen Entsorgungszelle in Grabenform der Anlage CIREs zur Oberflächenlagerung in Frankreich. Quelle: (IAEA 2020a)



Jedoch kann bei der oberflächennahen Entsorgung in Anlagen zur Oberflächenlagerung der sichere Einschluss und die Isolation der radioaktiven Abfälle nicht wie bei der geologischen Endlagerung ausschließlich bzw. zu einem großen Teil durch die natürlichen Barrieren

erzielt werden. Trotzdem ist das Sicherheitskonzept darauf ausgelegt, dass die geologische Umgebung mit ihren mechanischen, geochemischen und hydrologischen Eigenschaften zum Einschluss der Abfälle beiträgt und die Abgabe und Migration der Radionuklide an die Biosphäre minimiert (Pusch et al. 2017). Eine weitere Funktion der natürlichen Barrieren umfasst die Stabilisierung der Anlagen. So ist es die Aufgabe der umliegenden Bodenschichten, die Anlage vor geologischen und klimatischen Oberflächenprozessen, wie Erosion und Extremwetterereignissen bis hin zu Überschwemmungen und Erdbeben zu schützen (IAEA 2014).

Die Platzierung der Anlagen ist im besten Fall ebenfalls barrierewirksam. So sollten die Anlagen mit Abstand zum Grundwasserspiegel errichtet werden, um möglichen Kontakt der Abfälle mit dem Grundwasser zu verhindern. Hier sollten u. a. Standorte mit einer niedrigen Grundwasserströmung und langen Grundwasserwegen bevorzugt und Lagen in potenziellen Überschwemmungsgebieten vermieden werden.

Eine besondere Rolle kommt den technischen Barrieren innerhalb der Anlagen zur Oberflächenlagerung zu teil (IAEA 2020a). Teil des Multibarrierensystems sind Materialien mit geeigneten physikalischen und chemischen Eigenschaften, um den sicheren Einschluss und die Isolation der radioaktiven Abfälle zu gewährleisten. Auf der physikalischen Ebene sorgen die Barrieren mit geringer Permeabilität und hydraulischer Leitfähigkeit⁵ für die Unterbindung der Migration von Radionukliden. Auf der chemischen Ebene baut der Einschluss in erster Linie auf die Verlangsamung der Migration von Radionukliden in Lösung auf. Dies geschieht durch die Verringerung der Löslichkeit und/oder der Sorption⁶ von Radionukliden durch Materialien mit hoher Absorptionsfähigkeit. Hierfür werden in der Regel technische Barrieren wie Sand-, Tonmineral- und Zementmischungen verwendet (IAEA 2014). So sorgt die Implementierung von verschiedenen undurchlässigen Tonschichten als Auffüllung dafür, die Migration von Radionukliden zu verhindern oder zu minimieren.

Bei Grabanlagen kann zusätzlich eine hochdichte Geomembran aus Polyethylen zur Auskleidung der Wände und der Sohle der Gräben verwendet werden, um den Kontakt zu den umliegenden Bodenschichten und deren Kontamination zu verhindern (IAEA 2020a). Die Geomembrane umgeben die gesamte Zelle und sind vollständig wasserdicht (Abbildung 7).

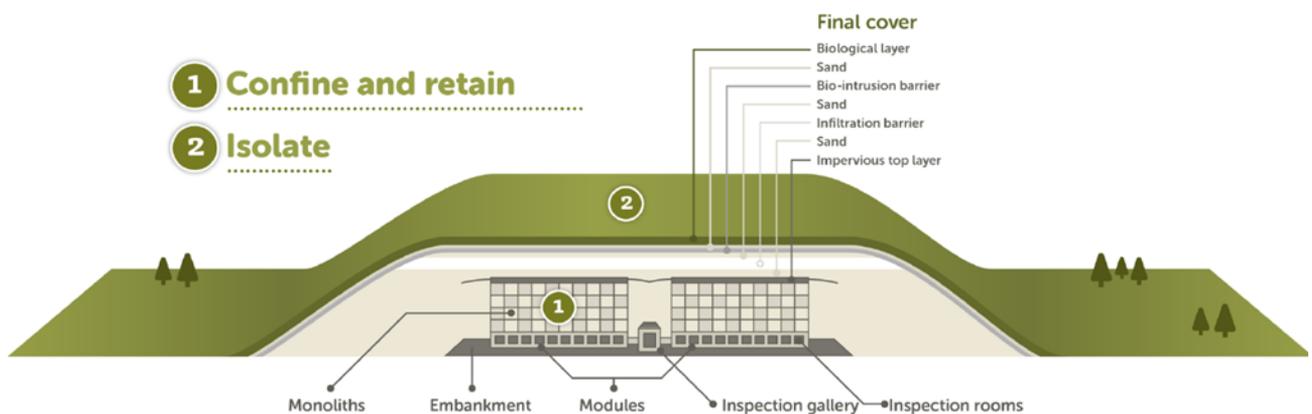
⁵Die hydraulische Leitfähigkeit beschreibt, wie leicht sich eine Flüssigkeit durch den Porenraum oder das Rissnetzwerk bewegen kann.

⁶Unter Sorption versteht man die Anreicherung bzw. Bindung von Stoffen aus einer wässrigen Phase an Stoffe einer festen Phase. Zum Beispiel besitzen Tonminerale eine hohe Fähigkeit in Wasser gelöste Radionuklide aufzunehmen und zu binden (Absorption).

Somit soll über Jahrzehnte hinweg jegliche Ausbreitung von Radionukliden und Eindringen von Fremdwässern bspw. durch Niederschläge unterbunden werden. Die zweite wesentliche Barriere ist eine Umhüllung aus natürlichen Tonmaterialien, die eine sehr geringe Durchlässigkeit aufweisen. Der obere Teil dieser Umhüllung, die so genannte endgültige Deckschicht, besteht aus mehreren Schichten verschiedener Materialien, die durch die Geomembran getrennt sind. Jede Schicht spielt eine bestimmte Rolle bei der Abdichtung des Grabens oder bei der Ableitung des Regenwassers (Pusch et al. 2017). Aus dem konventionellen Deponiebau sind solche Aufbauten z. B. einer Basisdichtung bekannt. Die in Deutschland zugrunde gelegte Deponieverordnung fordert einen Nachweis der Dichtigkeit von mindestens 100 Jahren (Anhang 1 (DepV 2009)).

Bei Betongewölben sorgen die Betonverkleidungen für größeren Schutz. Der sichere Verschluss wird hier durch eine Art technische Kappe gewährleistet, welche über den Gewölben installiert wird, um das Eindringen von Regenwasser oder Einwirkungen von außen zu verhindern (NDA 2020). Die Betongewölbe werden durch weitere undurchlässige Ton-schichten und die natürlichen Bodenformationen zusätzlich geschützt (Abbildung 8).

Abbildung 8: Schematische Darstellung des Multibarrierenkonzeptes der Entsorgungsanlagen in Form von Betongewölben zur Oberflächenlagerung in Dessel, Belgien. Quelle: (van Geet et al. 2019)



Da bei der Oberflächenlagerung das Sicherheitskonzept nicht ausschließlich auf dem Prinzip der langfristigen passiven Sicherheit fußen kann, muss die Anlage während und nach dem Betrieb über den gesamten Überwachungs- bzw. Isolationszeitraum institutionell kontrolliert und überwacht werden. Dabei geht es weniger um die radiologische Überwachung der Umgebung am Endlagerstandort als um die Wartung, Kontrolle und Instandhaltung der

Barrierenwirksamkeit. Laut (IAEA 2009c) ist es denkbar, dass dazu auch unterirdische Stollen eingebaut werden könnten, um das Funktionieren der Barrieren zu überprüfen. Notwendige Überwachungs- und Kontrollmaßnahmen betreffen die Wartung, Reparatur und Verstärkung der technischen Barrieren oder die Anpassung der natürlichen Barrieren an klimatische und geomorphologische Veränderungen, wie zum Beispiel die Erneuerung des Erosionsschutzes. Nichtsdestotrotz ist es das Ziel, solche Aktivitäten auf ein Minimum zu begrenzen, um nachfolgende Generationen nicht mit unzumutbaren Aufgaben zu belasten.

Ein wesentlicher Unterschied zur geologischen Endlagerung ist, dass die Anlagen der Oberflächenlagerung an oder unmittelbar unter der Erdoberfläche liegen und so auch vor menschlichen Aktivitäten über den gesamten Überwachungs- und Isolationszeitraum geschützt werden müssen (IAEA 2014). Die Überwachungen dienen daher auch dazu, Störungen der Anlage und ihres Inhaltes durch menschliche Aktivitäten zu verhindern (IAEA 2014). Daher hängt die langfristige Sicherheit maßgeblich von der Instandhaltung, Überwachung und Kontrolle der Anlagen ab (Pusch et al. 2017).

Die Rückholbarkeit und Bergung stellt sich vor allem aufgrund der geringen Tiefe und den technischen/geotechnischen Verschlussmaßnahmen, die mit heute verfügbaren technischen Geräten geöffnet werden können, als wesentlich einfacher dar als dies vor allem bei der geologischen Endlagerung der Fall ist (Pusch et al. 2017).

Wirtsgestein

Bei der oberflächennahen Entsorgung kommt den geologischen Gegebenheiten eine geringere Bedeutung zu als es bei der geologischen Endlagerung, bei der das Endlagerkonzept auf dem Prinzip der langfristigen passiven Sicherheit aufbaut, der Fall ist (IAEA 2020a). Eine größere Bedeutung haben dagegen Gesteinsschichten mit Grundwasservorkommen, da die oberflächennahen Endlager im Einflussbereich der oberen Grundwasserstockwerke errichtet werden. Standorte mit mächtigen Grundwasservorkommen bzw. mit Grundwasservorkommen, die potenziell mit Trinkwasservorkommen in Verbindung stehen, müssen vermieden werden.

Trotzdem spielt die geologische Umgebung eine wichtige Rolle bei der oberflächennahen Entsorgung. Anlagen zur Oberflächenlagerung können entweder in verfestigten sedimentären Bodenschichten oder in Festgesteinen errichtet werden. Unverfestigte post-glaziale Tone eignen sich auf Grund ihrer physikalischen und hydrologischen Eigenschaften dagegen nicht für die Oberflächenlagerung. (Pusch et al. 2017) betonen, dass bei der

Oberflächenlagerung prinzipiell die gleichen Wirtsgesteine – also kristalline Gesteine, Tonsteine und Steinsalz – wie bei der geologischen Endlagerung (vergleiche Kapitel 3.3) genutzt werden können. Im Unterschied dazu stehen nur die Gesteine der oberen Bodenschichten zur Verfügung.

Da sich die Anlagen direkt an der Oberfläche befinden, spielen außerdem Aspekte wie langfristige Landschaftsentwicklung, Niederschlagsmengen und Erosionsbeständigkeit sowie Klimawandelfolgen eine wichtigere Rolle (IAEA 2014). Des Weiteren müssen geologische Prozesse, wie z. B. tektonische und seismische Aktivität, aktiver Vulkanismus und in Zukunft möglicherweise glazial beeinflusste Gebiete möglichst umgangen werden.

Die Charakterisierung des Standortes kann ohne größere Schwierigkeiten mit den üblichen geologischen Erkundungen von der Erdoberfläche aus erfolgen (IAEA 2014).

3.1.2 Internationale Beispiele von Oberflächenlagerung

In der internationalen Praxis werden bereits einige Anlagen der Oberflächenlagerung zur oberflächennahen Entsorgung betrieben. Im Folgenden werden internationale Beispiele der zwei gängigsten Konzepte der Oberflächenlagerung – die Grabenanlagen und Betongewölbe – vorgestellt.

Fokus: Grabenanlagen am Beispiel CIREs, in Frankreich

Die französische Agentur für die Entsorgung radioaktiver Abfälle Andra (Agence Nationale pour la Gestion des Déchets Radioactifs) betreibt die Entsorgungsanlage CIREs (Le Centre Industriel de Regroupement, d'Entreposage et de Stockage) im französischen Département Aube in der Nähe von Morvilliers (ANDRA 2023a).

Mit der Errichtung der Anlage CIREs wurde 2002 begonnen. Seit 2003 wird die Anlage betrieben und soll voraussichtlich bis zu 650.000 m³ an Abfällen Platz bieten. Die Betriebsphase wird mit 30 Jahren angegeben (République Française 2017).

Die Andra sieht die Einlagerung von VLLW-Abfällen in speziellen Gräben vor (Abbildung 5 und Abbildung 7). Die Gräben sind 174 m lang und 26 m breit. Darin befinden sich sogenannten Gewölbezellen, in die die radioaktiven Abfälle eingelagert werden. Diese Gewölbezellen liegen bis zu 8,5 m tief unter der Erdoberfläche in homogenen Tonschichten. Die

Mächtigkeit der Tonschicht variiert zwischen 15 und 25 Metern. In einer Grabenanlage können so bis zu 34.000 m³ an Abfällen eingelagert werden (ANDRA 2023a).

Das Sicherheitskonzept der Andra baut auf einem Multibarrierensystem auf (siehe Kapitel 3.1). Die natürlichen Barrieren bilden die undurchlässigen homogenen Tonschichtschichten, in welche die Grabenanlagen eingelassen sind. Die technischen Barrieren umfassen u. a. die Endlagerbehälter, Verfüllmaterialien, und eine Geomembran. Die Gewölbezellen werden nach der Einlagerung der Abfälle mit künstlichen aufgeschütteten und verfestigten Bodenschichten überlagert und so von oben gegen das Eindringen von Niederschlägen und gegen Erosion geschützt.

Die Kontrolle und Überwachung der Luftqualität und des Grundwassers sowie die Überwachung einer möglichen Freisetzung von Radionuklide ist für die gesamte Betriebsdauer der Anlage vorgesehen. Danach schließt eine 30-jährige Nachsorgephase an, nach welcher der weitere Status des Standortes neu bewertet wird (IAEA 2020a). (République Française 2017) gibt lediglich Kosten für die Errichtung der Anlagen in Höhe von 40 Mio. Euro an. Kosten für Betrieb und Stilllegung sowie Überwachung der stillgelegten Anlage liegen nicht vor.

Fokus: Grabenanlagen am Beispiel „El Cabril“, in Spanien

In Spanien sind die Grabenanlagen zur Oberflächenlagerung am Standort „El Cabril“ mit denen der Anlage CIREs in Frankreich vergleichbar (MITC 2006). Die ENRESA (Empresa Nacional de Residuos Radiactivos) betreibt die Anlage „El Cabril“ seit 1992. Die Standortauswahl dauerte etwa vier Jahre und die Errichtung weitere zwei Jahre. Der Verschluss des Endlagers ist für das Jahr 2040 vorgesehen. „El Cabril“ wird für die Einlagerung von LILW-SL-Abfällen betrieben. Die ENRESA plant mit einer Gesamtkapazität von 90.000 m³ einzulagernden Abfällen.

Im Gegensatz zur Anlage CIREs werden die Abfallgebinde (200-Liter-Fässer) vor der Einlagerung in Überbehälter eingebracht, welche wiederum mit Beton verfüllt werden. Anschließend kann die Einlagerung in die Gewölbezellen erfolgen, die in der Grabenanlage errichtet sind. Eine Grabenanlage kann bis zu 37.000 m³ an Abfällen aufnehmen (Garamszeghy 2021). Die Anlagen wurden auf einem Grundsockel aus kristallinem Gestein errichtet (IAEA 2020a).

(OECD NEA 1999) gibt Kosten für Planung und Errichtung der Anlage von 127 Mio. Euro an. Bei der Betriebsphase werden etwa 7,5 Mio. Euro pro Jahr angesetzt. Damit ergeben sich bei knapp 50 Jahren Betriebsphase insgesamt rund 375 Mio. Euro Betriebskosten. Nach

dem Verschluss ist eine etwa 300 Jahre lange Überwachung und Kontrolle geplant. Dafür werden Kosten von 820.000 Euro jährlich angenommen. Damit ergäben sich laut (OECD NEA 1999) Kosten für das gesamte Entsorgungsprogramm in „El Cabril“ von etwa 750 Mio. Euro. Die ENRESA gibt die mittlerweile voraussichtlichen Kosten für die gesamte Entsorgung der LILW-Abfälle mit 1,6 Mrd. Euro an (MITC 2006).

Fokus: Grabenanlagen am Beispiel Dessel, Belgien

In Belgien plant die für die Zwischen- und Endlagerung zuständige „Organisation Nationale Einrichtung für Radioaktive Abfälle und angereicherte Spaltmaterialien“ ONDRAF/NIRAS eine Anlage für die oberflächennahe Entsorgung in Form der Oberflächenlagerung für LILW-SL-Abfälle am Zwischenlagerstandort Dessel (Abbildung 8). Die Genehmigung zur Errichtung und dem Betrieb der Anlagen wurde im Frühjahr 2023 erteilt⁷. Mit der Errichtung der Anlagen soll 2024 begonnen werden. Die ONDRAF strebt an, eine Gesamtkapazität von 60.000 – 100.000 m³ radioaktiven Abfällen einzulagern (OECD NEA 1999).

Das Sicherheitskonzept der Anlagen soll auf einem Multibarrierensystem aufbauen, welches auf natürlichen Barrieren wie die umliegenden tonigen Sedimente und technische Barrieren, wie z. B. die Endlagerbehälter, Überbehälter sowie Verfüll- und Verschlussmaterialien in seiner Wirksamkeit kombiniert. Die Abfälle werden in Monolith Type I – III Stahlbetonbehältern (siehe Abbildung 1) in die Betongewölbe eingelagert (Seetharam et al. 2011)). Die Gewölbe sind 25 Meter lang, 27 Meter breit und 11 Meter hoch. Die Anlage wird insgesamt 34 dieser Gewölbe beherbergen. Jedes der Gewölbe fasst 900 der Monolith Type I – III Stahlbetonbehältern (~4,500 m³), die üblicherweise jeweils vier 200-Liter-Fässer aufnehmen können (van Geet et al. 2019). Insgesamt fasst die Anlage bis zu 26.000 Monolith Type I – III Stahlbetonbehältern.

Laut (van Geet et al. 2019) plant die ONDRAF die Betriebsphase bis zum Jahr 2070 zu beenden. Nach dem Betrieb steht eine 200 – 300-jährige Überwachung und Kontrolle an (OECD NEA 1999). Die ONDRAF gibt die Kosten mit bis zu 1,2 Mrd. Euro an (van Geet et al. 2019). Es ist anzunehmen, dass die Kosten neben der Planung und Errichtung auch den Betrieb, den Verschluss und die institutionelle Überwachung und Kontrolle abdecken.

⁷ <https://world-nuclear-news.org/Articles/Permits-granted-for-Belgian-waste-facilities>

Fokus: Betongewölbe am Beispiel CSA, in Frankreich

Ein weiteres Beispiel für Anlagen der Oberflächenlagerung ebenfalls aus Frankreich stellt die CSA (Centre de Stockage de l'Aube) Entsorgungsanlage in l'Aube in Frankreich dar. CSA besteht aus einer Serie an Betongewölben, deren Basis knapp unter der Erdoberfläche liegen (Abbildung 4). Die gesamte Anlage umfasst eine Fläche von insgesamt 95 Hektar, von welcher rund ein Drittel für die Entsorgungsanlagen selbst vorgesehen sind. Zwei Drittel der Anlage machen die Oberflächenanlagen aus. CSA wird für ungefähr 1.000.000 m³ an LILW-SL-Abfällen Platz bieten. Die Anlage befindet sich nur wenige Kilometer von der Entsorgungsanlage CIREs entfernt (République Française 2017).

Das Wirtsgestein sind undurchlässige tonige und geringdurchlässige sandige Lockergesteine. Die Anlage wurde mit einem leichten Gefälle zu einem nahen Bachlauf hin geplant. Die leicht geneigte Ausrichtung der Anlagen bildet so die Basis für das Entwässerungssystem.

Die Betongewölbe sind 25 Meter breit, 25 Meter lang und acht Meter hoch und sind für einen Isolationszeitraum von 300 Jahren ausgelegt (République Française 2017). Eines der Betongewölbe kann ein Volumen von 5.000 m³ an Abfällen fassen. Die Abfallgebinde (200 Liter Fässer) werden mit einem Kran in die Betongewölbe eingelassen, welches anschließend mit Beton und Kies verfüllt wird (siehe Kapitel 3.1).

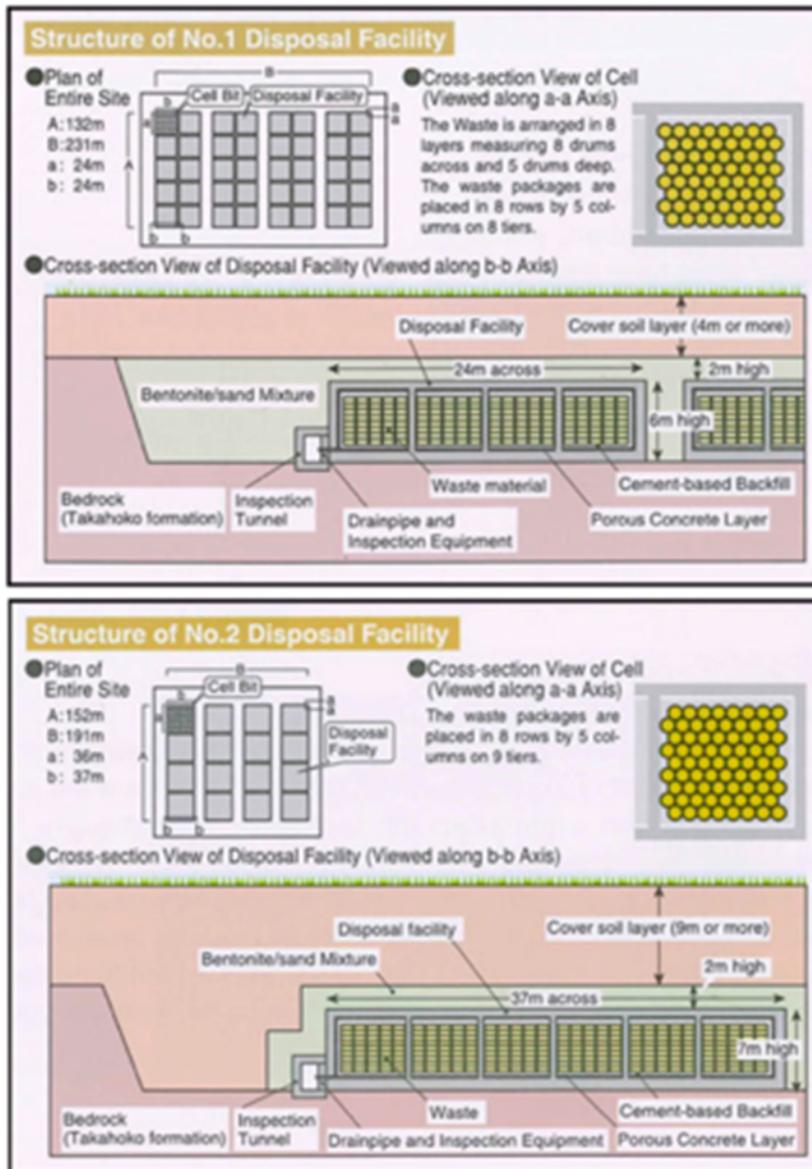
Die Andra lagert in l'Aube seit 1992 LILW-SL-Abfälle ein (ANDRA 2023b). Die Errichtung der Anlagen dauerte drei Jahre. Für die Betriebsphase sind zwischen 50 und 80 Jahren vorgesehen. Nach dem Betrieb wird über den Betongewölben ein finales Verschlusssystem in Form einer Betonkappe installiert, welches das Eindringen von Niederschlägen verhindern soll. Nach dem Verschluss der Anlage ist eine institutionelle Überwachung und Kontrolle für weitere 300 Jahre vorgesehen (République Française 2017). Die (OECD NEA 1999) gibt für die Kosten von der CSA für Planung und Errichtung knapp 400 Mio. Euro. Für die Betriebsphase sind rund 40 Mio. Euro pro Jahr zu erwarten. Demnach ergäben sich Kosten zwischen 2,4 und 3,6 Mrd. Euro exklusive der Kosten für die institutionelle Überwachung und Kontrolle.

Fokus: Tiefere Betongewölbe am Beispiel Rohhasho-mura, Japan

Das japanische Endlager des privaten Unternehmens Japan Nuclear Fuels Ltd. (JNFL) in Rohhasho-mura stellt ein Beispiel für die Oberflächenlagerung dar, bei der die Stahlbetongewölbe leicht unter der Erdoberfläche liegen. Es ist für LILW-SL-Abfälle mit zwei

verschiedenen Stahlbetongewölbekonzerten konzipiert und wird seit 1992 betrieben (Abbildung 9). Die Errichtung dauerte zwei Jahre (OECD NEA 1999).

Abbildung 9: Stahlbetongewölbekonzerte der Anlage zur Oberflächenlagerung in Rohhaso-mura, Japan. Quelle: (USDOE 2011)



Das Wirtsgestein besteht aus tertiärem Sandstein und vulkanischen Bimssteinen, in welche die Anlagen in einer Tiefe von etwa 15 – 20 Metern eingegraben sind (USDOE 2011). Die Stahlbetongewölbe liegen unterhalb des Grundwasserspiegels. Die Gewölbe können jeweils rund 5.000 m³ an Abfällen aufnehmen (OECD NEA 1999). Die Stahlbetongewölbe selbst sind in 16 Zellen unterteilt, welche jeweils 320 Stück 200-Liter-Fässer fassen. Die Zellen selbst

und deren Zwischenräume werden nach der Einlagerung mit Zementbeton verfüllt. Der Verschluss erfolgt mit einem Stahlbetondeckel und einer Bentonitschicht. Die Außenwände der Gewölbe werden zudem mit einer weiteren undurchlässigen Barriere verkleidet. Darüber bedeckt eine mehr als vier Meter dicke Erdschicht die Stahlbetongewölbe (OECD NEA 1999).

Bis zum Jahr 2023 wurden knapp 350.000 Stück 200-Liter-Fässer eingelagert⁸. Die Betriebsphase soll bis zum Jahr 2030 abgeschlossen sein. Anschließend ist eine Überwachung und Kontrolle für 300 Jahre vorgesehen (OECD NEA 1999). Laut (OECD NEA 1999) belaufen sich die Kosten für Planung und Errichtung der Anlagen auf etwa 674 Mio. Euro.

3.1.3 Vor- und Nachteile der Oberflächenlagerung

Im Folgenden werden die Vor- und Nachteile der Oberflächenlagerung dargestellt. Der Fokus wird dabei auf die Endlagerung von LILW-SL-Abfällen gelegt. Da die Oberflächenlagerung für LILW-LL-Abfälle nicht geeignet ist, werden sie im Folgenden nicht mitbetrachtet. Was die Vor- und Nachteile im Einzelnen für die Entsorgung radioaktiver Abfälle in Österreich bedeuten, folgt in der vergleichenden Bewertung der Optionen in Kapitel 4.

Vorteile:

- **Technische Machbarkeit:** Auf Basis von den in der Praxis vorhandenen Beispielen kann eine technische Machbarkeit für die Entsorgung von LILW-SL-Abfällen als gegeben eingestuft werden. Zu Errichtung und Betrieb zeigen die internationalen Beispiele einen umfangreichen Erfahrungsschatz.
- **Zeitbedarfe:** Auf Grund der gegebenen technischen Machbarkeit für die Entsorgung von LILW-SL-Abfällen und den geringen F&E-Bedarfen sowie dem geringen Aufwand für die Errichtung (ausschließlich übertägige Arbeiten) ist davon auszugehen, dass die Planung, Errichtung und der Betrieb der verschiedenen Entsorgungstypen der Oberflächenlagerung einen Zeitbedarf von einem bis einigen wenigen Jahrzehnten in Anspruch nehmen werden. Ein solcher Zeitrahmen wird in Anbetracht eines solchen Projektes als vorteilhaft bewertet.

⁸ <https://www.jnfl.co.jp/en/business/llw/>

- **Charakterisierung des Standorts:** Die Charakterisierung des Standorts erfolgt ausschließlich auf bzw. von der Erdoberfläche aus. Zudem ist die Oberflächenlagerung nur auf einen Isolationszeitraum von 300 – 500 Jahren ausgelegt. Sicherheitsnachweise müssen lediglich diesen Zeitraum umfassen. Des Weiteren muss der Untergrund nicht bis in große Tiefen untersucht werden. Entsprechend wird dieser Aspekt als vorteilhaft angesehen.
- **Aufnahmekapazität:** Alle Typen der Oberflächenlagerung bieten eine große Flexibilität hinsichtlich der Mengen von aufzunehmenden Abfällen. Zusätzlich bestehen keine Schwierigkeiten in der Unterbringung von Abfallgebinden jeglicher Form, Größe oder Geometrie. Abfallgebände können passgenau entsorgt und die Anlagen angepasst werden.
- **Rückholbarkeit und Bergung:** Während der Einlagerung bis zum Ende der Betriebsphase kann eine Rückholbarkeit der Abfälle als gegeben angesehen werden. Auch nach der Stilllegung ist der Aufwand einer Bergung vergleichsweise gering, da die Bergung von der Oberfläche aus vollzogen werden kann.
- **Kosten:** Aufgrund des konzeptionellen Aufbaus des Anlagentyps und vergleichsweise geringen Aufwands bei der Errichtung, Betrieb und Verschluss an der Erdoberfläche ist mit relativ geringen Kosten zu rechnen.
- **F&E-Bedarfe:** Da die Oberflächenlagerung in einigen Staaten schon praktiziert oder in der Konzeption weit fortgeschritten ist, sind keine großen F&E-Bedarfe zu erwarten.

Nachteile:

- **Einschluss und Isolation:** Das Sicherheitskonzept von Oberflächenanlagen ist ausschließlich für den Einschluss und die Isolation von LILW-SL-Abfällen für 300 – 500 Jahre ausgelegt. Daher ist eine sichere Entsorgung von Abfällen mit Halbwertszeiten größer 30 Jahre oder hoher Anfangsaktivität nicht vorgesehen und kann auch nicht gewährleistet werden. Zudem ist für die meisten der Konzepte in der Regel die Notwendigkeit einer institutionellen Kontrolle und Überwachung zur Einhaltung der WAC und der Barrierenwirksamkeit während und nach dem Betrieb notwendig.
- **Abfallflexibilität:** Auf Grund des Sicherheitskonzeptes, welchen nur den Einschluss und die Isolation von LILW-SL-Abfällen für 300 – 500 Jahre gewährleistet, ist die

Einlagerung anderer Abfalltypen wie LILW-LL-Abfälle bei der Entsorgungsoption Oberflächenlagerung nicht gegeben. Zudem kommt auf Grund der geringeren passiven Rückhalteeigenschaften den WAC besondere Bedeutung zuteil.

- Oberflächenanlagen: Da sich die Entsorgungsanlage an der Oberfläche befindet, zählen wir sie neben den sonstigen Infrastrukturanlagen zu den Oberflächenanlagen hinzu. Der Flächenbedarf der Oberflächenanlagen hängt im Wesentlichen von der Größe der Anlage und der Menge der zu entsorgenden Abfälle ab. Nach der Stilllegung der Entsorgungsanlage bleiben Teile der Infrastrukturanlagen, die für das Monitoring und die Überwachung erforderlich sind, mindestens für den Isolations- und Überwachungszeitraum bestehen.

3.2 Lagerung mittlerer Tiefe

3.2.1 Technische Beschreibung

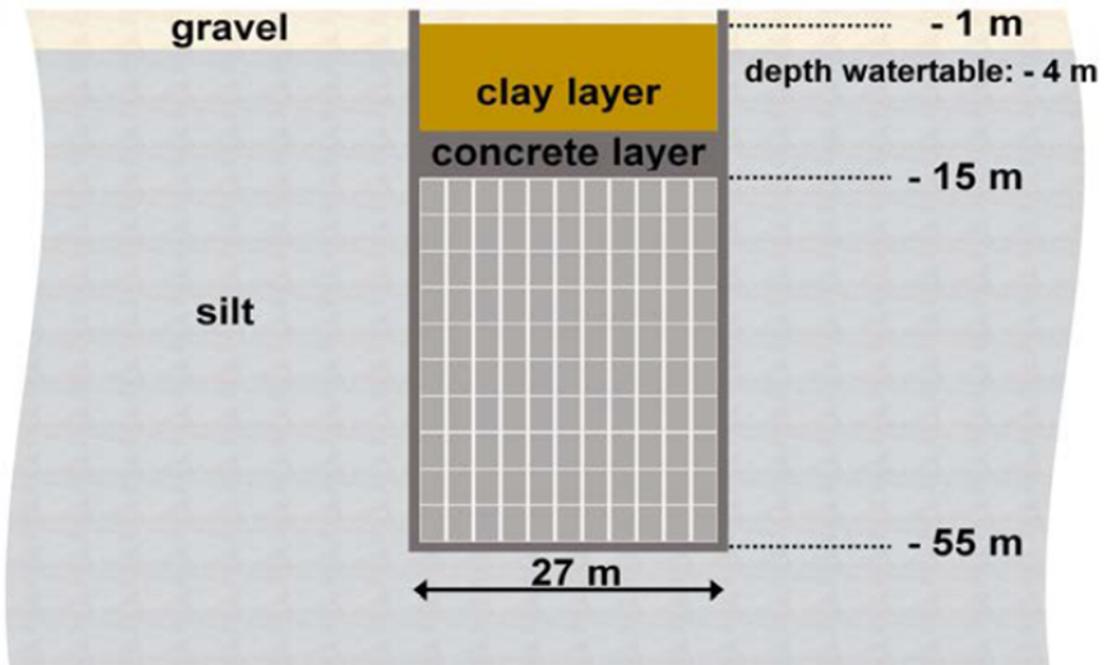
Begrifflichkeiten

Der Lagerung mittlerer Tiefe liegen zwei verschiedene Konzepte zu Grunde (Abbildung 2). Einerseits kann die Lagerung mittlerer Tiefe in ihrer Konzeption der Anlagen und des Sicherheitskonzeptes der Oberflächenlagerung angelehnt sein, wir bezeichnen dies als Lagerung mittlerer Tiefe nach dem Prinzip der oberflächennahen Entsorgung. Andererseits gibt es auch Anlagen der Lagerung mittlerer Tiefe nach dem Prinzip der geologischen Endlagerung. Diese Anlagen gleichen dem Aufbau und Sicherheitskonzept von geologischen Tiefenlagern, befinden sich jedoch in geringeren Tiefen und liegen demnach oberflächennah (IAEA 2020a).

Endlagertypen

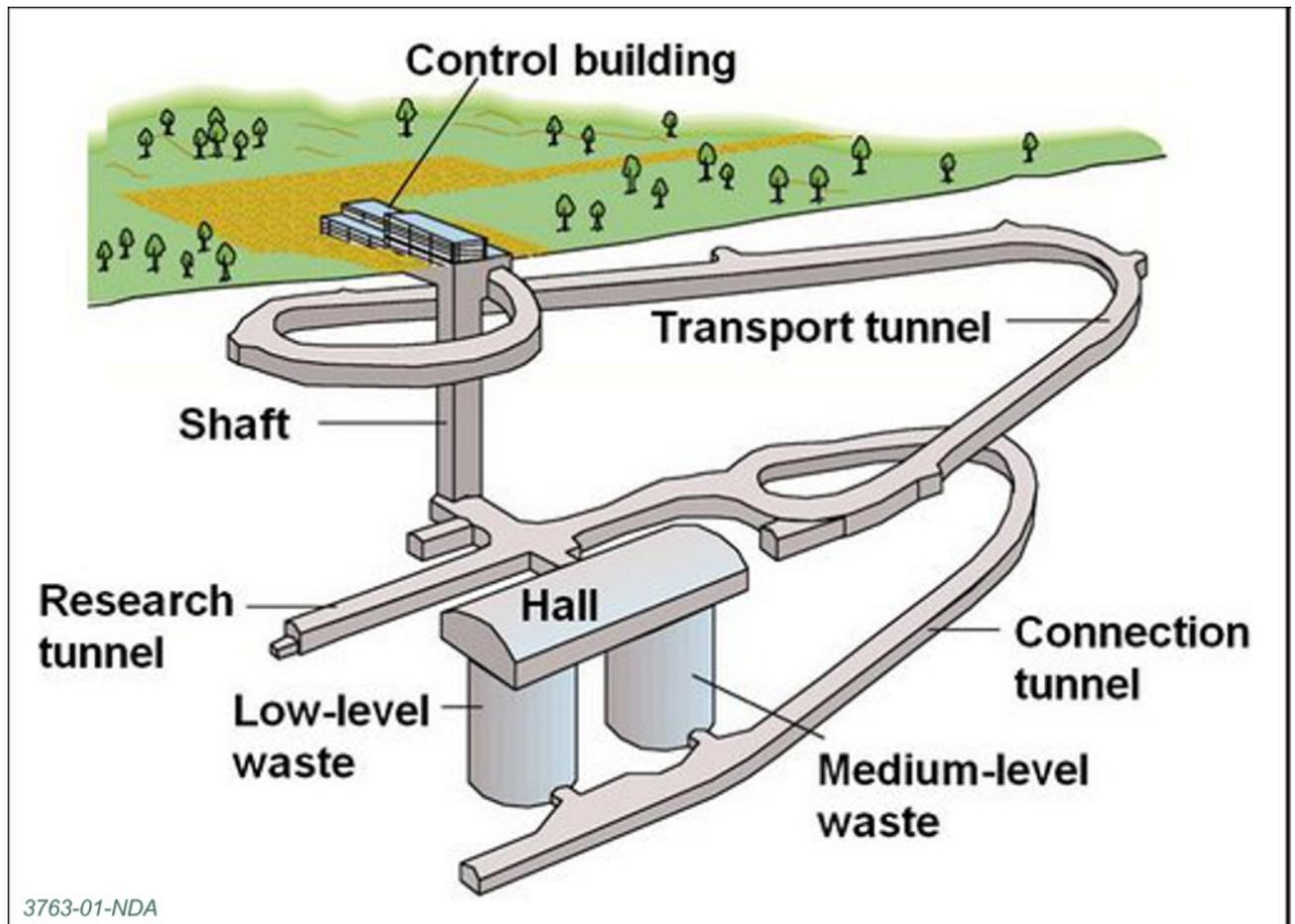
Die Lagerung mittlerer Tiefe nach dem Prinzip der oberflächennahen Entsorgung erfolgt in technisch gestalteten Betongewölben oder -silos in wenigen bis mehreren Dutzenden Metern Tiefe, welche von der Erdoberfläche aus betrieben werden (Abbildung 10). Diese gleichen den Gewölben und Silos der Oberflächenlagerung, liegen jedoch tiefer unter der Erdoberfläche (IAEA 2020a).

Abbildung 10: Schematische Darstellung eines Silos zur Lagerung mittlerer Tiefe nach dem Prinzip der oberflächennahen Entsorgung. Quelle: (IAEA 2020b)



Anlagen der Lagerung mittlerer Tiefe, die dem Sicherheitskonzept der geologischen Endlagerung nachempfunden sind, bestehen wie geologische Tiefenlager aus unterirdisch gestalteten Kavernen, Gewölben, Tunneln, Stollen oder Silos, welche sich in Tiefen von mehreren Dutzenden bis zu 300 Metern Tiefe befinden (Abbildung 11). Diese Anlagen unterscheiden sich insofern von der oberflächennahen Entsorgung, dass sie nicht direkt von der Erdoberfläche betrieben werden (IAEA 2020b). Ähnlich wie geologische Tiefenlager verfügen sie über Zugangsschächte, -rampen und Strecken- und Tunnelsysteme, welche vollständig von den umgebenden geologischen Formationen umschlossen sind.

Abbildung 11: Schematische Darstellung der Anlagen der Lagerung mittlerer Tiefe nach dem Prinzip der geologischen Endlagerung in Finnland. Quelle: (NDA 2017)



Abfallarten

Bei den Abfallarten, für welche Anlagen zur Lagerung mittlerer Tiefe in Frage kommen, muss zwischen den beiden Auslegungen der Lagerung mittlerer Tiefe unterschieden werden (IAEA 2020a).

Anlagen zur Lagerung mittlerer Tiefe nach dem Sicherheitsprinzip der oberflächennahen Entsorgung sind nicht für die Endlagerung von HLW- und LILW-LL-Abfällen ausgelegt. Das Sicherheitskonzept bietet nicht genügend Schutz für den sicheren Einschluss und die Isolation der radioaktiven Abfälle von Mensch und Umwelt für die sichere Entsorgung von Abfällen mit Halbwertszeiten größer 30 Jahre oder hoher Anfangsaktivität, da eine langfristige passive Sicherheit nicht gewährleistet werden kann (Pusch et al. 2017; IAEA 2020a; 2020b).

Für LILW-SL-Abfälle mit sehr begrenzten Mengen an langlebigen Radionukliden bietet die Lagerung mittlerer Tiefe in Form der oberflächennahen Entsorgung jedoch einen sehr guten Einschluss und Isolation für den Isolationszeitraum von 300 – 500 Jahren (IAEA 2020a). International wurden bereits einige Projekte zur Lagerung mittlerer Tiefe umgesetzt und deren technische Machbarkeit bewiesen. Beispiele für die Entsorgung von LILW-SL-Abfällen nach Prinzip der oberflächennahen Entsorgung finden sich u. a. in Slowenien.

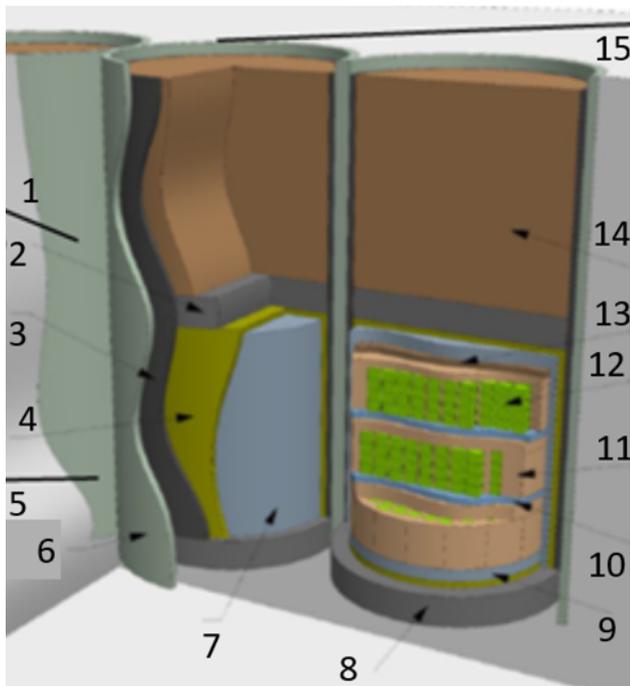
Anlagen der Lagerung mittlerer Tiefe in mittleren Tiefen, welche auf dem Sicherheitskonzept der geologischen Endlagerung aufbauen, eignen sich sowohl für die permanente langfristige Lagerung von LILW-SL-Abfällen als auch für die Endlagerung von LILW-LL-Abfällen (IAEA 2020a). Konzepte zu Anlagen, die dem Aufbau von geologischen Tiefenlagern in geringeren Tiefen nachempfunden sind, sind bereits umgesetzt und haben ihre technische Machbarkeit bewiesen (IAEA 2020b). Beispiele für sich in Planung, Bau und Betrieb befindende Anlagen für oberflächennahe Anlagen als geologische Endlager finden sich z. B. in Schweden, Finnland und Südkorea wieder.

Beide Varianten der Lagerung mittlerer Tiefe eignen sich dazu, große Mengen an Abfällen aufzunehmen und bieten viel Spielraum für jegliche Abfallformen und -geometrien. Zusätzlich bieten Anlagen der Lagerung mittlerer Tiefe als geologisches Endlager die Möglichkeit, verschieden klassifizierte Abfallarten gemeinsam zu entsorgen (Pusch et al. 2017).

Errichtung, Betrieb und Verschluss

Anlagen der Lagerung mittlerer Tiefe in Form der oberflächennahen Entsorgung unterscheiden sich wenig im Aufbau zu den in die Erdoberfläche eingelassenen Betongewölbe oder -silos der Oberflächenlagerung (siehe Kapitel 3.1). Die Entsorgungsgewölbe befinden sich jedoch tiefer in einigen bis mehreren Dutzenden Metern in der Tiefe und die Abfälle werden über einen Kran in die Gewölbe oder Silos eingelagert (IAEA 2020a). Anders als bei der Oberflächenlagerung reichen die Einlagerungsbereiche nicht bis zur Erdoberfläche (Abbildung 12). Es können je nach Bedarf mehrere Silos nebeneinander gebaut werden, welche von der Erdoberfläche aus betrieben werden. Dafür werden auch Oberflächenanlagen nötig sein (NDA 2020). Mit zunehmender Tiefe werden die Gewölbe und Silos mit Zugangsschächten oder -rampen betrieben.

Abbildung 12: Darstellung einer möglichen Ausgestaltung von Entsorgungssilos als Oberflächennahe Anlage in mehreren Dutzend Metern Tiefe. Quelle: verändert nach (NDA 2020). 1: Unterbringung der Abfälle unter der Erde; 2: Kappe; 3: Außenwand; 4: Betonit angereicherte Sand (BES); 5: Multibarrierensystem; 6: Membranwand; 7: Innenwand; 8: Betonsockel; 9: interne Bodenplatte; 10: Zwischenboden; 11: Fugenmasse; 12: Abfallbehälter; 13: Abblende; 14: Verfüllung; 15: Erdoberfläche.



Bei der Lagerung mittlerer Tiefe in Form der geologischen Endlagerung wird das Endlagerbergwerk in geologischen Formationen in Tiefen von mehreren Dutzend bis zu 300 Metern errichtet und unterscheiden sich im sonstigen Aufbau, wie den Zugangsschächten und -rampen, Streckennetz und Einlagerungshohlräumen wenig von geologischen Tiefenlagern (IAEA 2020a). Daher wird an dieser Stelle auf die Ausführungen in Kapitel 3.3 verwiesen.

Die Ausführungen zu den Oberflächenanlagen und Zeitbedarfen sind ebenfalls für die jeweilige Variante den Kapiteln 3.1 und 3.3 zu entnehmen. Da es sich bei der Lagerung mittlerer Tiefe um eine Mischform handelt, ist anzunehmen, dass sich auch der Aufwand, Zeitbedarf und Kosten mit entsprechenden Ab- und Aufstufungen zwischen der Oberflächenlagerung und den geologischen Tiefenlagern orientieren. Dies gilt ebenfalls für die Charakterisierung des Standorts, welche generell von der Oberfläche aus aber auch mit untertägigen Erkundungen durchgeführt werden kann. Laut (IAEA 2020a) sind unterirdische Silos schwieriger und kostspieliger zu errichten als Stollen und Tunnel.

(NEA 1993) beschreiben, dass grundsätzlich Aufwand und Kosten in Abhängigkeit von der Tiefe steigen, aber die Wahl der Tiefe aufwand- und kostentechnisch nicht so sehr ins Gewicht fallen wie die Wahl des Wirtsgesteins und dessen geologischen Eigenschaften. Prinzipiell ist zu erwarten, dass sowohl Oberflächenanlagen, Umweltauswirkungen, Zeitbedarfe als auch Kosten entscheidend von der standortspezifischen Ausgestaltung der Entsorgungsanlage abhängen.

Sicherheitskonzept

Sowohl das Sicherheitskonzept der Lagerung mittlerer Tiefe als oberflächennahe Entsorgung als auch das der geologischen Endlagerung baut auf den sicheren Einschluss und Isolation von Mensch und Umwelt auf Basis der Kombination von gemeinsam wirkenden natürlichen und technischen Barrieren auf (IAEA 2020b).

Bei der Lagerung mittlerer Tiefe als oberflächennahe Entsorgung gilt das gleiche Konzept wie bei der Oberflächenlagerung. Daher verweisen wir an dieser Stelle an die entsprechenden Ausführungen in Kapitel 3.1. Gewölbe und Silos, die wie bei der Lagerung mittlerer Tiefe tiefer als bei der Oberflächenlagerung liegen, bieten zusätzlich den Schutz durch die größere Tiefe und dem daraus resultierenden Abstand zur Biosphäre. Neben der geringeren Gefahr des Eindringens von Menschen durch den Abstand zur Erdoberfläche ist ein weiteres positives Merkmal, dass das Grundwasser in diesen Tiefen nach der Sättigungsphase nur sehr langsam versickert und eine Migration von Radionukliden wesentlich langsamer abläuft. Dadurch kann die Kontamination des Grundwassers minimiert werden (Pusch et al. 2017). Die hydraulische Leitfähigkeit des Untergrundes nimmt ebenfalls mit der Tiefe ab. Darüber hinaus sind tiefer liegende Anlagen weniger von Oberflächenprozessen wie Erosion betroffen. Je nach Ausgestaltung der Anlagen ist eine institutionelle Kontrolle und Überwachung während und nach dem Betrieb notwendig.

Anlagen der Lagerung mittlerer Tiefe, welche in ihrem Sicherheitskonzept auf dem der geologischen Endlagerung aufbauen, bieten grundsätzlich einen ähnlichen Einschluss und Isolation wie geologische Tiefenlager (IAEA 2020b). Daher wird an dieser Stelle auf Kapitel 3.3 verwiesen. Es ist davon auszugehen, dass auch trotz geringerer Tiefe langfristige passive Sicherheit für die Endlagerung von LILW-LL-Abfällen für mehrere Tausende Jahre erreicht werden kann.

Wirtsgestein

Wirtsgesteine, die für die Lagerung mittlerer Tiefe in Frage kommen, unterscheiden sich nicht von denen, welche für die Entsorgungsoptionen der Oberflächenlagerung und der geologischen Endlagerung genutzt werden. Daher ist an dieser Stelle auf die jeweiligen Ausführungen dieser Entsorgungsoptionen zu verweisen (siehe Kapitel 3.1 und 3.3).

3.2.2 Internationale Beispiele für die Lagerung mittlerer Tiefe

Im Folgenden werden internationale Beispiele der Lagerung mittlerer Tiefe vorgestellt. Die Beispiele entsprechen dabei Anlagen zur Lagerung mittlerer Tiefe sowohl nach dem Sicherheitskonzept der oberflächennahen Entsorgung als auch der geologischen Endlagerung. Da einige Beispiele Mischformen der Entsorgungsoptionen darstellen, ist eine klare Trennung nicht immer gegeben. Im Fokus stehen technische Merkmale, wie z. B. die Konzeption der Anlagen, das Einlagerungskonzept, die einlagerbaren Arten und Mengen (pro Gewölbeeinheit) an radioaktiven Abfällen und die Wirtsgesteine, welche die Beispiele für die österreichische Entsorgungssituation interessant und passend erscheinen lassen.

Fokus: Betonsilo am Beispiel Urbina, Slowenien

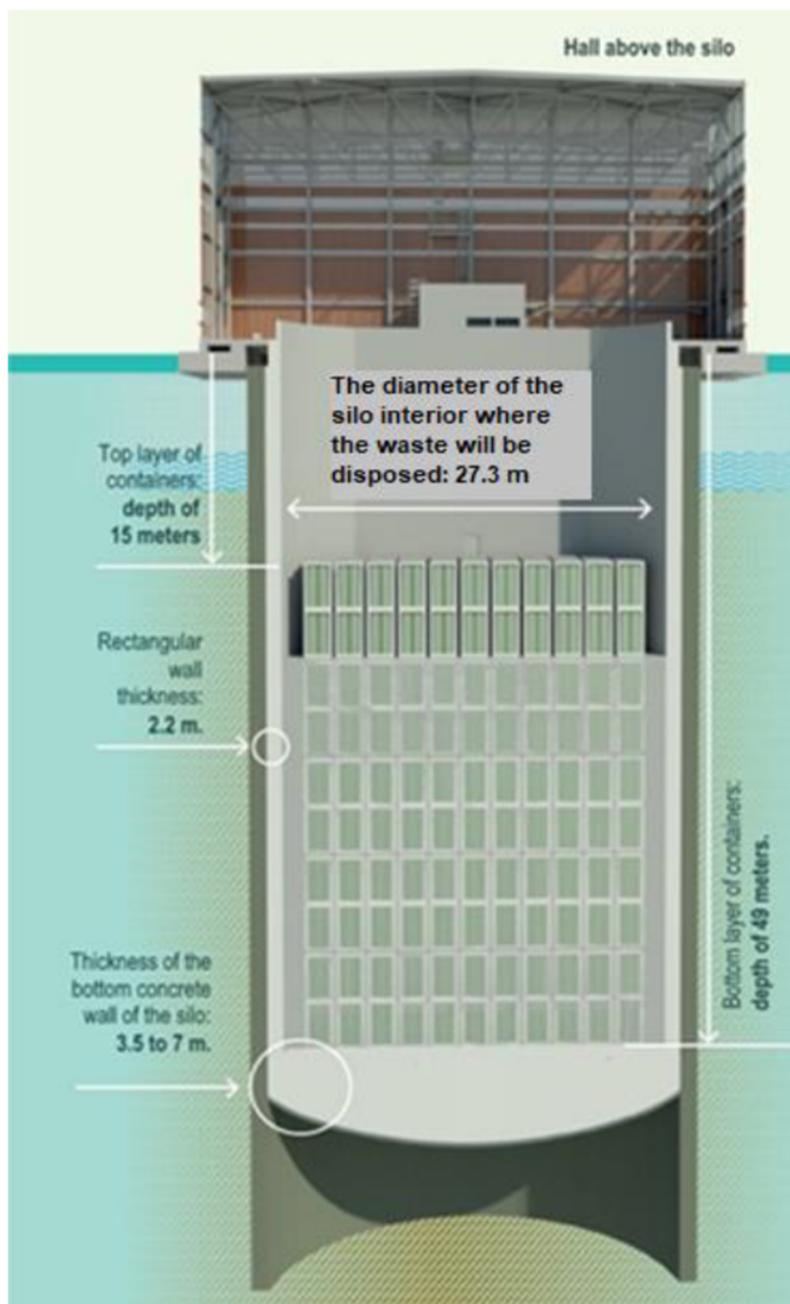
Im Jahr 2009 entschied sich Slowenien nach einem fünfjährigen Standortauswahlprozess, bei dem verschiedene Konzepte untersucht wurden, z. B. Konzepte zu Anlagen zur Oberflächenlagerung, wie sie in Frankreich und Spanien betrieben werden sowie einem 200 Meter tiefen geologischen Tiefenlager. Die Entscheidung fiel auf ein Konzept, das auf einem etwa 60 Meter tiefen Silo für die Entsorgung von LILW-SL-Abfällen basiert (IAEA 2020b). Das Silo (siehe Abbildung 6), welches von der Oberfläche aus betrieben werden kann, wurde auf dem Gelände des einzigen slowenischen Atomkraftwerks Krško errichtet (IAEA 2020a). Der Bau der Anlage soll bis 2023 nach dreijähriger Bauphase abgeschlossen sein (Kegel et al. 2019).

Das Silo befindet sich unter der Erdoberfläche in einer Schluffschicht, welche eine sehr geringe Durchlässigkeit aufweist. Der Einlagerungsbereich liegt in der ungesättigten Bodenzone unter dem Grundwasserniveau (Kegel et al. 2019).

Die Anlage verbindet Eigenschaften der Lagerung mittlerer Tiefe in Form der oberflächennahen Entsorgung und solche der Lagerung mittlerer Tiefe nach dem Sicherheitskonzept

der geologischen Endlagerung und stellt daher eine Übergangsform dar (Kegel et al. 2019). Das Sicherheitskonzept besteht aus einer Kombination von natürlichen und technischen Barrieren. Während die natürlichen Barrieren aus der natürlichen geologischen Umgebung bestehen, bilden die Endlagerbehälter, Verfüllmaterialien und das Silo selbst die technischen Barrieren.

Abbildung 13: Konzept des Betonsilos der LILW-SL-Entsorgungsanlage Vrbinja, Slowenien.
Quelle: (Kegel et al. 2019)



Das Silo bildet eine zylindrische Konstruktion aus verstärktem Stahlbeton mit einem inneren Durchmesser von 27,3 Metern (Abbildung 13). Die Wand des Silos ist mit einem insgesamt 2,2 Meter dicken sogenannten Liningsystem ähnlich einer Doppelverrohrung ausgestattet. Die untersten Abfälle werden in einer Tiefe von 49,2 Metern eingelagert (Kegel et al. 2019). Dazu dient eine Art Kommunikationsschacht. Die Abfallgebinde selbst werden in einen speziell konzipierten „N2D“ Stahlbetonbehälter eingebracht, der als Endlagerbehälter dient (Kegel et al. 2019). Bis zu 12 Abfallgebinde (200-Liter-Fässer) fasst ein Stahlbetonüberbehälter, welcher als technische Barriere dient. Ziel ist, den sicheren Einschluss und die Isolation der radioaktiven Abfälle von Mensch und Umwelt für 300 Jahre zu gewährleisten (Kegel et al. 2019).

Das Silo ist so konzipiert, dass es für etwa 9.400 m³ an Abfällen Platz bietet. Die Anlage ist insgesamt so konzipiert, dass man die Gesamtkapazität mit dem Bau weiterer Silos nach Bedarf erweitern könnte. Momentan wird mit maximal zwei Silos gerechnet (Kegel et al. 2019).

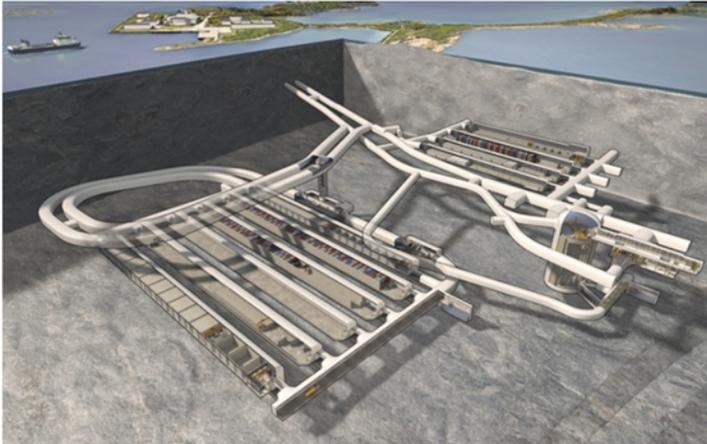
Während dem Betrieb wird das Silo von einer mobilen Betriebshalle überdeckt, um die Abfälle in erster Linie vor Niederschlägen zu schützen. Der Baubeginn der ersten infrastrukturellen Oberflächenanlagen soll im Jahr 2023 erfolgen⁹. Der Betrieb selbst soll in einer ersten Phase bis zum Jahr 2026 erfolgen (Kegel et al. 2019). Eine zweite Betriebsphase soll bis zum Jahr 2058 abgeschlossen sein. Der Verschluss ist für das Jahr 2059 angesetzt. Für die Anlagen ist nach dem Verschluss eine etwa 300-jährige institutionelle Überwachung und Kontrolle vorgesehen (IAEA 2020b). (Kegel et al. 2019) gibt zu erwartende Kosten für die Entsorgung des gesamten LILW-Abfallbestands von Slowenien mit etwa 340 Mio. Euro an.

Fokus: Wirtsgestein kristallin und Einlagerungskonzept am Beispiel Schweden

Seit 1988 wird in Forsmark das SFR-Endlager der Svensk Kärnbränslehantering Aktiebolag (SKB) für LILW-SL-Abfälle betrieben (Abbildung 14). Mit dem Bau wurde im Jahr 1983 begonnen und im Jahr 1988 abgeschlossen (OECD NEA 1999). Zurzeit plant die SKB das Endlager noch zu erweitern (SKB 2018).

⁹ <https://seenews.com/news/slovenia-to-start-building-nuclear-waste-disposal-site-in-2023-report-811393>

Abbildung 14: Schematische Darstellung des flachen SFR-Endlagers zur Lagerung mittlerer Tiefe in Schweden. Quelle: (SKB 2018)



Zu den bereits bestehenden Endlagergewölben in Kristallgestein auf etwa 60 Meter Tiefe unter Meeresspiegel plant die SKB sechs neue Endlagergewölbe auf mindestens 120 Meter Tiefe zu errichten. Die neuen Gewölbekammern sollen bis zu 275 Meter lang sein und das Endlager in seiner Gesamtgröße verdreifachen. Die vier Felsgewölbe der ersten Generation sind etwa 160 Meter lang, 19,5 Meter breit und 16,5 Meter hoch. Die Gewölbe sind in einzelne Kammern unterteilt, die nach und nach be- und verfüllt werden. Die Felsgewölbe wurden mit Abfällen bis zu maximalen Dosisleistungen von 100 mSv/h befüllt (OECD NEA 1999). Bisher lagern im SFR um die 63.000 m³ an Abfällen. Nach der Erweiterung sollte die Kapazität auf 180.000 m³ an radioaktiven Abfällen ansteigen (SKB 2018).

Neben den neuen längeren Gewölbekammern besteht das SFR aus einem Silo für radioaktive Abfälle mit einer maximalen Dosisleistung von 500 mSv/h (Garamszeghy 2021). Das Stahlbetonsilo hat einen zylindrischen Aufbau mit einem Durchmesser von 30 Metern und einer Höhe von 50 Metern. Das Silo wird ebenfalls über die Zugänge des Endlagers und nicht von der Oberfläche aus betrieben. Die Silowände sind etwa 0,8 Meter dick und mit einer äußeren Bentonit Verkleidung von 1,2 Metern ausgestattet, die das Silo vom umliegenden Gestein trennt. Die Abfallgebände werden mit einem Brückenkran schichtweise in das Silo eingebracht. Zwischenräume werden nach und nach mit Porenbeton verfüllt. Das Silo wird nach der Einlagerung mit einer Betonkappe verschlossen.

Das Ende der Betriebsphase ist noch nicht absehbar. Eine institutionelle Überwachung und Kontrolle sind bisher nicht vorgesehen. Die Planung und Errichtung waren laut (OECD NEA 1999) mit Kosten von etwa 175 Mio. Euro angesetzt. Die SKB gibt die Kosten für das SFR-Endlager mit mittlerweile etwa 382 Mio. Euro an (SKB 2017).

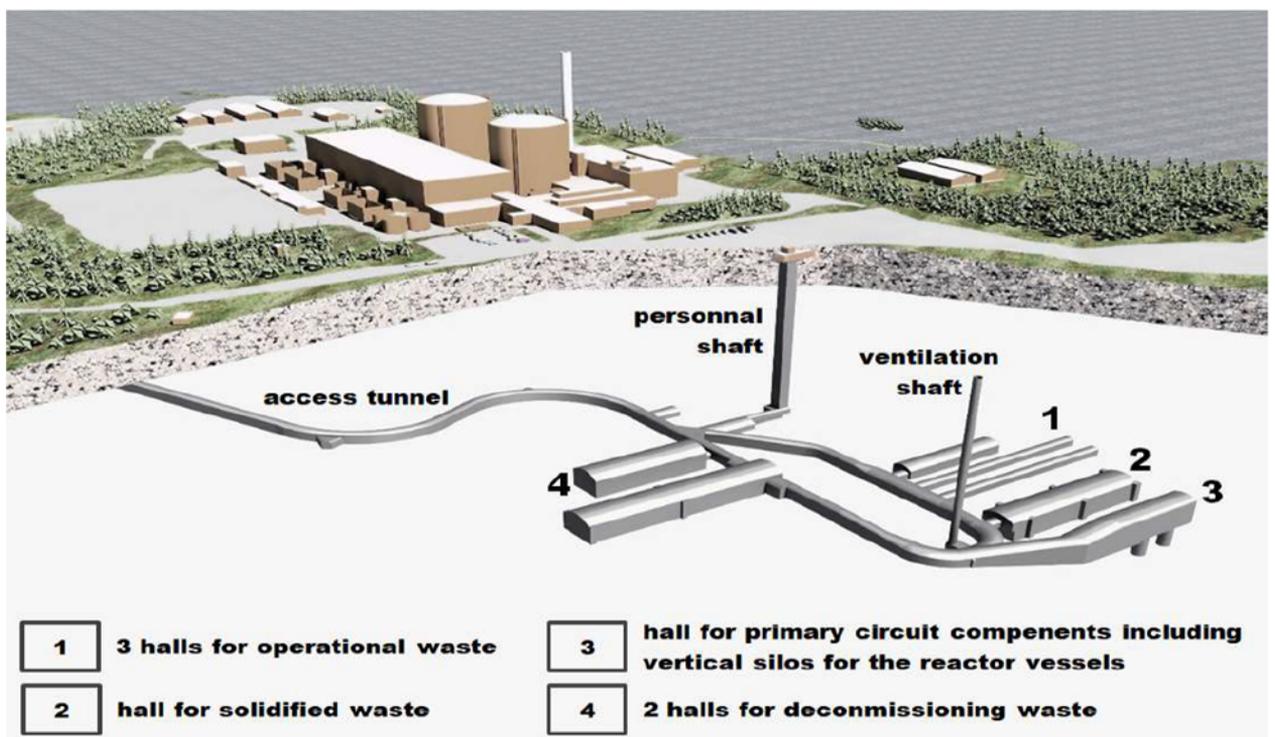
Fokus: Lagerung mittlerer Tiefe am Beispiel Loviisa, Finnland

In Finnland wurde 1993 am Standort des Kernkraftwerks in Loviisa mit dem Bau eines Endlagers begonnen. Nach der Bauphase und Inbetriebnahme wurden erstmals 1998 radioaktive Abfälle in das Endlager eingelagert (OECD NEA 1999). Es ist für verschiedene Abfalltypen vorgesehen.

Das Endlager entspricht Anlagen der Lagerung mittlerer Tiefe in Form der geologischen Endlagerung und ähnelt im Aufbau dem eines geologischen Tiefenlagers in mittlerer Tiefe. Die Einlagerungsbereiche reichen im kristallinen Wirtsgesteine auf bis zu 110 Metern Tiefe (OECD NEA 1999).

Die Anlagen sind über eine ca. ein Kilometer lange Rampe für den Abfalltransport von der Oberfläche aus zu erreichen und verfügen über weitere zwei Schächte. Während ein Schacht für den Personenverkehr während des Betriebs vorgesehen ist, dient der zweite Schacht der Bewetterung (IAEA 2020b).

Abbildung 15: Schematischer Aufbau des Endlagers am Standort Loviisa, Finnland. Quelle: (IAEA 2020b)



Das Endlager weist mehrere Einlagerungstunnel mit Betongewölben für LILW-SL-Abfälle auf. Diese Stollen sind etwa 110 Meter lang, sechs Meter breit und fünf Meter hoch. Ein solche Einlagerungstunnel fasst rund 1.200 m³ (oder ~6.000 Stück 200-Liter-Fässer) der LILW-SL-Abfälle, welche in den Tunneln gestapelt werden (OECD NEA 1999). Die Einlagerungstunnel für LILW-SL-Abfälle werden nicht nach der Einlagerung verfüllt. Die Wände der Gewölbetunnel sind jedoch mit technischen Barrieren sowie Entwässerungseinrichtungen versehen. Bisher verfügen die Anlagen über eine Aufnahmekapazität von knapp 2.500 m³ an Abfällen. Eine Erweiterung der Anlagen mit weiteren Einlagerungstunneln ist jedoch bereits in Planung und soll weiteren Platz für ~6.500 m³ an Abfällen bieten (IAEA 2020b).

Darüber hinaus verfügt das Endlager über eine Kaverne für LILW-LL-Abfälle. Die Kaverne misst etwa 70 Meter in der Länge und ist etwa 14 Meter breit und 11 Meter hoch. Die Abfallgebinde werden in einem grabenartigen Stahlbetongewölbe eingelagert. Das Gewölbe bietet Platz für etwa 5.000 m³ an Abfällen in speziell angefertigten zylindrischen Überbehältern. Die Zwischenräume werden nach und nach mit Beton verfüllt und die Kaverne vollständig versetzt und verschlossen. Die maximale Dosisleistung ist auf 0,1 mSv/a für die ersten 10.000 Jahre festgelegt (IAEA 2020b). Das Sicherheitskonzept und das Multibarrierensystem ist mit dem der Anlagen in Slowenien zu vergleichen. Teil des Konzepts des langfristigen sicheren Einschlusses und Isolation der radioaktiven Abfälle von Mensch und Umwelt ist eine 200 jährige Überwachungs- und Kontrollphase vorgesehen.

Der Verschluss ist für das Ende der 2060er Jahre antizipiert. Die Kosten für die Errichtung, den Betrieb und den Verschluss des Endlagers werden auf 100 Mio. Euro geschätzt (IAEA 2020b).

Fokus: Kombilager LILW-Abfälle am Beispiel Olkiluoto, Finnland

In Finnland befindet sich das sogenannte VLJ¹⁰-Endlager für LILW-Abfälle am Kernkraftwerksstandort auf der Halbinsel Olkiluoto. Das Endlager ist im Besitz der Kernkraftwerksbetreiber und wird seit dem Jahr 1992 betrieben. Die Bauphase und Inbetriebnahme dauerte etwa fünf Jahre (OECD NEA 1999).

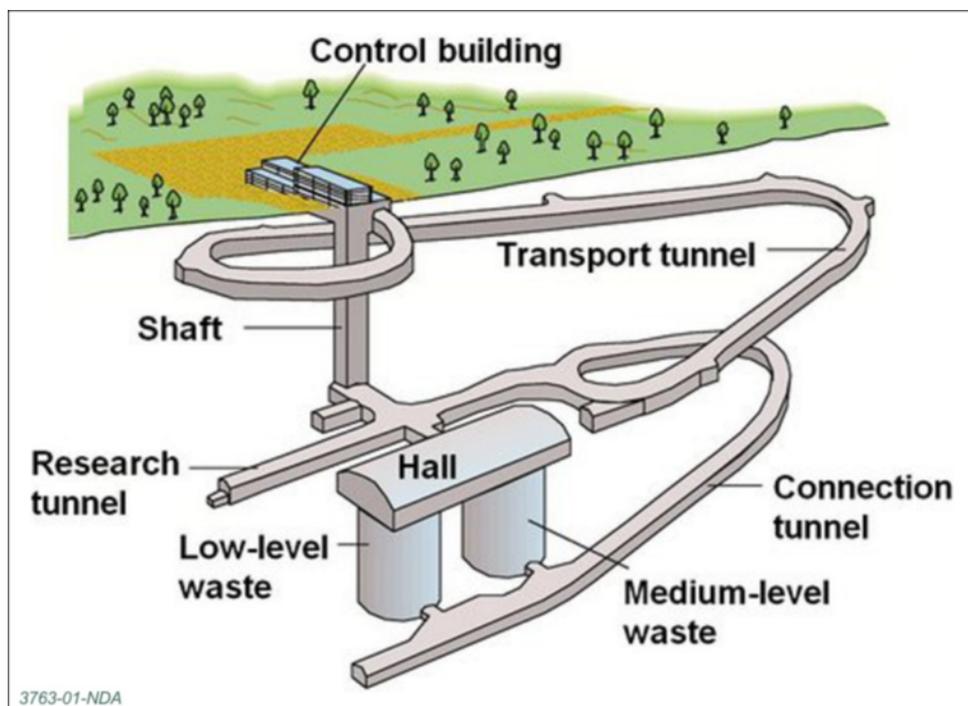
Die Anlagen entsprechen der Lagerung mittlerer Tiefe in Form eines geologischen Endlagers und ähneln denen eines geologischen Tiefenlagers in mittlerer Tiefe. Das Endlager befindet

¹⁰ Finnische Kurzform für voimalaitosjäteluola, wörtlich „Kraftwerksabfallhöhle“

sich zwischen 60 und 100 Metern Tiefe im kristallinen Wirtsgestein (Äikäs und Anttila 2008). Das Sicherheitskonzept der Silos und das Multibarrierensystem ist mit dem Beispiel Slowenien zu vergleichen (IAEA 2020b).

Die Anlagen sind über eine ca. ein Kilometer lange Rampe und einen Zugangsschacht für den Personenverkehr zu erreichen (Abbildung 22). Die Einlagerungsbereiche bilden zwei getrennte Silos, einer für LILW-SL- und ein anderer für LILW-LL-Abfälle (NDA 2017). Beide Silos haben einen Durchmesser von etwa 24 Metern und sind ca. 34 Meter hoch. Die Silos sind sowohl von der Basis als auch von oben zu erreichen. Es besteht die Möglichkeit, die Anlagen durch den Bau weiterer Silos zu vergrößern (OECD NEA 1999). Bisher verfügen die beiden Silos über Kapazitäten von knapp 5.000 m³ LILW-SL Abfällen und knapp 3.500 m³ LILW-LL-Abfällen (Äikäs und Anttila 2008). Während die LILW-SL-Abfälle in den 200-Liter-Fässern ohne Überbehälter in das Silos eingelagert werden, werden LILW-LL-Abfälle ebenfalls in 200-Liter-Fässern zusätzlich in Stahlbetonüberbehältern eingebracht und in den Silos gestapelt (IAEA 2020b).

Abbildung 16: Schematische Darstellung des LILW-Endlagers am Standort Olkiluoto in Finnland. Quelle: (NDA 2017)



Die Einlagerung und der Betrieb sollen bis ca. 2068 abgeschlossen sein. Die zu erwartenden Kosten orientieren sich an denen des Beispiels der Anlagen am Standort Loviisa in Finnland (IAEA 2020b).

Fokus: Kombilager LILW-Abfälle am Beispiel WLDC, Südkorea

In Südkorea wird von der koreanischen Agentur für radioaktive Abfälle (KORAD) seit 2015 das Endlager Wolsong LILW Diposal Centre (WLDC, Abbildung 17) für LILW-Abfälle in Form der Lagerung mittlerer Tiefe betrieben (IAEA 2020a).

Abbildung 17: Schematischer Aufbau des WLDC-Endlagers für LILW-Abfälle in Südkorea.
Quelle: (Chul-Hyung Kang 2014)



Im Jahr 2007 begann die KORAD mit der ersten Bauphase zur Errichtung von sechs unterirdischen Silos zur Endlagerung von LILW. Die Einlagerung wurde 2014 genehmigt und seit 2015 betrieben. In einer zweiten Bauphase sollen zusätzliche Anlagen zur

Lagerung mittlerer Tiefe für LLW gebaut werden (Abbildung 17, near surface disposal facility). Für deren Bau läuft zurzeit das Genehmigungsverfahren (IAEA 2020a). In einer dritten Bauphase soll eine als near surface trench (oberflächennahe Grabenanlage) bezeichnete Anlage für VLLW-Abfälle errichtet werden. Die folgende Darstellung konzentriert sich auf das LILW-Endlager.

Südkorea unterscheidet in ihrer Abfallklassifizierung der LILW-Abfälle nicht zwischen SL- und LL-Anteilen. Dementsprechend ist das Tiefenlager auf beide Abfallarten und somit auch Halbwertszeiten von mehr als 30 Jahren ausgelegt. Als Abgrenzung zwischen LILW und HLW wird die Wärmeentwicklung des Abfalls herangezogen. So dürfen die LILW-Abfälle maximal 2 kW/m^3 an Wärme entwickeln (OECD NEA 1999), ein Grenzwert, der auch in anderen Ländern herangezogen wird (z. B. Kanada, Ungarn, Estland, Lettland).

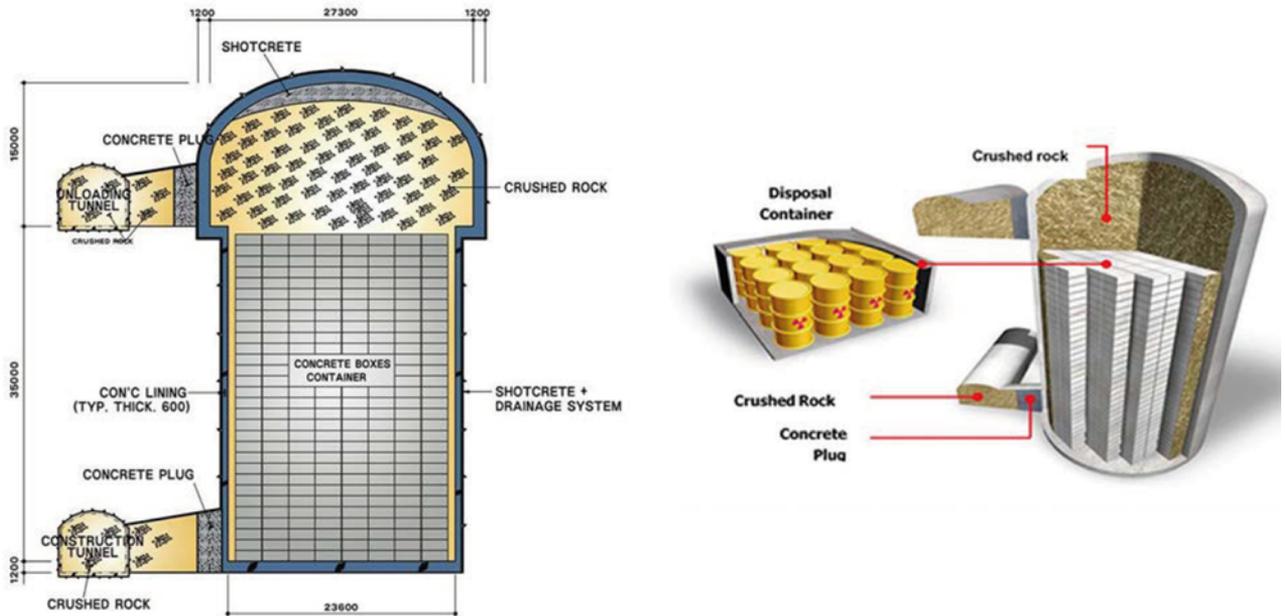
Das Endlager entspricht dem Aufbau eines geologischen Tiefenlagers in mittleren Tiefen. Der Einlagerungsbereich liegt in 150 – 200 Meter unter Geländeoberkante (Garamszeghy 2021). Das Wirtsgestein ist Granodiorit und zählt zu den plutonischen Gesteinen. Beispielsweise nach der Definition der BGE in Deutschland werden Granodiorite zum Wirtsgestein Kristallin gezählt¹¹.

Die Oberflächenanlagen weisen Hallen für die Abfallannahme, die Inspektion und Lagerung von Abfällen, Gebäude für die Abfallhandhabung, ein Hauptkontrollzentrum und Werkstätten zur Wartung der Betriebsanlagen sowie ein Besucherzentrum auf (IAEA 2020a).

Die sechs Silos befinden sich in einer Tiefe von 80 – 130 Metern Tiefe. Jedes Silos hat eine Gesamthöhe von 50 Metern und einen Durchmesser von 25 Metern (Abbildung 18). Der Bau und Betrieb erfolgt über ein paralleles Tunnelsystem. Die Bautunnel ermöglichen den Zugang zur Basis der Silos, während ein oberer Betriebstunnel für die Einlagerung der Abfälle vorgesehen ist. Das Endlager verfügt außerdem über einen vertikalen Schacht für den Personenverkehr und die Bewetterung.

¹¹ <https://www.bge.de/de/endlagersuche/meldungen-und-pressemitteilungen/archiv/meldung/news/2020/7/468-endlagersuche/>

Abbildung 18: Schematischer Aufbau der Betonsilos zur Einlagerung der LIWL-Abfälle am WLDC, Südkorea. Quelle: (Chul-Hyung Kang 2014)



Vor der Einlagerung werden die 200- und 320-Liter-Fässer ebenfalls in Betonüberbehälter eingegossen. KORAD sieht vor bis zu 800.000 solcher Abfallgebilde im WLDC zu entsorgen. Die Stahlbetonüberbehälter fassen entweder 16 oder neun Abfallgebilde. Jedes Silo kann ungefähr 1000 solcher Behälter aufnehmen. Bisher umfasst das Tiefenlager sechs Silos, jedes mit einer Kapazität von 16.000 Stück 200-Liter-Fässern und insgesamt 20.000 m³ an LILW-Abfällen. Die KORAD plant mit 100.000 Gebinden pro Silo (IAEA 2020a). Die Silos werden nach der Einlagerung vollständig verfüllt. Danach werden auch die Zugangstunnel verfüllt und verschlossen.

Das Multibarrierensystem ergänzt mit technischen Barrieren die natürliche Barriere des Standorts und übernimmt so den sicheren Einschluss und die Isolation der radioaktiven Abfälle zum Schutz von Mensch und Umwelt. Zu den technischen Barrieren gehören das behandelte Abfallgebilde, der Entsorgungsbehälter, das Verfüllmaterial und das Betonsilo. Nach dem Verschluss soll eine langfristige passive Sicherheit erreicht werden (IAEA 2020a).

Allein der Bau der Anlage bis zum Betrieb im Jahr 2014 wird umgerechnet auf bis zu 1,4 Mrd. Euro beziffert¹². Über Kosten der Betriebsphase und der Stilllegung liegen keine Informationen vor (OECD NEA 1999).

Fokus: Wirtsgestein Kristallin und Einlagerungskonzept am Beispiel Ungarn

Ungarn betreibt seit 2012 sein geologisches Tiefenlager NRWR Bataapáti¹³ für LILW-SL-Abfälle (Garamszeghy 2021). Das Endlager besteht aus horizontalen Kavernen im kristallinen Grundgebirge (OECD NEA 1999), hier Granit. Der Endlagerbereich befindet sich in Tiefen von etwa 250 Metern unter der Erdoberfläche und ist über eine Rampe zu erreichen. Die Kavernen sind etwa 10,6 Meter breit, 8,7 Meter hoch und bis zu 100 Meter lang. Insgesamt beinhaltet das Endlager 17 solcher Kavernen und soll so bis zu 125.000 Abfallgebinde aufnehmen (rund 25.000 m³ vor Verpackung in die Überbehälter). Der Großteil der LILW-Abfälle ist in 200-Liter-Fässern verfestigt und wird in Überbehältern (2,25 m x 2,25 m x 1,55 m) – ähnlich der sogenannten „Monolith Type I–III“-Stahlbetonüberbehälter in Belgien – einbetoniert. Die Überbehälter werden in den Kavernen gestapelt. In eine Kaverne passen so rund 817 Überbehälter oder an die 7.353 Stück 200-Liter-Fässer (ca. 1.470 m³). Die Zwischenräume werden mit Beton verfüllt und verschlossen. Die Einlagerung soll bis zum Jahr 2084 abgeschlossen sein (OECD NEA 1999).

Die Kosten für die Planung (etwa 15 Jahre), Bau und Betrieb der Anlage belaufen sich bislang auf über 280 Mio. Euro¹⁴. Die kleinen Mengen an LILW-LL-Abfällen werden voraussichtlich separat entsorgt werden müssen, da das Endlager für diese Abfälle keinen sicheren Einschluss und die Isolation der radioaktiven Abfälle von Mensch und Umwelt gewährleistet (OECD NEA 1999).

3.2.3 Vor- und Nachteile der Lagerung mittlerer Tiefe

Im Folgenden werden die Vor- und Nachteile der Lagerung mittlerer Tiefe dargestellt. Der Fokus wird dabei auf die Endlagerung von LILW-Abfällen gelegt. Was die Vor- und Nachteile

¹² <https://www.world-nuclear-news.org/WR-First-waste-disposal-at-Korean-repository-1407154.html>

¹³ Für mehr Informationen: <https://www.youtube.com/watch?v=BGUDtSPECYA>

¹⁴ <https://world-nuclear-news.org/Articles/Hungarian-repository-receives-first-waste>

im Einzelnen für die Entsorgung radioaktiver Abfälle in Österreich bedeuten, folgt in der vergleichenden Bewertung der Optionen in Kapitel 4.

Vorteile:

- **Einschluss und Isolation:** Der Einschluss und die Isolation der Lagerung mittlerer Tiefe für LILW-SL-Abfälle ist potentiell mit sehr gut einzuschätzen. Für LILW-SL-Abfälle ist anzunehmen, dass Anlagen der Oberflächennahen Entsorgung einen ausreichenden Einschluss bieten können. Für LILW-LL-Abfälle hängt das Sicherheitskonzept maßgeblich von der Barrierenwirksamkeit des umgebenen Wirtsgesteins und dessen Tiefe ab. Es ist anzunehmen, dass tiefere Anlagen der geologischen Endlagerung für Einschluss und Isolation nötig sind. Zudem ergänzen geotechnische Barrieren das Sicherheitskonzept, um eine langfristige passive Sicherheit zu gewährleisten. Dadurch würde auch die Notwendigkeit einer institutionellen Kontrolle und Überwachung, welche bei der oberflächennahen Entsorgung von Nöten ist, abnehmen oder wegfallen.
- **Technische Machbarkeit:** Auf Basis von bereits weit entwickelten Endlagerkonzepten und der Expertise aus bereits vorhandenen Anlagen kann die technische Machbarkeit für LILW-SL-Abfälle als gegeben eingestuft werden. Nach ersten Einschätzungen ist anzunehmen, dass auch eine Unterbringung von LILW-LL-Abfällen umsetzbar wäre. Eine pauschale Machbarkeit lässt sich jedoch ohne standortspezifischen Nachweis der Langzeitsicherheit nicht bestätigen. Konkrete Umsetzungen stehen auch bei den internationalen Beispielen noch aus. Dennoch befinden sich in einigen Ländern Projekte zur Lagerung mittlerer Tiefe als geologische Endlagerung in der Konzeption. Auf Grund der Ähnlichkeit der Anlagen zu sich bereits in Planung, Errichtung und Betrieb befindenden geologischen Tiefenlagern (siehe Kapitel 3.3) schätzen wir die technische Machbarkeit als vorteilhaft ein.
- **Zeitbedarfe:** Die Zeitbedarfe für Anlagen der Lagerung mittlerer Tiefe hängen ebenso vom zugrundeliegenden Sicherheitskonzept, der Tiefe der Anlagen und den einzulagernden Abfällen ab. Es ist anzunehmen, dass für die Planung und Errichtung sowie den Betrieb von Anlagen zur Oberflächen Lagerung unter Anforderungen einer geologischen Endlagerung, wie sie für die Entsorgung von LILW-LL-Abfällen nötig wäre ggf. einige wenige Jahrzehnte eingeplant werden müssen. Dabei müssen auch Auswirkungen der langen Zeitbedarfe auf die Zwischenlagerung der radioaktiven Abfälle berücksichtigt werden. Bei Anlagen der Lagerung mittlerer Tiefe für LILW-SL-

Abfälle würden aufgrund der geringeren sicherheitstechnischen Anforderungen die Zeitbedarfe geringer ausfallen.

- **Charakterisierung des Standorts:** Die Eignung eines Standortes muss mit standortspezifischen übertägigen und ggf. untertägigen Erkundungsmaßnahmen untersucht werden. Der Standort ist anhand regulatorisch festgelegter Kriterien zu bewerten. Ein entsprechendes Verfahren ist dafür erforderlich, darüber hinaus aufwendig, aber möglich. Ein Vorteil ist, dass die Erkundungen keine sehr großen Tiefen von vielen hunderten Metern abdecken müssen.
- **Abfallflexibilität:** Die Möglichkeit, mehrere Kategorien radioaktiver Abfälle aufzunehmen, basiert auf dem jeweiligen Sicherheitskonzept. Es ist anzunehmen, dass Anlagen der Lagerung mittlerer Tiefe, bei denen das Sicherheitskonzept auf der geologischen Endlagerung in entsprechenden Tiefen, ausreichender Wirksamkeit des Multibarrierensystems und langfristiger passiver Sicherheit fußen, auch für die Einlagerung von LILW-LL-Abfällen ausgelegt sein können.
- **Aufnahmekapazität:** Abhängig von den geologischen Gegebenheiten können in Anlagen der Lagerung mittlerer Tiefe große Mengen an radioaktiven Abfällen eingelagert werden.
- **Oberflächenanlagen:** Art und Flächenbedarf von Oberflächenanlagen der Lagerung mittlerer Tiefe sind abhängig von der Ausgestaltung des Entsorgungskonzeptes. Bei der Variante der Oberflächennahen Entsorgung muss für die Oberflächenanlagen der Lagerung mittlerer Tiefe eventuell nicht auf die Errichtung bergwerksbetrieblicher Infrastruktur zurückgegriffen werden. Bei Oberflächenanlagen der Lagerung mittlerer Tiefe, die dem Prinzip der geologischen Endlagerung entsprechen und im Aufbau dem von geologischen Tiefenlagern gleichen, sind jedoch ähnliche bergwerksbetriebliche Oberflächenanlagen zu erwarten, können aber auf Grund der geringeren Tiefe der Anlagen weniger umfangreich und aufwendig ausfallen. Die Möglichkeit zum Rückbau der Anlagen nach der Stilllegung besteht, muss aber beim Sicherheitskonzept mitbedacht werden.
- **Kosten:** Bei der Lagerung mittlerer Tiefe hängen die Kosten vor allem von der Tiefe der Anlagen, dem Sicherheitskonzept sowie den Wirtsgesteinen ab. Tendenziell gilt: Je tiefer die Lagerung mittlerer Tiefe, desto technisch anspruchsvoller, aufwendiger und

kostspieliger. An dieser Stelle gibt es daher Unsicherheiten bezüglich der aufzubringenden Kosten.

- **F&E-Bedarfe:** Die Forschung und Entwicklung ist sowohl bezüglich der oberflächennahen Entsorgung als auch der geologischen Endlagerung weit fortgeschritten. Es kann auf die Expertise und die Erfahrungen zahlreicher anderer Staaten zurückgegriffen und kooperiert werden. Viele Aspekte der technischen Sicherheit, wie z. B. Behälter- und Barrierenkonzepte sind bereits sehr gut ausgearbeitet. Zusätzlich ist für den jeweiligen Standort ein Sicherheitskonzept zu entwickeln, das auch standortspezifischer Forschung bedarf.

Nachteile:

- **Rückholbarkeit und Bergung:** Es ist anzunehmen, dass die Rückholung der Abfälle vor dem Ende des Betriebs und dem Verschluss der Anlagen gegeben ist. Mit dem Fortschritt der Stilllegung steigt der Aufwand. Je nach Tiefe muss nach Abschluss der Stilllegung für eine Bergung der Abfälle erneut ein Bergwerk aufgeföhren werden. Konzeptionell sind Rückholung und Bergung aus der Lagerung mittlerer Tiefe über lange Zeit möglich, aber mit steigendem Aufwand verbunden.

3.3 Endlagerung in geologischen Tiefenlagern

3.3.1 Technische Beschreibung

Begrifflichkeiten

International wird von der geologischen Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen gesprochen. Die Endlagerung der radioaktiven Abfälle erfolgt in sogenannten geologischen End- oder Tiefenlagern. Beide Begriffe beziehen sich auf die langfristige Entsorgung radioaktiver Abfälle, bei der die sichere Endlagerung durch langfristige passive Sicherheit erreicht werden soll. Laut IAEA besteht bei der Errichtung geologischer Endlager keine Absicht der Rückholung der Abfälle. Dennoch wird eine mögliche Rückholbarkeit der Abfälle nicht ausgeschlossen (IAEA 2011b). Im Gegensatz dazu ist nach IAEA ein geologisches Tiefenlager baulich darauf ausgerichtet, dass die radioaktiven Abfälle gegebenenfalls wieder aus dem Lagerbergwerk rückgeholt werden können (Kreusch et al. 2019). Daher

ist bei geologischen Tiefenlagern ein auf eine mögliche Rückholung der Abfälle ausgerichtetes Monitoring vorgesehen.

Trotz dieser formalen Unterscheidung in den Definitionen der IAEA ist festzustellen, dass sich eine „nationale Praxis“ entwickelt hat, entweder den einen oder den anderen Begriff (vorrangig) zu verwenden. Auch welches Konzept jeweils damit definiert wird, ist nicht einheitlich. Zudem zielt dieses Kapitel darauf ab, die geologischen Tiefenlager von den Anlagen der Lagerung mittlerer Tiefe abzugrenzen (siehe Kapitel 3.2, Lagerung mittlerer Tiefe). Auf Grund dieser Tatsachen und der in Österreich verwendeten Begrifflichkeit z. B. im Nationalen Entsorgungsprogramm (BMK 2022) wird im weiteren Dokument der Begriff „geologisches Tiefenlager“ bzw. „Endlager in tiefen geologischen Formationen“ für die generische Beschreibungen verwendet und nicht näher differenziert. Bei internationalen Beispielen wird ggf. der im jeweiligen Land geläufige Begriff verwendet.

Endlagertypen

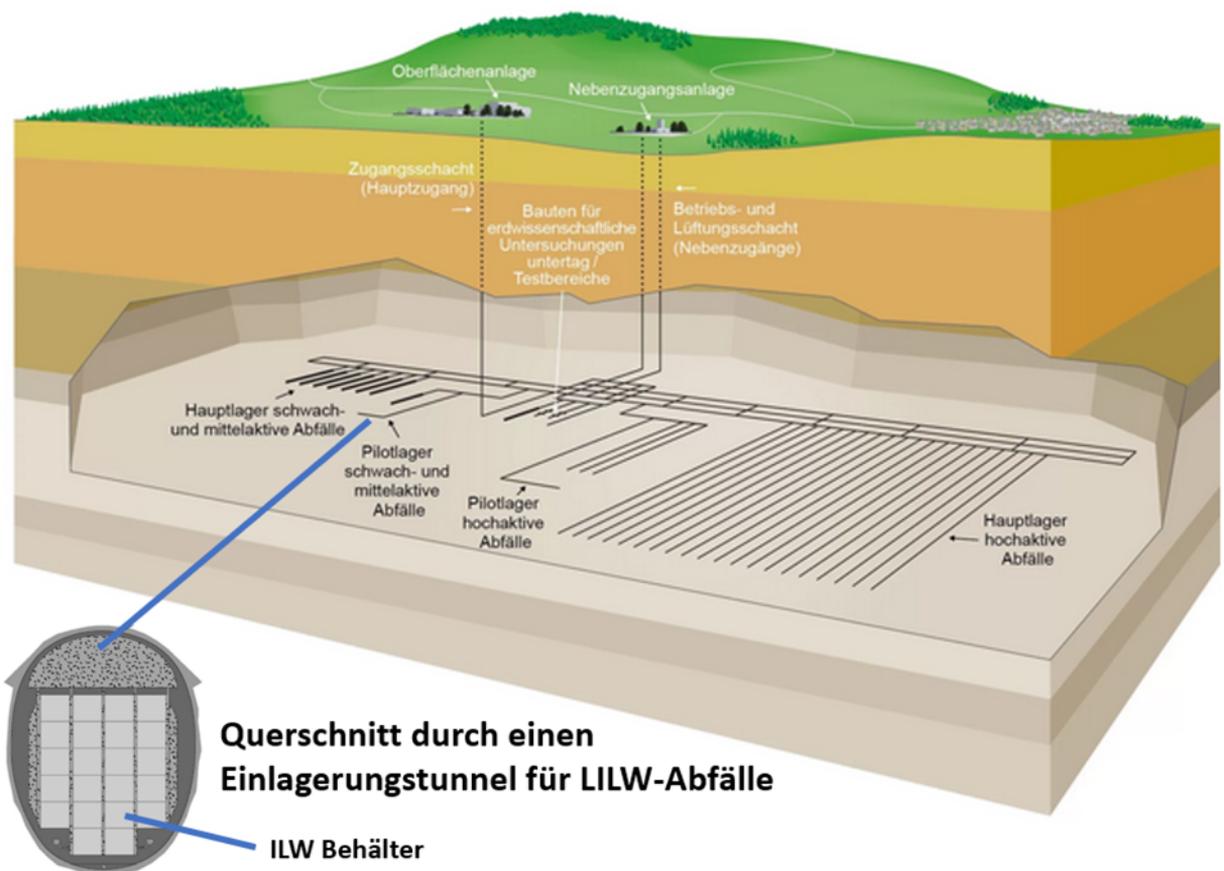
Geologische Tiefenlager sind gestaltete Endlageranlagen in tiefen geologischen Formationen. Daneben sind auch geologische Endlager in mittleren Tiefen (< 300 m, siehe Kapitel 3.2, Lagerung mittlerer Tiefe) möglich. Hinsichtlich der Endlagertiefen verlaufen die Übergänge jedoch meist fließend (IAEA 2011b).

Konzepte für Tiefenlager sind für verschiedene Abfalltypen weit entwickelt bzw. werden in zahlreichen Staaten bereits umgesetzt. In Abbildung 19 ist beispielhaft das Tiefenlagerkonzept der Schweiz dargestellt, ein geplantes Kombilager, in dem ein Bereich für HLW- und ein Bereich für LILW-Abfälle vorgesehen wird. Die Mehrzahl der Endlagerkonzepte in tiefen geologischen Formationen wurden für HLW-Abfälle entwickelt. Dafür wird ein Bergwerk in Tiefen von mindestens 300 Metern bis 1.000 Metern aufgefahren (ENSI 2021).

Insbesondere für LILW-Abfälle werden auch ehemalige Gewinnungsbergwerke nach entsprechender Umplanung und Umbau als geologische Endlager in tiefen geologischen Formationen verwendet. Beispiele finden sich in Deutschland, Tschechien, Rumänien oder der Slowakei (Garamszeghy 2021). Je nach früherer Nutzung und den örtlichen Gegebenheiten können solche stillgelegten Bergwerke, wie z. B. das in Deutschland geplante LILW-Endlager Konrad, auch tiefer als 1.000 Meter unter der Erdoberfläche liegen (BGE 2018). Auf das ehemalige und zukünftige Endlagerbergwerk Konrad wird bei den Internationalen Beispielen von geologischen Tiefenlagern näher eingegangen. Die erste generische Bewertung schließt in den Ausführungen zu den Vor- und Nachteilen von Endlagern in geologischen Tiefenlagern

Aspekte der stillgelegten Gewinnungsbergwerke als mögliche Endlager mit ein. Der Fokus der folgenden technischen Beschreibung liegt jedoch auf den gestalteten Anlagen der Tiefenlager.

Abbildung 19: Schematisches Modell des Schweizer Tiefenlagers der Nagra. Quelle: verändert nach (Nagra 2023)



Abfallarten

Tiefe und Geologie bieten ein hohes Potenzial für den sicheren Einschluss und die langfristige Isolierung der Abfälle. Deshalb werden für HLW-Abfälle meist geologische Tiefenlager geplant. Projekte dieser Art sind in den letzten Jahren weit fortgeschritten (IAEA 2020a). Beispiele für fortgeschrittene HLW-Endlagerprojekte sind Schweden, Finnland, die Schweiz und Frankreich.

Einige dieser Staaten verfolgen zudem die Option, zusätzlich ihre LILW Abfälle am gleichen Standort in einer kombinierten Anlage zu entsorgen (IAEA 2020b). Das Konzept des sicheren Einschlusses kann für Abfälle mit geringerem radioaktivem Inventar leichter erreicht werden, insbesondere da die erforderlichen Nachweiszeiträume erheblich geringer sind als bei HLW. Bei kombinierten Anlagen ist allerdings auf eine bauliche Trennung zu achten, um eine gegenseitige ungünstige Beeinflussung der Abfallarten zu vermeiden. Auch bei einer kombinierten Lagerung von kurz- und langlebigen LILW-Abfällen kann eine bauliche Trennung von Einlagerungsbereichen bspw. mit Blick auf eine mögliche Rückholung bzw. Bergung sinnvoll sein.

Für LILW-SL-Abfälle ist eine geologische Endlagerung in Tiefenlagern ebenfalls möglich. In vielen Ländern werden hierfür aufgrund des relativ kurzen erforderlichen Isolationszeitraums (ca. 300 – 500 Jahre) und den dem gegenüberstehenden Aufwand für die Errichtung des Bergwerks eher andere Optionen gewählt. Dies liegt allerdings auch an den typischerweise sehr großen Mengen von LILW-SL-Abfällen (in der Größenordnung von einigen hunderttausend Kubikmetern), die in Staaten mit umfangreichen Atomenergieprogrammen bei der Dekommissionierung anfallen, so dass vergleichsweise große Einlagerungshohlräume bzw. strecken aufgeföhren werden müssten.

Errichtung, Betrieb und Verschluss

Der Aufbau eines geologischen Endlagers gleicht im Wesentlichen dem eines Bergwerks und hat zusätzlich die anlagentechnischen Erfordernisse aus dem Strahlenschutz zu berücksichtigen. Der Zugang zum Endlager erfolgt entweder über einen Schacht, eine Rampe oder über Tunnel. Im Bergwerk selbst wird ein Streckennetz aufgeföhren, das die Einlagerungshohlräume und die Infrastruktur untertage erschließt. Die erforderliche Infrastruktur umfasst beispielsweise Rangierflächen, Werkstätten, Flächen für die Bewetterung, Stromversorgung, Brandschutz usw. Einlagerungshohlräume für LILW-Abfälle sind nach bisherigen Konzepten Strecken oder größere Kammern mit einem abhängig vom Wirtsgestein ausgeführtem Ausbau (z. B. betonierte Hohlräume). Die Endlagergebände werden in den Einlagerungshohlraum eingebracht und anschließend mit Versatzmaterialien, wie Tonmaterialien (z. B. Bentonit) und/oder Material auf Zementbasis verfüllt und somit dicht eingeschlossen (ENSI 2021). Nach Völlfüllung des gesamten Einlagerungshohlraums wird er mit einem Verschlussbauwerk verschlossen.

Neben den untertägigen Bauwerken sind bei geologischen Endlagern auch korrespondierende Anlagen an der Oberfläche erforderlich. Dazu gehören die Förderanlagen für die

Zugangsschächte, Anlagen für den Bau und den Betrieb des Untertagebergwerks, Flächen für Materialströme wie Aushub oder Baumaterial, Infrastrukturanlagen für Bewetterung, Brandschutz usw. sowie Sozialbauwerke und ggf. ein Besucherzentrum. Weitere Anlagen dienen speziell der nuklearen Entsorgung wie der Anlieferung und der Annahme der radioaktiven Abfälle. Dazu gehören auch Werkstätten, Labore für den Strahlenschutz und das Umweltmonitoring sowie Bürogebäude für administrative Aufgaben. Abhängig vom Entsorgungskonzept kann die Konditionierung und Verpackung des radioaktiven Abfalls in Endlagerbehälter entweder am Ort des Anfalls oder am Ort der Zwischenlagerung oder am Endlagerstandort erfolgen. Im letzten Fall müssen zusätzliche Anlagen für Konditionierung, Verpackung und Betonverfüllung vorgesehen werden. Die Mehrzahl der Konzepte im internationalen Kontext sieht vor, dass LILW-Abfälle in ihren Primärabfallgebinden – in aller Regel 200-Liter-Fässer – in Endlagerbehälter eingebracht und anschließend die Hohlräume des Behälters mit Beton vergossen werden.

Mit der Stilllegung des Endlagers werden Untertage alle Infrastrukturhohlräume und die Zugangsbauwerke verfüllt und verschlossen. Die Anlagen an der Oberfläche werden ebenfalls rückgebaut, dabei werden die Anlagen zur Behandlung der radioaktiven Abfälle als erstes nicht mehr benötigt. Je nach Endlagerkonzept bleiben lediglich die erforderlichen Anlagen zum Monitoring längerfristig bestehen.

Die Kosten für die Planung, Errichtung, den Betrieb und den Verschluss von geologischer Endlagerung, welche für die Endlagerung von LILW-LL- und/oder HLW-Abfällen geeignet sind, liegen je nach Tiefe des Tiefenlagers und der Größe des Inventars in der Größenordnung von mehreren Milliarden Euro (IAEA 2020b). Diese Aussage bezieht sich jedoch auf Endlagerungsprojekte denen größere nationale Atomenergieprogramme zu Grunde liegen.

Die Zeitbedarfe hängen maßgeblich von der Ausgestaltung der Standortauswahl und des Entscheidungsprogrammes ab. Generell kann mit Zeitbedarfen von mehreren Jahren bis zu einigen Jahrzehnten gerechnet werden (IAEA 2011b). Für die Betriebsphase können Zeiträume von wenigen bis mehreren Dutzenden Jahren angenommen werden (Garamszeghy 2021).

Sicherheitskonzept

Das Sicherheitskonzept des Endlagers in tiefen geologischen Formationen beruht vor allem auf dem Zusammenspiel der sich ergänzenden technischen und natürlichen Barrieren (Multibarrierensystem) (IAEA 2011b). Sie bewirken passiv den langfristigen Einschluss der

Abfälle, wobei sie den Einschluss nur gemeinsam sicherstellen (IAEA 2020a). Die Ausgestaltung der Barrieren variiert in Abhängigkeit vom definierten Endlagerkonzept, der geologischen Umgebung und dem erforderlichen Zeitrahmen für ihre Wirksamkeit (IAEA 2020a).

Als erste Barriere gilt in aller Regel die Abfallmatrix, d. h. die Einbindung des Abfalls meist in Beton. Eine weitere Barriere stellt das Endlagergebäude dar, bestehend aus dem konditionierten Abfallprodukt und dem Endlagerbehälter. Es gibt unterschiedliche Endlagerbehältertypen, die abhängig von der Abfallart und der erforderlichen Barrierewirkung eingesetzt werden, ggf. müssen für HLW-Abfälle spezielle geeignete Behälter auch noch entwickelt werden. Die Endlagerbehälter dienen aber auch der sicheren Handhabung bei Transport- und Einlagerungsprozessen.

Weitere Barrieren stellen die Verfüllung und die Verschlussbauwerke der Einlagerungshohlräume sowie des gesamten Bergwerks dar. Das Material für die Verfüllung und Abdichtung ist im Allgemeinen Bentonit¹⁵ oder Zementmörtel (ENSI 2021). Insbesondere muss die dichte Verfüllung des Zugangs den sicheren Einschluss gewährleisten. Die maßgebliche und langfristig wirksame Barriere ist das umgebende Wirtsgestein.

Das Verfüllen und Verschießen des Endlagers müssen nicht unmittelbar nach Abschluss der Einlagerung erfolgen. Bei Endlagern, bei denen eine Beobachtungsphase und Monitoring der Einlagerung vorgesehen wird, erfolgt die Verfüllung der Infrastruktur des Endlagers erst zu einem späteren Zeitpunkt (Beispiel Schweiz (ENSI 2021)). In diesem Fall könnte bei einer Fehlentwicklung des Endlagers eine Rückholung umgesetzt werden. Es bedeutet dann aber auch die Notwendigkeit einer aktiven institutionellen Überwachung des Endlagers einschließlich der dafür erforderlichen Infrastruktur und Ressourcen. Auch ist der Einschluss während der Zeiträume ohne das Verfüllen und Verschießen des Endlagers nicht in gleichem Umfang sichergestellt wie nach dem Verfüllen und Verschießen. Müssen die eingelagerten Abfälle nach dem Verschluss des Endlagers geborgen werden, ist das Auffahren eines Bergungsbergwerks erforderlich.

Wirtsgestein

Das Wirtsgestein ist die maßgebliche Barriere für das Endlager in geologischen Formationen, da sie den langfristigen Einschluss sicherstellt. Im Allgemeinen zählen Steinsalz,

¹⁵ Unter Bentonit versteht man ein natürlich vorkommendes Tongestein, welches aus unterschiedlichen Tonmineralen (Dreischichtsilikate) aufgebaut ist und daher eine sehr gute Quellfähigkeit aufweist.

Tonstein und kristalline Gesteine, wie Granite oder Metamorphite zu den gängigen Wirtsgesteinen (Falck und Nilsson 2009). In den USA ist der Nachweis der Langzeitsicherheit für HLW-Abfälle in einem Endlager in vulkanischem Tuffgestein (Yucca Mountain) als Wirtsgesteine nicht gelungen (USDOE 2012). Dabei weisen alle Wirtsgesteine jeweils Vor- und Nachteile für die langfristige Lagerung radioaktiver Abfälle auf. Entsprechend ist das Zusammenwirken von Wirtsgestein und Lagerkonzept maßgeblich.

Zum Beispiel verfügen Tonsteine und tonige Sedimentformationen über einen hohen Anteil an Tonmineralien, die zu ihrer geringen Durchlässigkeit und ihrem hohen Rückhaltevermögen beitragen. Die Wirtsgesteine können unterschiedliche Verdichtungsgrade und mechanische Eigenschaften aufweisen. Für ein geologisches Endlager kommen verschiedene Tonformationen in Frage. Beispielsweise untersuchen Deutschland und die Schweiz für ihre HLW- bzw. Kombilager stark verdichteten Tonstein (BGE 2020b; Nagra 2019), während z. B. in Belgien auf weichere Sedimentformationen (tonige Sedimente) gesetzt wird und in Frankreich harter, leicht metamorpher Tonstein (Argillit) in Frage kommt. In anderen Endlagerkonzepten wurden auch Siltstein und Tonschiefer betrachtet.

Finnland und Schweden haben sich bei ihren HLW-Endlagern jeweils für das kristalline Grundgebirge entschieden (SKB 1995). Gesteine des Grundgebirges bestehen in Form von alten Schilden (fennoskandisches Schild) oder in Deutschland die Gesteine des Variszikums, wie z. B. die der Böhmisches Masse oder des Erzgebirges. Dabei zählen je nach Definition Plutonite, wie Granite und Granodiorite und Metamorphite, wie z. B. Gneise zu den kristallinen Wirtsgesteinen. Die Definition kann je nach Land auch aufgrund des jeweiligen Auftretens der Wirtsgesteine variieren. Z. B. setzten die Tschechische Republik und das Vereinigte Königreich verstärkt auf Metamorphite.

Vorteil des kristallinen Wirtsgesteins sind die physischen und mechanischen Eigenschaften. Sie weisen hohe Stabilität und Festigkeit und in gewissen Tiefen ab 500 Metern eine geringe Durchlässigkeit auf. Der Stofftransport beschränkt sich auf die Transportwege entlang von Störungen, Brüchen und Klüften. Dies hat wiederum starke Auswirkungen auf die Auslegung des Endlagerkonzepts. Es ist davon auszugehen, dass durch den advektiven Transport¹⁶ von Radionukliden, die aus den technischen Barrieren in das fraktionierte Gestein freigesetzt

¹⁶ Unter advektivem Transport versteht man in der Hydrologie und Geologie den Stofftransport eines im Grundwasser gelösten oder suspendierten Stoffes.

werden, die Rückhaltung der Radionuklide nur begrenzt gewährleistet werden kann (IAEA 2020a).

In Deutschland wird auch Steinsalz als Wirtsgestein betrachtet (BGE 2020a). In Deutschland treten Salzgesteinsformationen vertikal in Form von Salzstöcken und horizontal geschichtet, wie im Thüringischen Becken auf. Steinsalz verfügt bspw. über eine sehr gute Wärmeleitfähigkeit¹⁷ und die Eigenschaft, dass Brüche und Klüfte im Salz schnell wieder verheilen. Dafür sind vor allem Salzstöcke für ihre heterogenen Strukturen bekannt, die die Gesteinscharakterisierung erschweren.

Letztendlich hängt die Entscheidung für ein Wirtsgestein davon ab, welche Wirtsgesteine zur Verfügung stehen. Anforderungen zur Charakterisierung der Qualität eines Wirtsgesteins sind für jede geologische Formation zu formulieren. Daran ist die Eignung als Endlagerstandort zu bewerten. Eine Anforderung ist beispielsweise eine ausreichende Mächtigkeit der Wirtsgesteinsformation, da sie zum sicheren Einschluss der Radionuklide beiträgt. Die Mächtigkeit ist besonders bei horizontal geschichteten Sedimentgesteinen wichtig, da eine einigermaßen homogene Formation wünschenswert ist, welche bei mächtigeren Schichten wahrscheinlicher anzutreffen ist. Daher ist ebenso auf die Homogenität und Struktur der geologischen Formation zu achten. Je günstiger die Eigenschaften der Wirtsgesteinsformation, um so einfacher ist die Gesteinscharakterisierung und -analyse und die Darstellung der Langzeitsicherheit. Planung und die Errichtung des Endlagers werden vereinfacht und Unsicherheiten minimiert (IAEA 2020a).

Neben Mächtigkeit und Homogenität sind Anforderungen an die langfristige Stabilität wichtig. Dazu gehört, dass die geologische Formation weitestgehend tektonisch stabil ist und keine aktiven Störungen aufweist. Ebenso sollte sie nicht von seismischer Aktivität oder Vulkanismus betroffen sein. In der Zukunft werden Klimafolgeschäden, wie beispielsweise verstärkte Erosion und Starkwetterereignisse sowie Überschwemmungen zu berücksichtigen sein, vor denen ein Endlager geschützt werden sollte. Mit dem Ziel, die HLW-Abfälle für mehrere Hunderttausende von Jahren zu isolieren, müssen auch Vergletscherungen und neue Eiszeiten und deren Folgen wie tief einschneidende Erosion mitgedacht werden (IAEA 2020a). Inwiefern solche Prozesse bei der Charakterisierung des Standorts für die Entsorgung von LILW-Abfällen mitberücksichtigt werden, hängt maßgeblich von den jeweiligen

¹⁷ Die Wärmeleitfähigkeit ist ausschließlich bei wärmeentwickelnden Abfällen von großer Wichtigkeit.

standortspezifischen geologischen Bedingungen in der Kombination mit dem Isolationszeitraum von LILW-LL-Abfällen von einigen bis mehreren Tausenden Jahren ab.

Für die Abschirmung der Abfälle und Rückhaltung der Radionuklide sind darüber hinaus hydrogeologische Eigenschaften, wie die geringe hydraulische Leitfähigkeit des Wirtsgesteins sowie ein geringer Grundwasserfluss durch diese und die umliegenden Formationen von großer Wichtigkeit. Darüber hinaus sind geochemisch reduzierende Bedingungen im Wirtsgestein von Vorteil, da sie die Korrosion der technischen Barrieren und die Löslichkeit der Radionuklide minimieren sowie zu erhöhter Sorptionsfähigkeit der geologischen Formationen beitragen (IAEA 2020a).

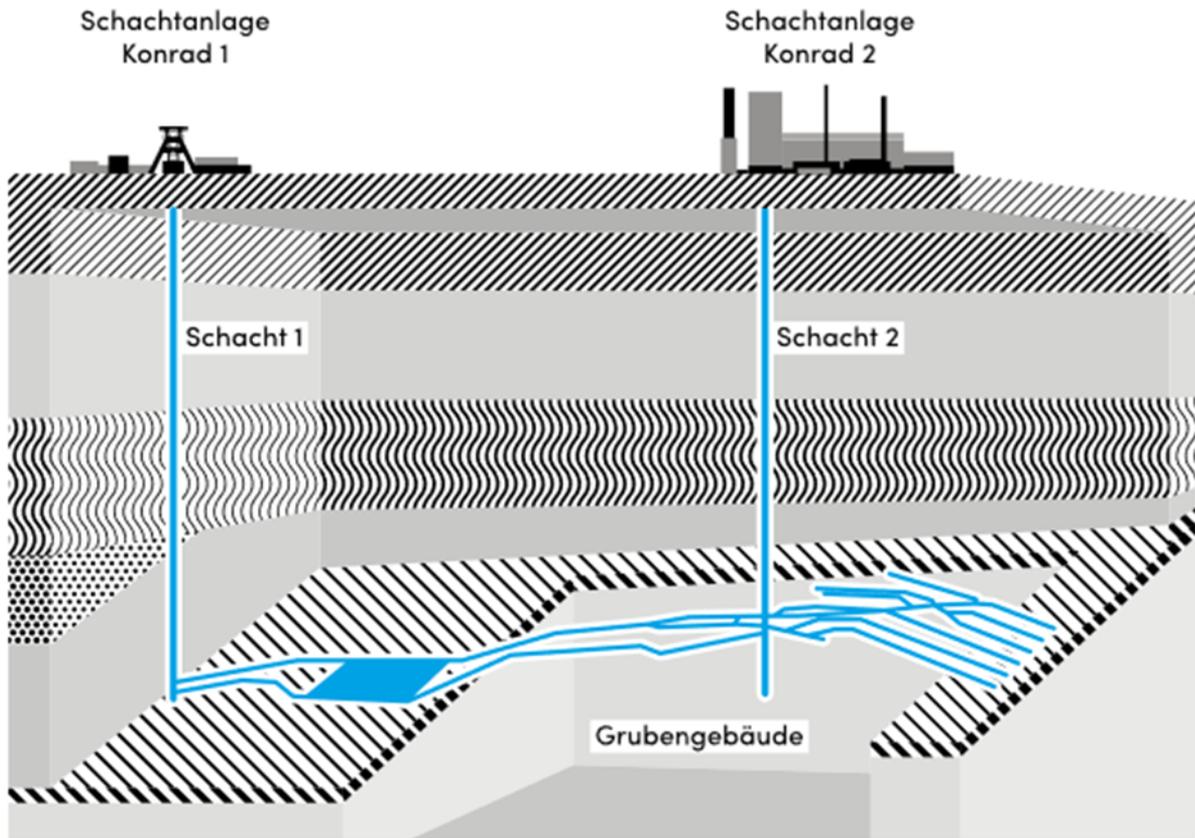
3.3.2 Internationale Beispiele von geologischen Tiefenlagern

Im Folgenden werden internationale Beispiele geologischer Tiefenlager vorgestellt. Die Beispiele entsprechen dabei Anlagen, welche sowohl in Gewinnungsbergwerken eingebracht sind als vor allem auch in eigens für die geologische Endlagerung konzipierte geologischen Tiefenlager. Im internationalen Vergleich sind geologische Tiefenlager meist für die Entsorgung von HLW-Abfällen vorgesehen. Im Fokus stehen auch hier technische Merkmale, wie z. B. die Konzeption der Anlagen, das Einlagerungskonzept, die einlagerbaren Arten und Mengen (pro Gewölbeeinheit) an radioaktiven Abfällen und die Wirtsgesteine, welche die Beispiele für die österreichische Entsorgungssituation interessant und passend erscheinen lassen. Darüber hinaus wurde sich ebenso auf Beispiele fokussiert, welche die Option einer kombinierten Endlagerung bei der Konzeption mitdenken.

Fokus: Gewinnungsbergwerk am Beispiel Deutschland

Das ehemalige Eisenerzbergwerk Konrad (Abbildung 20) wird in der Bundesrepublik Deutschland von der Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE) zum nach Atomrecht genehmigten Endlager für schwach- und mittelradioaktive Abfälle umgebaut. Die Bundesrepublik Deutschland unterscheidet bei ihrer Klassifizierung der radioaktiven Abfälle in nicht wärmeentwickelnde Abfälle (vergleichbar LILW) und wärmeentwickelnde Abfälle (HLW). Nicht wärmeentwickelnden Abfälle, also auch solche mit langlebigen Radionukliden – ähnlich der LILW-LL-Abfälle - sollen in der Schachtanlage Konrad endgelagert werden (BGE 2018). Insgesamt plant die BGE 303.000 m³ schwach- und mittelradioaktive Abfälle hier zu entsorgen.

Abbildung 20: Schematische Darstellung des Grubengebäudes des Endlagers Konrad in Deutschland. Quelle: (BGE 2018)



Das Wirtsgestein des Endlagers Konrad ist Kalkstein mit niedriger Permeabilität, welcher durch die umliegenden Tonsteinformationen isoliert ist (IAEA 2020a). Unter anderem überlagert eine etwa 400 Meter mächtige dicke und wasserundurchlässige Tonsteinschicht den Einlagerungsbereich und unterbindet somit eine hydraulisch wirksame Verbindung zum oberflächennahen Grundwasser. Sie bildet die geologische Barriere zur Isolation der radioaktiven Abfälle von der Biosphäre.

Für das Endlager werden nicht die Strecken und Kammern des Eisenerzbergwerks genutzt, stattdessen werden in einem eigenen Einlagerungsbereich in 800 m bis 1.300 m Tiefe Kammern aufgeföhren (Abbildung 21). Jede der Kammern ist ca. sieben Meter breit, ca. sechs Meter hoch und ungefähr 1.000 Meter lang. In diese werden die fertigen Endlagergebände eingebracht. Im Rahmen des Planfeststellungsbeschlusses wurden Maße, Eigenschaften und Materialien mehrerer Arten Endlagerbehälter genau festgelegt, um ihre spätere Handhabung zu gewährleisten. Entsprechend werden sie u. a. als Konrad-Container bezeichnet.

Die Abfälle werden in 50 Meter langen Abschnitten gestapelt. Die Abschnitte werden anschließend mit Beton versetzt und verschlossen. Es ist vorgesehen, dass das gesamte Streckennetz unter Tage sowie die Schachtanlagen nach der Einlagerung der Abfälle verfüllt werden (IAEA 2020a). Eine Rückholung und ein darauf ausgerichtetes Monitoring sind nicht vorgesehen.

Nach aktuellen Schätzungen belaufen sich die Gesamtkosten von Planung, Umbau, Betrieb und Verschluss auf bis zu 4,2 Mrd. Euro (BGE 2023).

Der Umbau des ehemaligen Gewinnungsbergwerk zu einem Endlager stellt sich als komplexe Aufgabe heraus. Entsprechend musste der Zeitplan bis zur Fertigstellung mehrfach angepasst werden. Zuletzt teilte die BGE im Juni 2023 mit, dass der angestrebte Fertigstellungstermin 2027 nicht mehr zu halten ist und um zwei Jahre verschoben werden muss (BGE 13.06.2023). Die Umrüstung erfolgt bereits seit 2008. Ursprünglich war die Fertigstellung für das Jahr 2013 erwartet worden.

Abbildung 21: Darstellung der Abfallgebinde in den Einlagerungskammern in der Streckenlagerung. Quelle: <https://www.bge.de/de/konrad/>

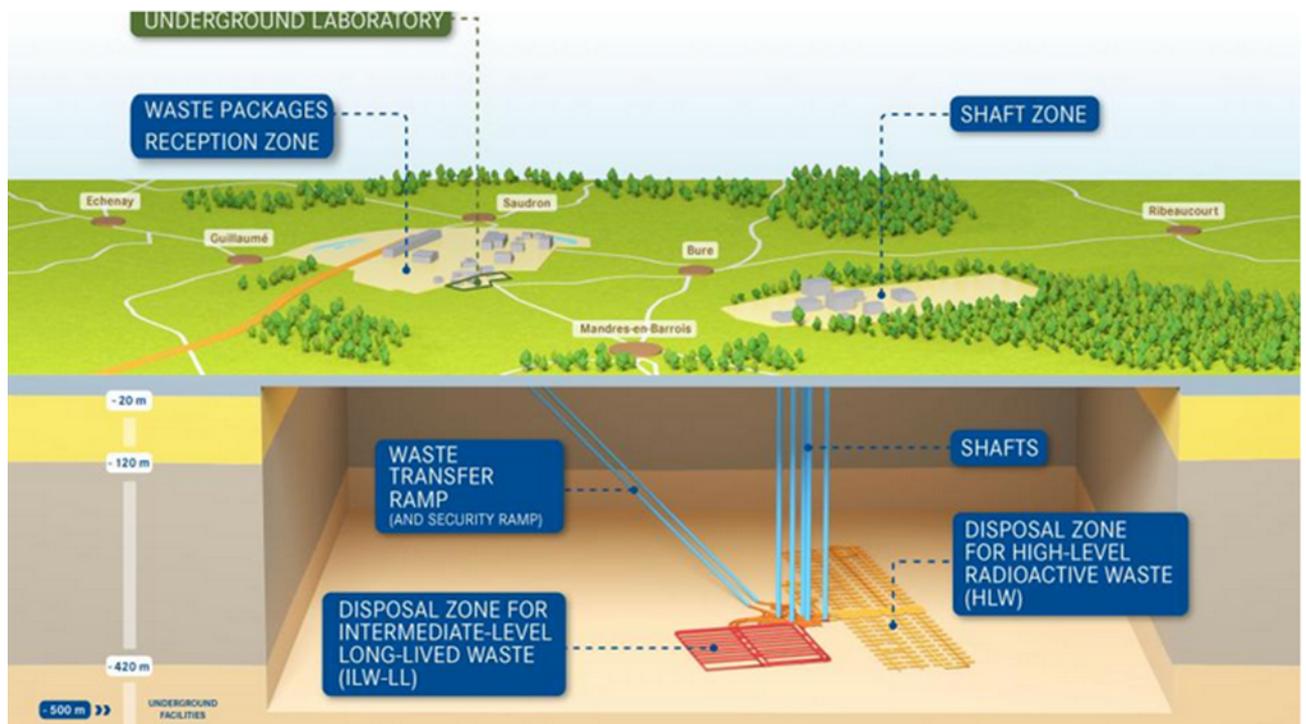


Fokus: Wirtsgestein Tonstein und Kombilager am Beispiel Frankreich

In Frankreich wurde Anfang 2023 der Bauantrag für das geologische Tiefenlager „Cigéo“ (Centre industriel de stockage géologique) der Andra zur Prüfung eingereicht (Abbildung 22). Das Tiefenlager soll in einer etwa 140 Meter mächtigen Schicht in Tonsteinformationen in Tiefen von etwa 500 Metern gebaut werden und ist so geplant, dass sowohl HLW- als auch LILW-LL-Abfälle dort untergebracht werden können. Die Andra strebt an, etwa 10.000 m³ an HLW- und 75.000 m³ an LILW-LL-Abfällen in Cigéo einzulagern (ANDRA 2020).

Die Erschließung des Endlagers erfolgt über Schächte, über die später Material- und Personaltransporte durchgeführt werden. Die Einlagerung der radioaktiven Abfälle erfolgt über separate Zugangsrampen (Abbildung 22). Die Endlagerbereiche für die HLW- und LILW-LL-Abfälle befinden sich in getrennten Erschließungsfeldern.

Abbildung 22: Schematische Darstellung des geologischen Tiefenlagers „Cigéo“ für HLW und LILW-LL Abfälle in Frankreich. Quelle: (ANDRA 2020)



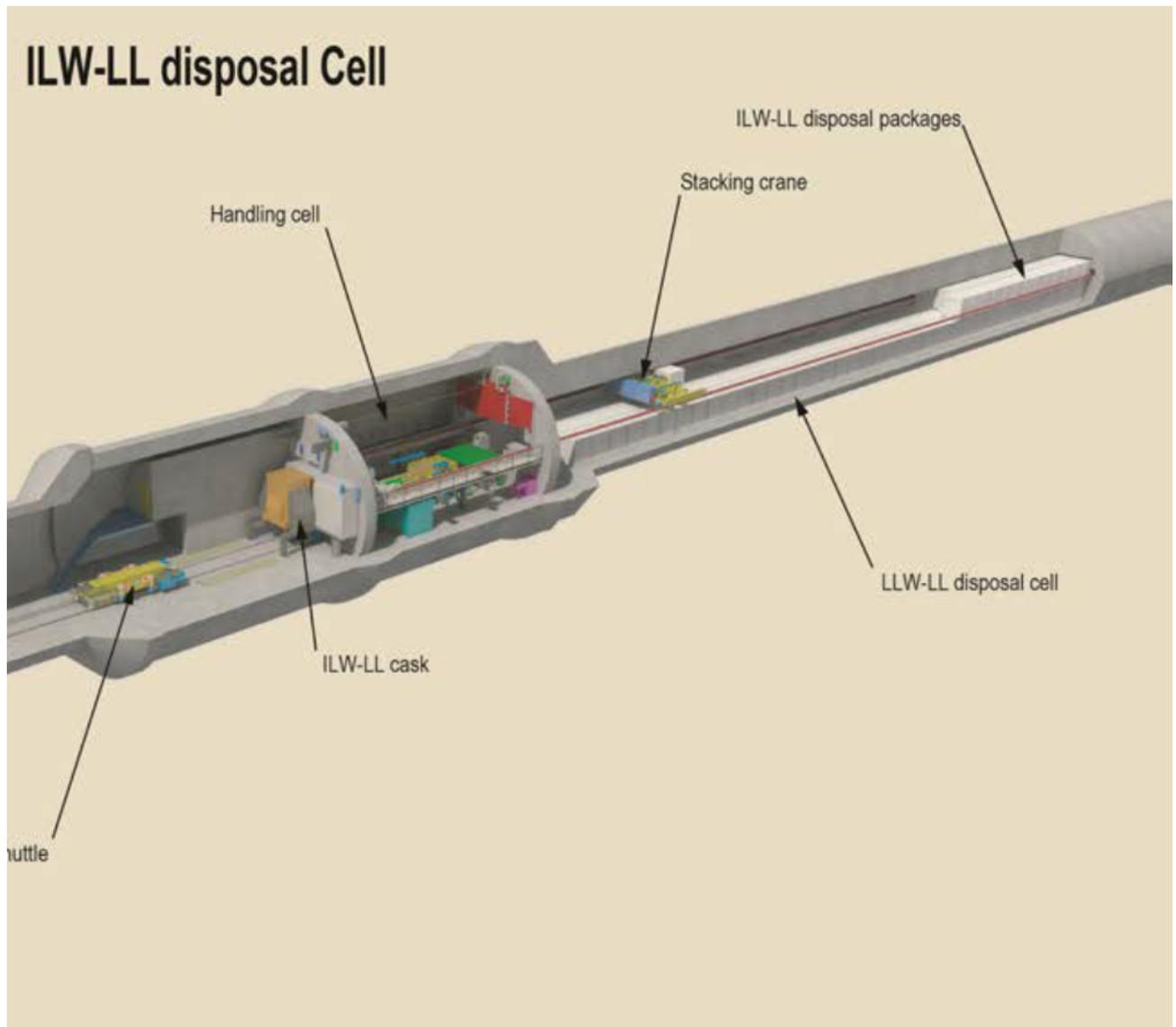
Die LILW-LL-Abfälle werden in Einlagerungskammern (disposal cell) untergebracht (Abbildung 22) Diese tunnelartigen Gewölbe sind zwischen 400 und 500 Metern lang, haben einen

Durchmesser von etwa zehn Metern und werden durch eine Zugangsstrecke erschlossen, über die die Einlagerung durch einen fernhantierten Kran vorgenommen wird.

Es ist vorgesehen durch bauliche Maßnahmen eine Rückholbarkeit zu gewährleisten (ANDRA 2020). Die Einlagerungszellen werden aber nach der Einlagerung verschlossen und verfüllt. Wenn das Endlager stillgelegt wird, werden die Strecken sowie Rampen und Schächte vollständig versetzt und versiegelt. Abschließend werden die Oberflächenanlagen zurückgebaut (IAEA 2020a).

In Frankreich begann die Endlagersuche 1991 mit einer ersten Gesetzgebung, infolgedessen die Andra den Auftrag für die Erforschung der geologischen Endlagerung in einem Untertagegelabor erhielt. Die Forschungsarbeiten kamen bis 2005 zu dem Ergebnis, dass die geologische Endlagerung in einem Tiefenlager möglich sei. Von der erneuten Gesetzgebung über ein Endlager für HLW-Abfälle im Jahr 2006 dauerte es ungefähr sechs Jahre bis zur ersten Projektskizze der Andra. Mit der Einreichung des Bauantrags 2023 wartet die Andra nun auf die Baubewilligung durch die französische Atomaufsichtsbehörde. Sofern diese die Baugenehmigung erteilt, strebt die Andra an, für den Zeitraum 2035 – 2040 an eine Betriebsgenehmigung zu erhalten (BASE 18.01.2023). Den Verschluss und die Stilllegung des Endlagers sieht die Andra für etwa das Jahr 2150 vor (ANDRA 2020). Insgesamt gibt die Andra für das Gesamtprojekt „Cigéo“ zu erwartenden Kosten in Höhe von 25 Milliarden Euro an.

Abbildung 23: Modell eines LILW-LL-Abfälle Einlagerungstunnels im geologischen Tiefenlager „Cigéo“ in Frankreich. Quelle: (IAEA 2020a)



Das Projekt wird momentan von der Andra auf 25 Mrd. Euro geschätzt, schließt aber das gesamte Endlager für HLW- und LILW-LL-Abfälle mit ein.

Fokus: Wirtsgestein Tonstein und Kombilager am Beispiel Schweiz

In der Schweiz plant die Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra), ihr Tiefenlager in geologischen Formationen des Opalinuston in Tiefen von etwa 800 Metern zu bauen (Abbildung 19). Opalinuston zählt zu den meist homogenen, nur moderat plastischen und härteren Tonsteinen mit sehr geringer Durchlässigkeit und guten geochemisch reduzierenden Eigenschaften. Das aktuelle Konzept der Nagra sieht ein

Kombilager für HLW- und LILW-Abfälle in separaten Anlagenteilen am selben Standort vor (Nagra 2022b). Der Zugang und die Oberflächenanlagen sollen für beide Tiefenlagerteile genutzt werden. Dabei werden die Anlagen für Konditionierung und Verpackung am Standort des Zwischenlagers Zwiilag und nicht am Endlagerstandort errichtet. Gemäß dem Schweizer Konzept ist eine Beobachtungsphase nach der Einlagerung und die Rückholbarkeit bis zum Verschluss des Tiefenlagers zu gewährleisten (BFE 2011).

Angedachte Konzepte für die Endlagerung von LILW-Abfällen beinhalten die Einbringung der verfestigten Abfälle in 200-Liter-Fässern, welche mit Beton in Endlagerüberbehältern vergossen werden (Nagra 2022a). Diese Behälter werden anschließend in Einlagerungstunneln gestapelt und bilden nach der Versiegelung dadurch direkt in den Tonstein eingelassene Betongewölbe (Abbildung 24, (Nagra 2022b)). Das Wirtsgestein bildet auch hier die wichtigste Barriere des Multibarrierenkonzeptes (Nagra 2022b).

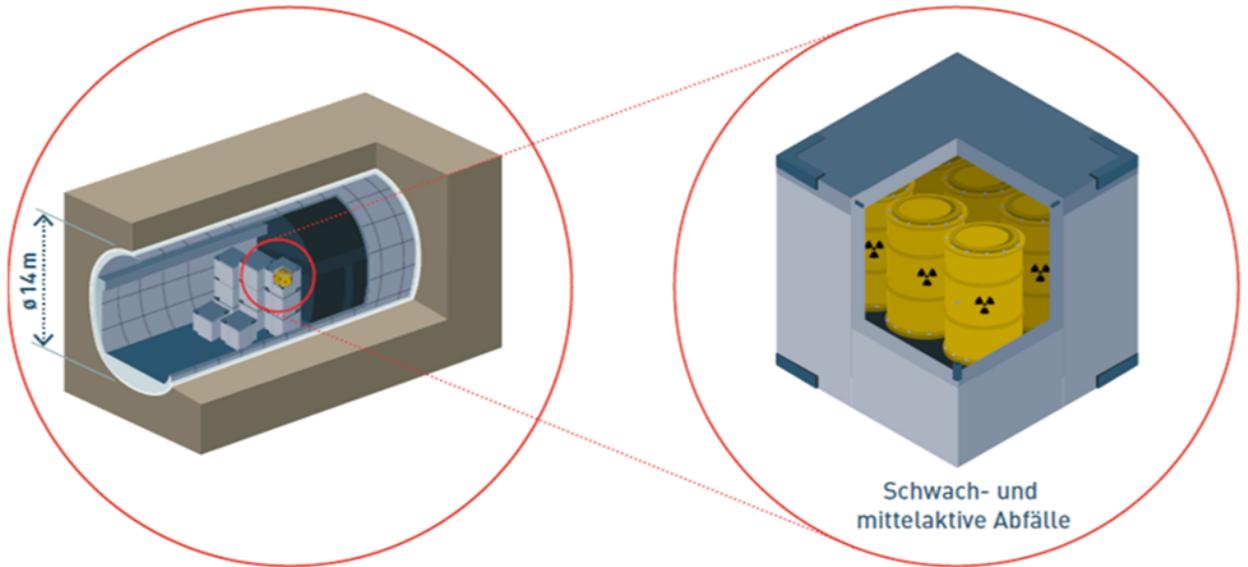
Die Entscheidung für den Standort wurde im Rahmen eines mehrstufigen Entscheidungsprozesses getroffen, der im Jahr 2008 gestartet wurde (BFE 2011). Der Entscheidungsvorschlag der Nagra für den Standort wurde 2022 veröffentlicht (Nagra 2022b; 2022a). Im nächsten Schritt wird das Rahmenbewilligungsverfahren vorbereitet, die erste von drei Genehmigungen, die bis zur Inbetriebnahme des Endlagers erforderlich werden. Die Inbetriebnahme des Endlagerteils für LILW-Abfälle soll 2050 erfolgen¹⁸ und die für den HLW-Endlagerteil 10 Jahre später.

(Nagra 2018) gibt für die Mengen an LILW-Abfällen für ein Endlager (SMA-Lager inklusive SA-Abfälle¹⁹) insgesamt in verpacktem Zustand ein Volumen von 71.379 m³ an und kalkuliert für ein LILW-Endlager mögliche Kosten von etwa 4,2 Mrd. Euro.

¹⁸ Siehe dazu <https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/versorgung/kernenergie/radioaktive-abfaelle/sachplan-geologische-tiefenlager.html>

¹⁹ In der Schweiz werden die radioaktiven Abfälle in schwach- und mittelradioaktive (SMA) und schwachradioaktive (SA) Abfälle klassifiziert und entsprechen der LILW Klassifizierung der IAEA (IAEA 2020a).

Abbildung 24: Behälter- und Einlagerungskonzept der Nagra für LILW-Abfälle. Quelle: (Nagra 2022b)



Fokus: Wirtsgestein sedimentärer Ton und Einlagerungskonzept am Beispiel Belgien

In Belgien plant die für die Zwischen- und Endlagerung zuständige „Organisation Nationale Einrichtung für Radioaktive Abfälle und angereicherte Spaltmaterialien“ ONDRAF/NIRAS, ein Endlager in tonigen Sedimentformationen zu errichten. Eine Standortentscheidung ist noch nicht gefallen. Derzeit wird über einen geeigneten Entscheidungsprozess diskutiert, der auch die Ausgestaltung des Endlagers beinhalten soll. Entsprechend ist das hier vorgestellte Konzept als vorläufig zu betrachten.

Als Wirtsgestein kommen wahrscheinlich tonige Sedimente in Frage. Diese Lockergesteine sind in der Festigkeit nicht mit der von verfestigten Tonsteinen zu vergleichen. Sie sind deutlich plastischer und verfügen über schwächere mechanische Eigenschaften²⁰. Sie weisen aber ebenso eine sehr geringe Permeabilität und niedrige hydraulische Leitfähigkeit auf (IAEA 2020a).

²⁰ Unter mechanischen Eigenschaften versteht man Eigenschaften, wie z. B. die Druck- und Zugfestigkeit sowie die Scherfestigkeit von Gesteinen.

Das Konzept beinhaltet ein Endlager mit separaten Endlagerbereichen für ILW-LL- (Kategorie B -) und HLW (Kategorie C)-Abfälle²¹. Die Abfälle sollen in Tiefen zwischen 200 Metern und 600 Metern in Einlagerungsstollen eingelagert werden. Die ILW-LL-Abfälle sollen in sogenannten Monolith B²² Behältern eingelagert werden (ONDRAF 2012). Die primären LILW-LL-Abfallgebinde – in aller Regel 200-Liter-Fässer – werden dabei mit Mörtel in Betonsenkästen eingegossen und bilden so einen Monolithen (Abbildung 25). Es existieren verschiedenen Designs dieser Monolithen. Der Außendurchmesser beträgt dabei immer 2,80 Meter und die unterschiedlichen Ausgestaltungen machen sich in der Länge der Monolithen bemerkbar. In jeden Monolith können ein bis zwölf 200-Liter-Fässer eingelagert werden (ONDRAF 2012). (van Geet et al. 2019) gehen von etwa 4.400 Monolith B Behältern für die LILW-LL-Abfälle im belgischen Tiefenlager aus.

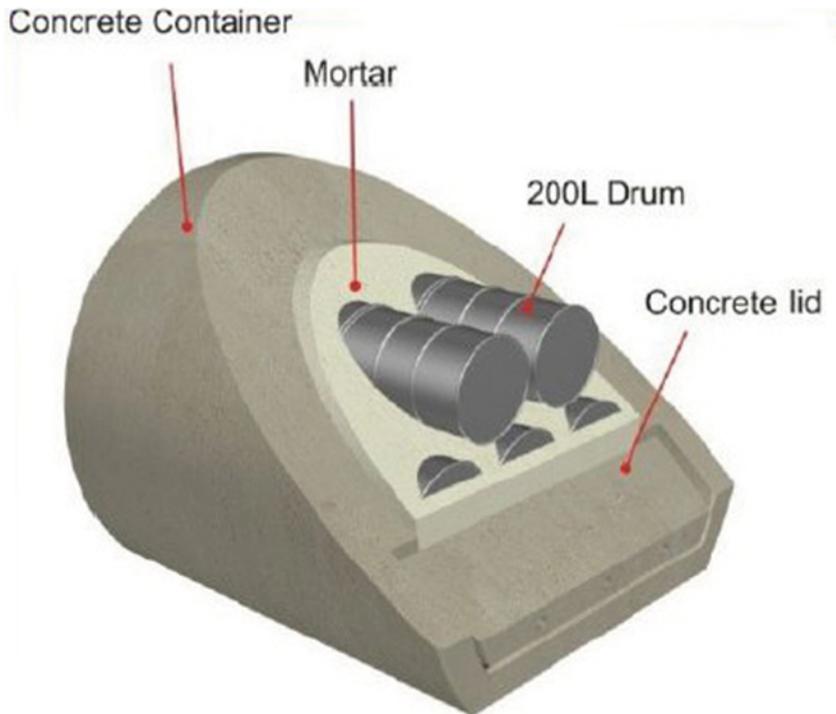
Im Entwurf der ONDRAF/NIRAS wird eine Rückholbarkeit bis zum Ende der Betriebsphase vorgesehen. Während des Betriebes werden die Einlagerungsstollen schrittweise verfüllt und verschlossen. Dies gilt im Rahmen der Stilllegung auch für die Zugangsschächte (ONDRAF 2012).

(van Geet et al. 2019) prognostiziert für das gemeinsame Tiefenlager Kosten in Höhe von 10 Mrd. Euro. Die Betriebsphase kann frühestens 2050 erfolgen und plant eine Betriebsphase von etwa 85 Jahren.

²¹ In Belgien werden die radioaktiven Abfälle in Kategorien unterteilt. Kategorie A entspricht etwa den in Österreich gängigen LILW-SL Abfällen. Kategorie B entspricht etwa LILW-LL-Abfällen und Kategorie C wärmeentwickelnden HLW-Abfällen (ONDRAF 2012). Für Kategorie A-Abfälle ist ein Oberflächenlager vorgesehen.

²² Die Monolith B Behälter sind dabei nicht mit den belgischen Monolith Type I – III Behältern für LILW-SL-Abfälle, auf welche bei der Prognose zu künftigen Abfallmengen in Kapitel 2.2 eingegangen wird, zu verwechseln, basieren aber auf deren Weiterentwicklung und gleichen eher länglichen Betontunnelgewölben.

Abbildung 25: Einlagerungskonzept für LILW-LL-Abfälle im Monolith B Behälter im Tiefenlager in Belgien. Quelle: (ONDRAF 2012)



Fokus: Wirtsgestein Kristallin und Einlagerungskonzept am Beispiel Schweden

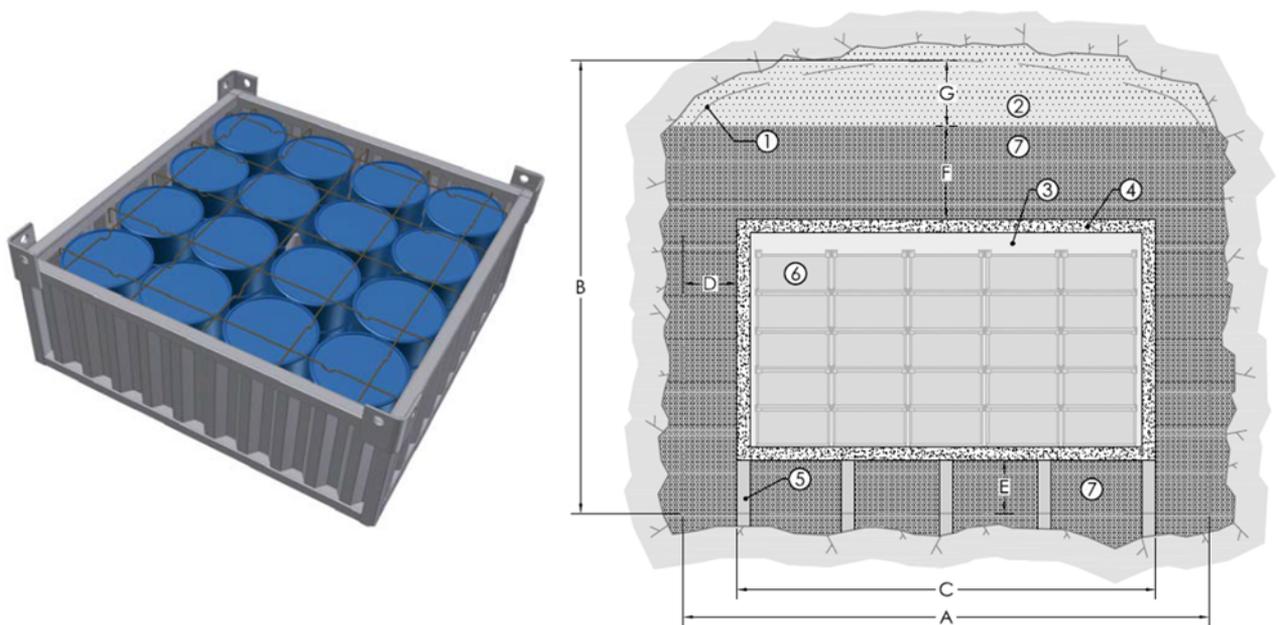
Die Svensk Kärnbränslehantering Aktiebolag (SKB) in Schweden plant neben dem bereits betriebenen oberflächennahen SFR-Endlager für LILW-SL-Abfälle (siehe Kapitel 3.2.2) ein separates Endlager in tiefen geologischen Formationen für LILW-LL-Abfälle, in Schweden als SFL klassifiziert. Für die HLW-Abfälle wurde 2011 ein Genehmigungsantrag für ein separates Endlager in tiefen geologischen Formationen gestellt. Schweden sieht vor, insgesamt rund 16.000 m³ an LILW-LL-Abfällen in Tiefen von 500 Metern im kristallinen Grundgebirge einzulagern (SKB 2013). Das Tiefenlager soll zwei Endlagergewölbe umfassen.

Die Abfälle, welche hauptsächlich in 200-Liter-Fässern einbetoniert sind, werden in Stahlbeton-Überbehälter eingelassen und vergossen (Abbildung 26, links). Danach werden sie je nach Aktivität entweder in Gewölben mit anschließender Betonverfüllung (Concrete Concept) oder in Gewölben mit anschließender Tonmineralenverfüllung (Bentonit) (Clay

Concept, Abbildung 26, rechts) eingelagert. Bezüglich des Sicherheitskonzepts orientiert sich die SKB dabei an ihren Sicherheitsanforderungen für das HLW-Endlager und legt dabei dieselben langfristigen Sicherheitsnachweise zugrunde (SKB 2013).

Momentan befindet sich das SFL-Endlager in der Konzeption. Die SKB strebt an, dass SFL-Endlager bis etwa 2045 zu errichten und sieht eine anschließende Betriebsphase von etwa zehn Jahren bis ca. 2055 vor. Der Verschluss und die Stilllegung des Endlagers ist für spätestens Mitte der 2070er Jahre vorgesehen und mit etwa fünf Jahren veranschlagt. Für das Endlager plant die SKB Kosten für die Planung, Errichtung, Betrieb und Verschluss in Höhe von umgerechnet 175 Mio. Euro ein (SKB 2017).

Abbildung 26: Schematische Darstellung der Abfallbehälter (links) und der Einlagerungstechnik des Tonkonzepts (rechts) in einem Gewölbetunnel für das SFL-Endlager in Schweden. Quelle: (SKB 2013). Links: Stahlbeton-Überbehälter für in 200 Liter Fässern (blau) eingebrachte radioaktive Abfälle. Rechts: Einlagerungstechnik des Tonkonzepts (Clay Concept) in einem Gewölbetunnel: 1: Tunnelwand; 2: Bentonit Pellets; 3: Fugenmasse; 4: Betonstruktur (0,5 m); 5: Granitpfeiler; 6: Abfallüberbehälter (siehe links); 7: Bentonitblöcke. Ungefähre Abmessungen: A = 20 m, B = 17 m, C = 16 m, D = 2 m, E = 2 m, F = 3-4 m, G = 2-3 m.



Fokus: Wirtsgestein Salz am Beispiel der Vereinigten Staaten von Amerika

Das geologische Tiefenlager WIPP (Waste Isolation Pilot Plant) der USA bei Carlsbad, New Mexico ist das aktuell einzige sich in Betrieb befindende Endlager für LILW-LL-Abfälle (Garamszeghy 2021). Das Endlager ist seit 1999 in Betrieb und umfasst rund 90.000 m³ an radioaktiven Abfällen aus militärischer Nutzung, die einer eigenen Klassifizierung folgen²³. Die Anlage befindet sich auf rund 655 Meter Tiefe in einer Salzformation und hat eine Gesamtkapazität für etwa 175.000 m³ an Abfällen. Abfälle mit niedrigerer Aktivität werden in Gewölben eingebracht, wohingegen Abfälle mit höherer Aktivität direkt in horizontalen Bohrlöchern eingelagert werden.

Im Februar 2014 kam es zum Brand im Tiefenlager. In der Folge explodierten Abfallgebäude, es kam zur Freisetzung radioaktiver Stoffe und zur Exposition von Arbeitnehmer:innen. Die genauen Abläufe wurden detailliert untersucht und sind vor allem auf menschliches Versagen zurückzuführen²⁴. Das Beispiel zeigt, dass nicht nur die technische Auslegung sondern auch organisatorische Aspekte sowie die etablierte Sicherheitskultur wichtige Elemente für den sicheren Betrieb einer Entsorgungsanlage sind.

Laut (USDOE 2016) belaufen sich die Kosten für Errichtung und Betrieb des Lagers bisher auf rund 525 Mio. Euro.

3.3.3 Vor- und Nachteile von Endlagern in geologischen Tiefenlagern

Im Folgenden werden die Vor- und Nachteile von geologischen Endlagern dargestellt. Was die Vor- und Nachteile im Einzelnen für die Entsorgung radioaktiver Abfälle in Österreich bedeuten, wird in der vergleichenden Bewertung der Optionen in Kapitel 4 vertieft diskutiert.

Vorteile:

- **Einschluss und Isolation:** Endlager in geologischen Formationen können radioaktive Abfälle sicher und langfristig einschließen, entsprechend werden sie auch für HLW-

²³ Im Endlager WIPP werden nach der Klassifikation der Vereinigten Staaten von Amerika sogenannte GTTC- (Greater-Than-Class C-and-Transuranic) Abfälle und GTTC-like- (GTTC-ähnliche) Abfälle eingelagert.

²⁴ Siehe dazu auch <https://www.epa.gov/radiation/2014-radiological-event-wipp>

Abfälle vorgesehen. Wichtigster Faktor ist die Barrierenwirksamkeit des umgebenden Wirtsgesteins. Geotechnische Barrieren ergänzen das Sicherheitskonzept. Es gibt so gut wie keine Einschränkungen bei deren Ausgestaltung und Implementierung. Das Multibarrierenkonzept bietet eine langfristige passive Sicherheit.

- **Technische Machbarkeit:** Auf Basis von Untertagelabors, bereits weit entwickelten Endlagerkonzepten und den Erfahrungen mit existierenden Anlagen kann die technische Machbarkeit als gegeben eingestuft werden.
- **Charakterisierung des Standorts:** Der Standort ist anhand regulatorisch festgelegter Kriterien zu bewerten und ein entsprechendes Standortauswahlverfahren ist dafür erforderlich. Die Eignung eines Standortes muss mit standortspezifischen übertägigen und ggf. untertägigen Erkundungsmaßnahmen untersucht werden. Diese gestalten sich je nach den Anforderungen für den zu führenden Sicherheitsnachweis aufwendig und kostspielig. Trotzdem besteht eine technische Machbarkeit der Erkundungen.
- **Abfallflexibilität:** Endlagerkonzepte in tiefen geologischen Formationen sind grundsätzlich für alle Kategorien radioaktiver Abfälle basierend auf dem jeweiligen Sicherheitskonzept geeignet. Generell müssen radioaktive Abfälle den jeweiligen Annahmekriterien genügen und entsprechend konditioniert und verpackt sein.
- **Aufnahmekapazität:** Abhängig von den geologischen Gegebenheiten und den vorgesehenen Abfallkategorien kann ein Endlager in tiefen geologischen Formationen große Mengen an radioaktiven Abfällen aufnehmen.
- **Oberflächenanlagen:** Für Tiefenlager werden mindestens Anlagen eines Bergwerkbetriebs, wie Schächte, Rampen und Bewetterungsvorrichtungen notwendig. Diese gleichen in aller Voraussicht in ihrer räumlichen Ausgestaltung größeren Industrieanlagen, welche nach der Stilllegung zurückgebaut werden können. Der Bedarf an Anlagen und Flächen steigt deutlich, wenn auch Abfallannahme- und -behandlungsanlagen am Standort angesiedelt sein sollen. Ein Vorteil ist, dass die Anlagen nach dem Verschluss des Endlagers stillgelegt und rückgebaut werden können. Sofern keine institutionelle Überwachung und Kontrolle vorgesehen ist, können die Flächen vollständig für andere Zwecke genutzt werden.
- **F&E Bedarfe:** Die Forschung und Entwicklung ist bezüglich der Endlagerung in tiefen geologischen Formationen weit fortgeschritten. Es kann auf die Expertise und die

Erfahrungen zahlreicher anderer Staaten zurückgegriffen und kooperiert werden. Viele Aspekte der technischen Sicherheit, wie z. B. Behälter- und Barrierenkonzepte sind bereits sehr gut ausgearbeitet. Zusätzlich ist für den jeweiligen Standort ein Sicherheitskonzept zu entwickeln, das auch standortspezifischer Forschung bedarf.

- **Besonderheiten bei geologischen Endlagern in stillgelegten Gewinnungsbergwerken:**
 - Ggf. kann auf die bestehende Infrastruktur zurückgegriffen werden. Dies kann sich mindernd auf die Kosten und die Zeitbedarfe zu Errichtung des Bergwerks auswirken.
 - Zudem besteht ein äußerst fundiertes Betriebs- und Fachwissen über die geologischen Gegebenheiten basierend auf vorhandenen geologischen Daten.
 - Gegebenenfalls kann sogar auf lokal qualifizierte Fachkräfte zurückgegriffen werden.

Nachteile:

- **Zeitbedarfe:** Die Planung und Errichtung sowie der Betrieb eines Endlagers in geologischen Formationen beansprucht ggf. einige Jahrzehnte. Dabei müssen auch Auswirkungen der langen Zeitbedarfe auf die Zwischenlagerung der radioaktiven Abfälle berücksichtigt werden.
- **Rückholbarkeit und Bergung:** Die Rückholung der Abfälle ist deutlich einfacher, solange das Bergwerk noch nicht vollständig verschlossen ist. Mit dem Fortschritt der Stilllegung steigt der Aufwand. Nach Abschluss der Stilllegung muss für eine Bergung der Abfälle erneut ein Bergwerk aufgefahren werden. Konzeptionell sind Rückholung und Bergung aus einem Endlagerbergwerk über lange Zeit möglich aber mit steigendem Aufwand.
- **Kosten:** Die internationalen Beispiele zeigen eine große Bandbreite an Kosten, die nur bedingt verglichen werden können. In jedem Fall ist abhängig von der Größe der Anlage mit erheblichen Kosten zu rechnen.

- Besonderheiten für geologische Endlager in stillgelegten Gewinnungsbergwerken:
 - Der Nachweis der Langzeitsicherheit der Abfälle in alten Gewinnungsbergwerken ist aufgrund der Vielzahl bereits aufgeahrener Hohlräume ggf. schwerer zu führen. Entsprechend werden im Bergwerk gezielt Endlagerbereiche aufgefahren.
 - Oftmals handelt es sich um alte Streckennetze, die schlecht kartiert sind. Teile der Bergwerkstrukturen können geotechnisch gesehen in schlechtem, instabilem oder unklarem Zustand sein.
 - Negativbeispiele wie das Endlager Asse oder das Endlager für radioaktive Abfälle in Morsleben (ERAM) zeigen, dass die Bergbautätigkeiten erhebliche Schäden am Gestein verursacht haben können. Dies führt ggf. zu Instabilität des gesamten Grubengebäudes und zu Veränderungen des hydrogeologischen Regimes und damit zu Risiken wie Wassereinbruch oder stofflichen Wegsamkeiten.
 - Die Endlagerbehälter müssen möglicherweise an die Platzbedarfe angepasst werden.
 - Kosten für die Umbauten und die Anpassungen des Bergwerks an den Stand von Wissenschaft und Technik eines Endlagerbauwerks sind sehr schwer prognostizierbar.
 - Die Gewinnungsbergwerke können noch Restressourcen enthalten, die in Zukunft zu größerem Interesse von erneutem Abbau (menschliche Eingriffe) führen könnten.

3.4 Bohrlochlagerung

3.4.1 Technische Beschreibung

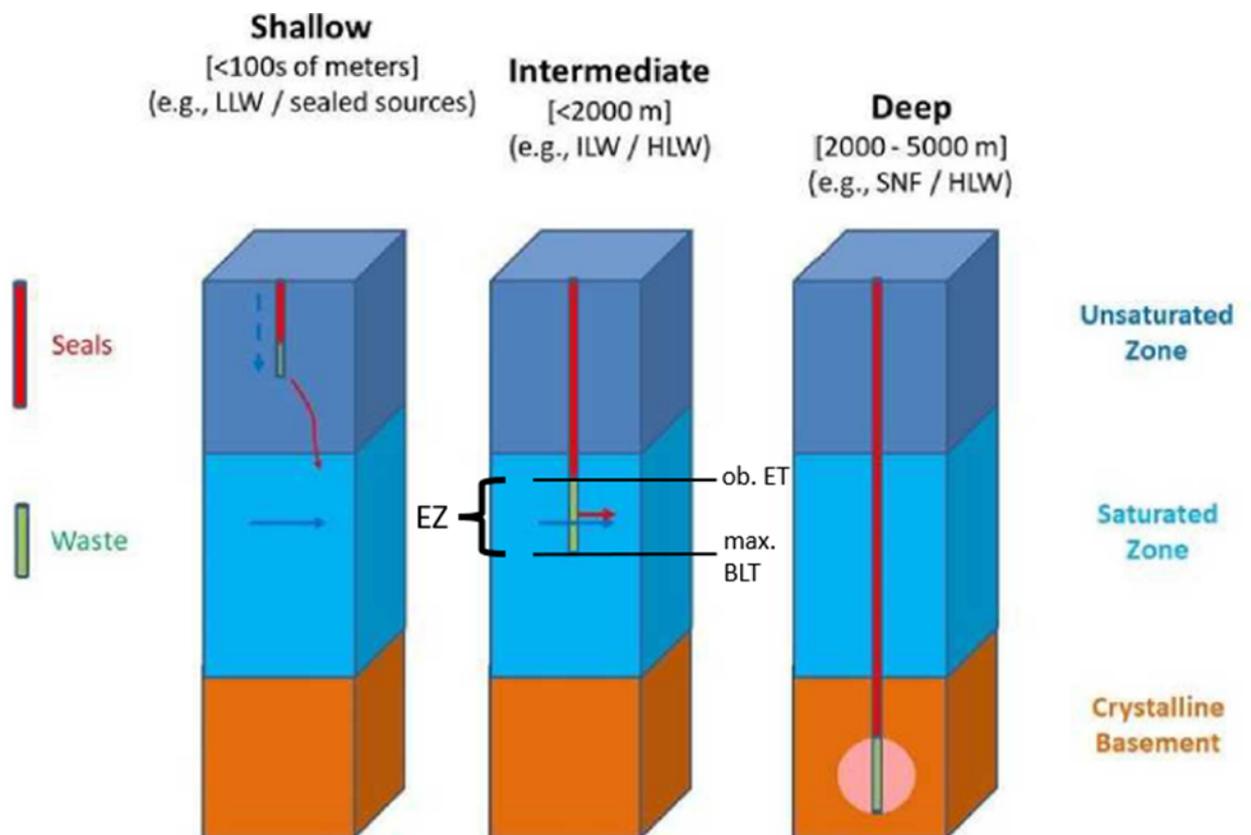
Begrifflichkeiten & Endlagertypen

Das Konzept der Bohrlochlagerung umfasst die geologische Endlagerung von festen oder verfestigten radioaktiven Abfällen in abgeteuften Bohrlöchern mit relativ geringem

Durchmesser, in welche die Abfälle direkt von der Oberfläche aus eingelagert werden (Abbildung 2). Die Bohrlochdurchmesser bewegen sich im Bereich von einigen Dutzend Zentimetern bis zu mehr als einem Meter (IAEA 2003).

International wird bei den Begrifflichkeiten zur geologischen Endlagerung radioaktiver Abfälle in Bohrlöchern meist zwischen tiefenabhängigen Konzepten – je nach Anforderungen an Einschluss und Isolation – unterschieden. Bei den Konzepten zur Bohrlochlagerung ist zu berücksichtigen, dass meist zwei Tiefen angegeben werden. Einerseits werden die maximalen Teufen der Bohrlöcher (max. BLT, Abbildung 27) – also die Tiefe, wie weit mit der Bohrung ins Erdinnere vorgedrungen wird – angegeben. Die zweite Angabe bezieht sich auf die minimale Tiefe der obersten radioaktiven Abfälle in der Einlagerungszone (obere Einlagerungstiefe, ob. ET, Abbildung 27) und hängt in aller Regel vom Einlagerungskonzept ab (Freete et al. 2020).

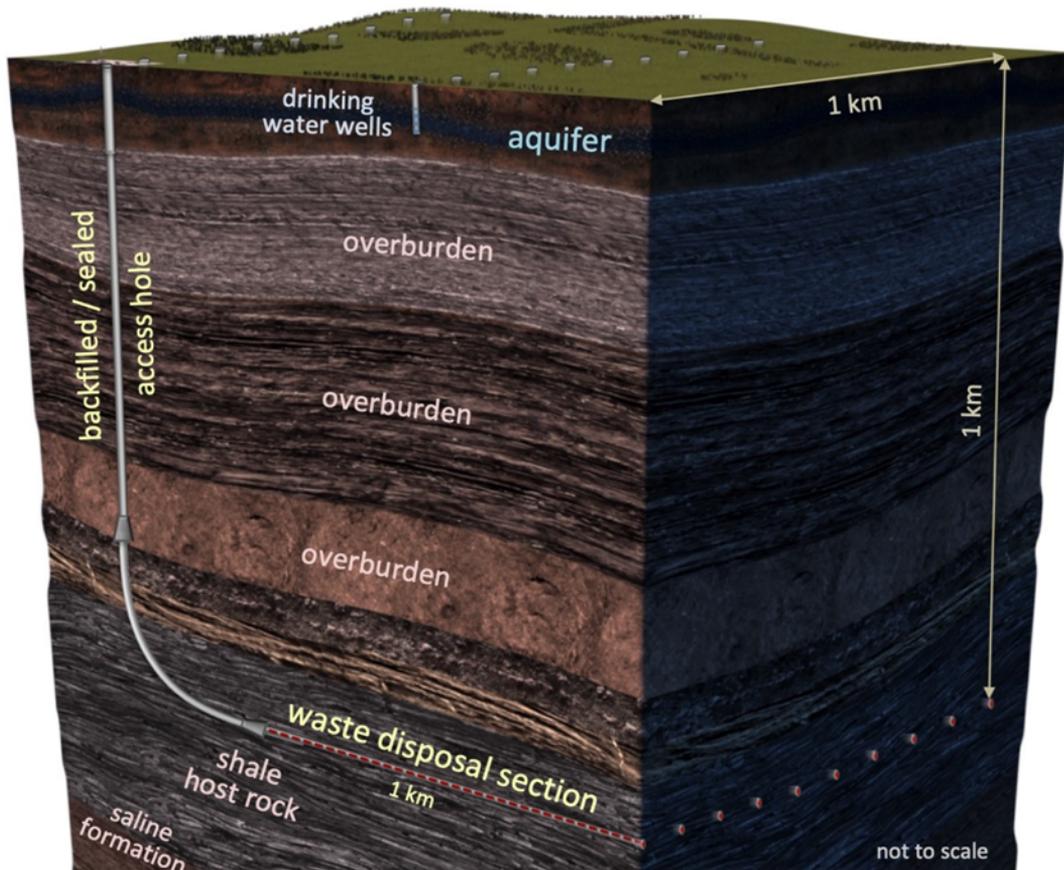
Abbildung 27: Darstellung der unterschiedlichen Tiefen von Bohrlochlagerung. Quelle: verändert nach (Freete et al. 2020). EZ: Einlagerungszone; ob. ET: obere Einlagerungstiefe; max. BLT: maximale Bohrlochteufe.



Die (IAEA 2009a) spricht von Bohrlochlagerung ab einer oberen Einlagerungstiefe der radioaktiven Abfälle von 30 Metern unter der Erdoberfläche. Die flache Bohrlochlagerung (FBL, shallow depth) reicht bis zu maximalen Bohrlochteufen von ungefähr 100 Metern (Faybishenko et al. 2016). Daran schließt die Bohrlochlagerung in mittlerer Tiefe (MBL, boreholes at intermediate depth) bis ungefähr 2.000 Metern Bohrlochtiefe an. Bei der tiefen Bohrlochlagerung (TBL, (very) deep borehole disposal ((V)DBD)) dringen die Bohrlöcher bis zu Tiefen von 2.000 – 5.000 Metern ins Erdinnere vor (Abbildung 27).

Seit 2016 hat das amerikanische Start-up Deep Isolation® (Deep Isolation, Inc. 2021) darüber hinaus aus der vertikalen TBL ein neues Konzept der horizontalen Bohrlochlagerung (HBL) entwickelt (Guido Bracke 2020). Nach dem Konzept von Deep Isolation® soll zunächst eine vertikale Bohrung in Tiefen von 1.000 bis 2.000 Meter abgeteuft und dann so abgelenkt werden, dass ein horizontales Bohrloch entsteht (Abbildung 28). In diesen horizontalen Bohrlöchern befindet sich der eigentliche Einlagerungsbereich der radioaktiven Abfälle (Deep Isolation, Inc. 2021).

Abbildung 28: Schematische Darstellung des Konzepts der horizontalen Bohrlochlagerung des Unternehmens Deep Isolation®. Quelle: (Deep Isolation Inc. 2020)



Abfallarten

Grundsätzlich können in Bohrlöchern sowohl feste als auch flüssige Abfälle im Untergrund eingelagert werden (Abbildung 27). Gerade für radioaktive Abfälle mit großen Mengen an Radionukliden mit Halbwertszeiten von mehr als 30 Jahren, für welche eine Entsorgung in oberflächennahen Anlagen keinen ausreichenden Einschluss und die Isolierung für Tausende von Jahren gewährleistet, kann die Bohrlochlagerung in Betracht gezogen werden (IAEA 2003).

Die bisherigen gängigen Konzepte der Entsorgung sehen die geologische Endlagerung von HLW-Abfällen in fester Form in der TBL vor, da davon auszugehen ist, dass in Tiefen von mehreren 1.000 Metern der Einschluss und die Isolierung der HLW-Abfälle gewährleistet werden kann (Bracke et al. 2016). Technische Limitierungen ergeben sich vor allem aus den geringen Durchmessern der Bohrlöcher im Dezimeterbereich und deren Reduktion mit

zunehmender Tiefe. Daraus resultieren Herausforderungen bezüglich der einlagerbaren Mengen von radioaktiven Abfällen und der Formen der Abfallgebinde (Bracke et al. 2019).

Allerdings geht man davon aus, dass auch kleine Volumina von LILW-LL-Abfällen in Bohrlöchern in geringerer Tiefe (im Bereich von FBL bis MBL) von einigen hundert Metern bei einem entsprechendem Sicherheitskonzept für mehrere Tausend Jahre sicher eingeschlossen werden können (IAEA 2020b).

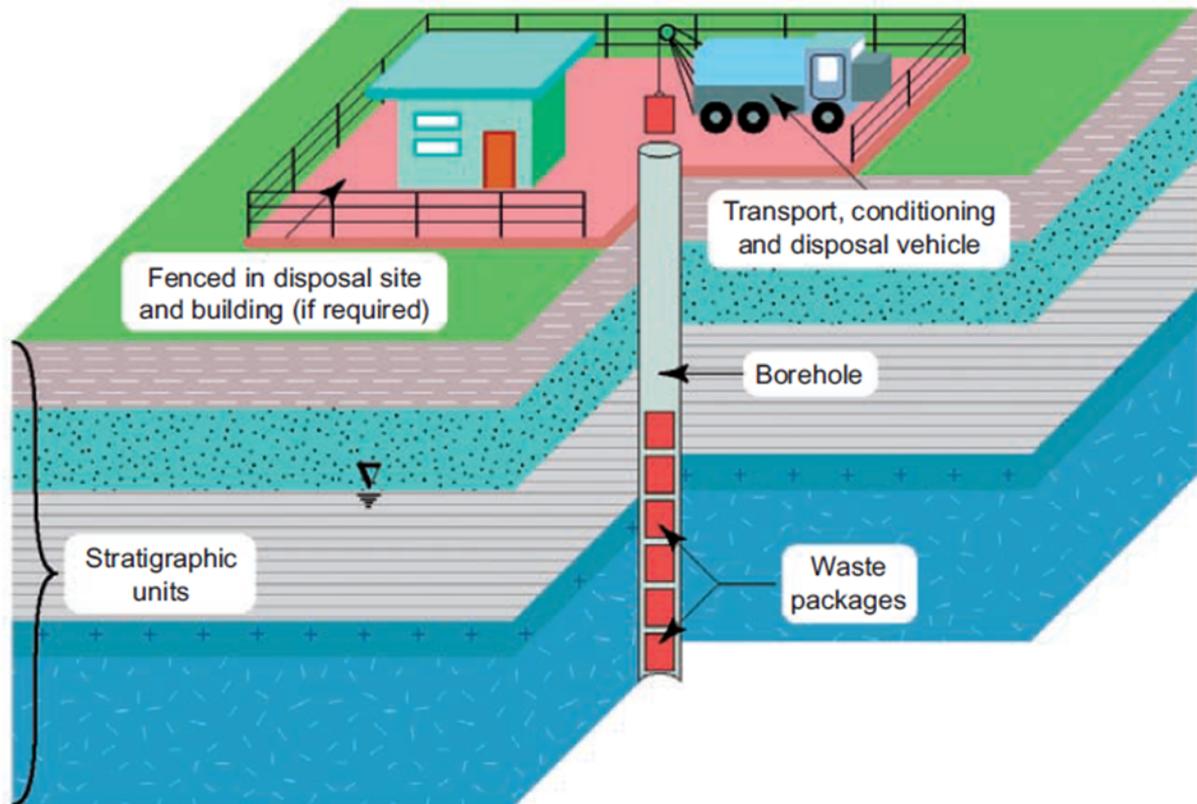
Laut (IAEA 2020b) eignen sich umschlossene hochradioaktive Strahlenquellen (disused sealed radioactive sources, DSRS) wegen der kleinen und schmalen Gebinde besonders für die geologische Endlagerung in Bohrlöchern von geringer Tiefe (FBL und MBL, siehe Abbildung 27). Auf Grund der geringen Mengen von umschlossenen Strahlenquellen im Inventar von Österreich werden diese aber nicht gesondert bei der Betrachtung von Entsorgungsoptionen berücksichtigt (NES 2022).

LILW-SL-Abfälle werden in der Regel nicht für die Entsorgung in Bohrlöchern in Betracht gezogen. Auf Grund der geringen Abfallkapazität bei der Bohrlochlagerung und der technischen Limitationen hinsichtlich Form und Geometrie der Abfallgebinde sowie dem relativ kurzen Isolierungszeitraum erscheint eine Entsorgung großer Mengen von LILW-SL-Abfällen, wie sie bei der Dekommissionierung anfallen, als nicht rentabel (Bracke et al. 2016).

Errichtung, Betrieb und Verschluss

Bohrlochendlager werden von der Erdoberfläche aus betrieben und umfassen neben dem eigentlichen Bohrloch oder mehreren Bohrlöchern auch Oberflächenanlagen (Abbildung 29). Die Oberflächenanlagen dienen einerseits – in Form eines Bohrturms – der Bohrung der Bohrlöcher und der Einlagerung der radioaktiven Abfälle (Fischer et al. 2020a).

Abbildung 29: Schematische Darstellung eines Bohrlochendlagers. Quelle: (IAEA 2009a)

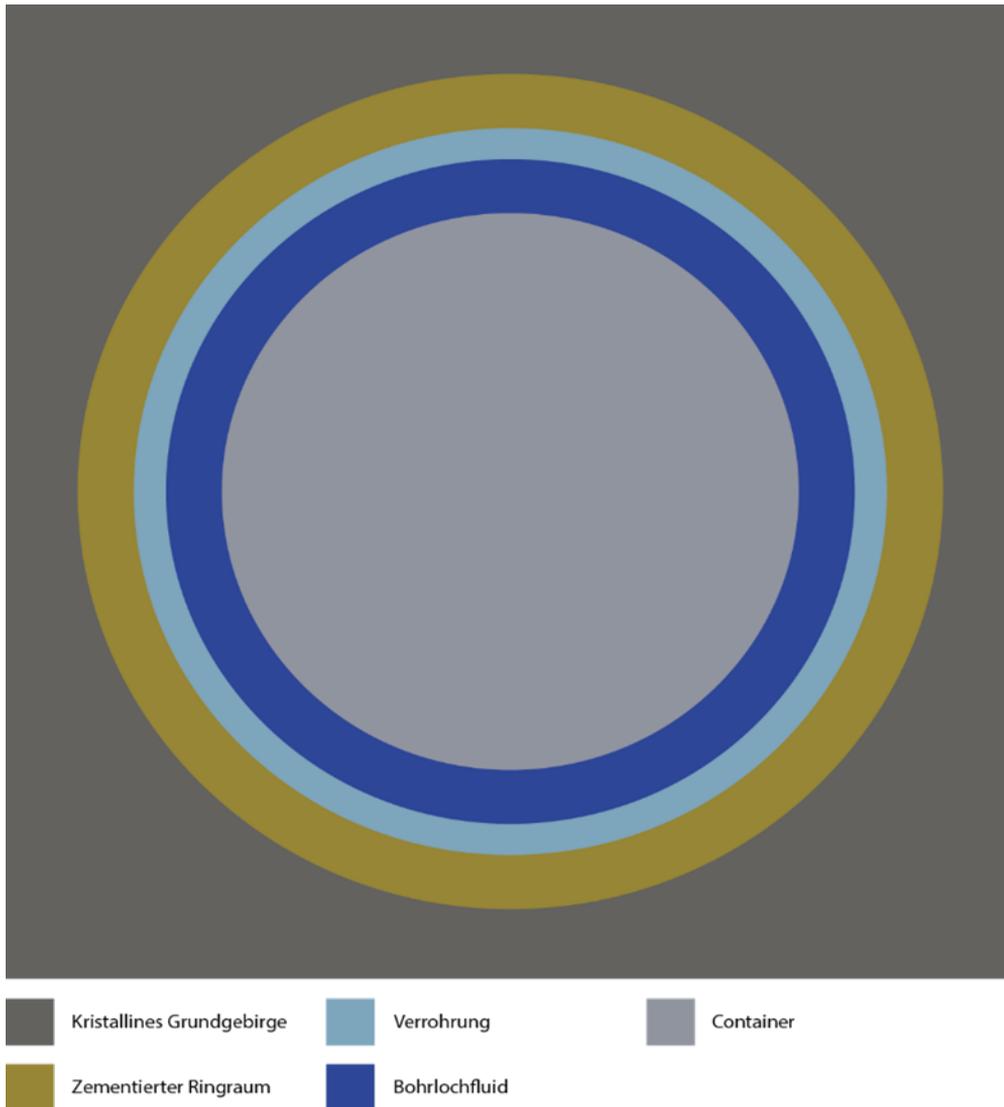


Andererseits werden je nach WAC zur Annahme der Abfalltransporte, Konditionierung und Einlagerung zusätzliche Abschirmungsvorrichtungen benötigt, um die Abfallgebinde handhaben zu können (Bracke et al. 2016). Es ist zu erwarten, dass auf größere Schächte, Rampen oder Bewetterungsanlagen, wie bei der Errichtung von geologischen Endlagerbergwerken in tiefen geologischen Formationen verzichtet werden kann (IAEA 2009a). Dementsprechend kann von einem wesentlich geringerem Flächenbedarf und dementsprechend geringerem Aushub und Veränderung der Landschaft an der Erdoberfläche ausgegangen werden (IAEA 2003). Gegebenenfalls können auch mobile Bohrtürme eingesetzt werden, was die Errichtung und den Rückbau der Anlagen beschleunigen würde (Abbildung 29).

Bei der Bohrtechnik von Bohrlochendlagern allgemein ergeben sich technische Herausforderungen, welche mit der Tiefe der Bohrlöcher zunehmen (Englert et al. 2023). Im geologischen Untergrund nimmt die Gebirgskonvergenz zu. Um dem dadurch zunehmenden Gebirgsdruck entgegenzuwirken, müssen die Bohrlöcher mit entsprechender Tiefe stabilisiert werden (Bracke et al. 2016). Die Stabilisierung erfolgt durch den Ausbau von Stahlrohren innerhalb der Bohrlöcher. Diese Verrohrung spielt besonders bei der MBL und TBL eine

zunehmend wichtige Rolle. Außerdem ist es vorgesehen, dass die Bohrlöcher während dem Abteufen und dem anschließenden Einlagerungsbetrieb mit Bohrlochfluid²⁵ versetzt werden (Abbildung 30).

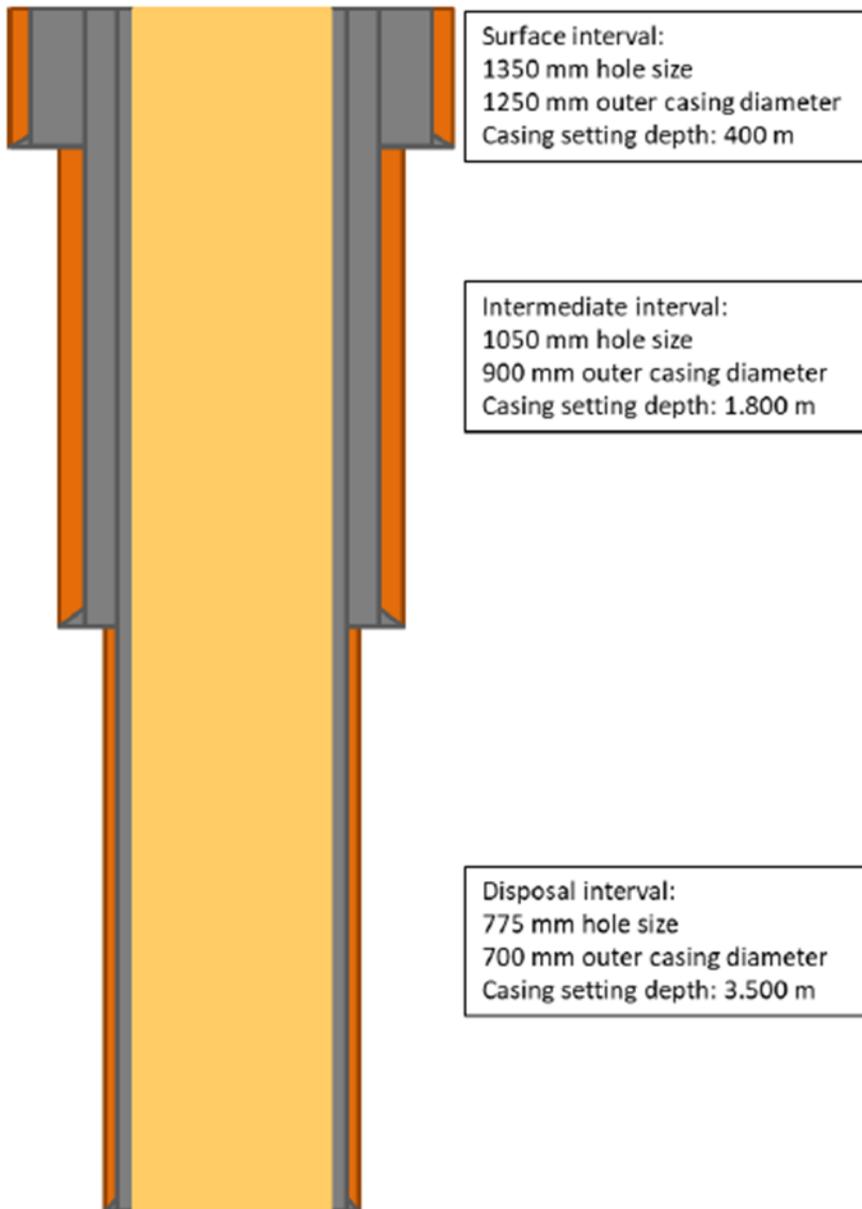
Abbildung 30: Querschnitt eines Bohrlochs mit eingelagertem Abfallbehälter vor Verschluss. Quelle: (Englert et al. 2023)



²⁵ Unter Bohrlochfluiden versteht man in der Regel Wasser- oder Öl-basierte Bohrlochspülungen, welche mit Bentonit versetzt sind. Bohrlochspülungen dienen neben dem Austrag des erbohrten Materials hauptsächlich zur Stabilisierung der Bohrlöcher.

Mit der Tiefe nehmen auch die notwendigen Wandstärken der Stahlrohre zu. Der Ringraum zwischen Bohrlochwand und Verrohrung wird zusätzlich mit Zement verfüllt, um die Rohre im Bohrloch zu stärken und zu verankern (Abbildung 31). Die Verrohrung wird dabei von oben nach unten dem Bohrfortschritt folgend eingebracht. Da die Rohre durch jeweils bereits verrohrte Bohrlochabschnitte abgesenkt werden müssen, entsteht eine Art Teleskopverrohrung, welche dazu führt, dass die Durchmesser des verrohrten Bohrlochs mit der Tiefe schrittweise abnehmen (Abbildung 31). Aus diesem Grund stellt der realisierbare Bohrlochdurchmesser mit der Tiefe des jeweiligen Einlagerungshorizonts eine wesentlich technische Limitierung bei der Bohrlochlagerung dar (Bracke et al. 2016). Nach jetzigem Stand von W&T geht man bei der TBL in Tiefen von bis zu 5.000 Metern von realisierbaren Bohrlochdurchmessern von etwa 450 mm aus (Guido Bracke 2020). (Fischer et al. 2020a) geben mit 1.350 mm in 400 Metern und 1.050 mm in 1.800 Metern Tiefe auch mögliche Bohrlochdurchmesser für die mitteltiefen Abschnitte an (Abbildung 31).

Abbildung 31: Querschnitt durch die Teleskopverrohrung eines Bohrlochs. Quelle: (Fischer et al. 2020a)

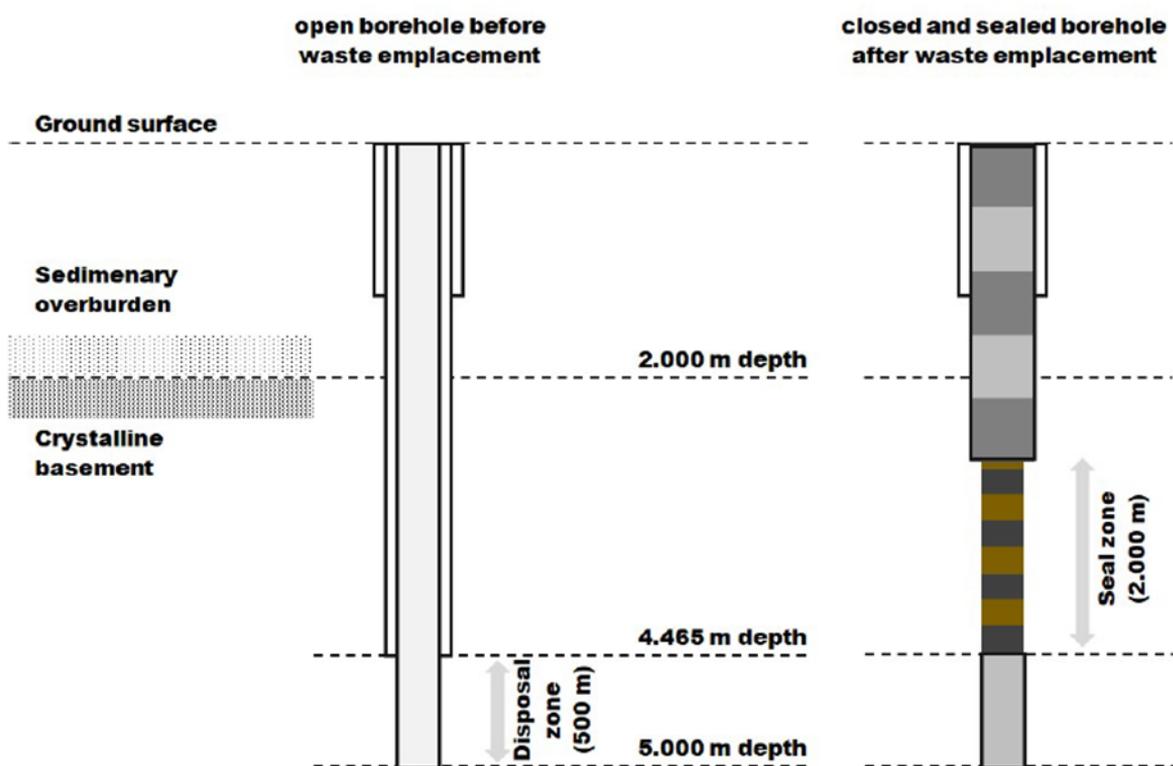


Der Betrieb und die Einlagerung erfolgen ebenfalls über die Bohrtürme. Wie oben beschrieben, hängt die Ausgestaltung der Oberflächenanlagen und somit auch die Betriebsphase mit Anlieferung, Konditionierung und Einlagerung maßgeblich vom jeweiligen Konzept, Abfallarten und Menge und deren Abfallgebinden ab.

Da die Bohrlöcher von der Erdoberfläche aus befüllt werden, ist u. a. kein Untertagebetrieb durch Arbeitskräfte nötig, was sich vor allem auf den Zeitbedarf auswirkt. Beim Verschluss nach der Einlagerung können ähnliche Techniken wie bei der Verfüllung und Versiegelung

von Untertagebergwerken zur Anwendung kommen (Abbildung 32). Es ist anzunehmen, dass die Verfüllung mit unterschiedlich mächtigen und sich abwechselnden Schichten von Beton und Bentonit erfolgt (IAEA 2020b). Eine Rückholung als Reversibilität des laufenden Betriebes ist innerhalb der relativ kurzen Betriebsdauer eines Bohrlochs bzw. Bohrlochfeldes bis zum Verschluss gegeben (Bracke et al. 2016). Nach dem Verschluss können die Oberflächenanlagen relativ schnell zurückgebaut werden.

Abbildung 32: Bohrlochlagerung vor und nach Verschluss. Quelle: (IAEA 2020b)



Deep Isolation® wirbt damit, dass die Dauer für die Errichtung, den Betrieb und den Verschluss einer Entsorgungsanlage mit Bohrlochlagerung deutlich schneller zu realisieren wäre, als es das Auffahren eines Bergwerks ist (Deep Isolation EMEA Limited 2021). Als Grundlage für die Aussagen dienen die Konzepte der kanadischen, schwedischen und US-amerikanischen Regierungen als Referenz. Deep Isolation® nimmt insgesamt weniger als ein Jahr für die Errichtung bis zur Einlagerung an und betont, dass mehrere Bohrlöcher parallel abgeteuft werden könnten, wohingegen die Errichtung eines geologischen Endlagerbergwerks ein durchschnittlicher Zeitbedarf von mehr als acht Jahren angenommen würde (Deep Isolation EMEA Limited 2021). Weder in (IAEA 2009a) noch von (Bracke et al. 2016)

werden genauere Angaben über die Zeitbedarfe von Bohrlochprogrammen zur Entsorgung von radioaktiven Abfällen gemacht.

(Bracke et al. 2016) gehen davon aus, dass sich die reinen Bohrkosten, wie sie bei Standardbohrungen mit einem Durchmesser von 375 mm und einer Teufe von bis zu 5.000 Metern anfallen, auf etwa 30 Mio. Euro pro Bohrung belaufen könnten. Dabei steigen die Kosten überproportional mit dem Durchmesser, der Tiefe des Bohrlochs und der geologischen Gesteinseigenschaften²⁶. Abhängig von Menge und Klassifizierung des Inventars bewegen sich Prognosen von (Bracke et al. 2016) für nationale Entsorgungsprogramme mittels Bohrlochlagerung zwischen einigen Dutzend Millionen und bis zu wenigen Milliarden Euro. (Bracke et al. 2016) betonen, dass darüber hinaus ein deutlicher Zusatzaufwand durch die Erkundung, Errichtung etwaiger kerntechnischer Oberflächenanlagen und gegebenenfalls einer institutionellen Kontrolle und Überwachung nach der Betriebsphase anfallen werden. Daher sind Aussagen zur Kostenabschätzung der Bohrlochlagerung mit großen Unsicherheiten behaftet.

Sicherheitskonzept

Bei der TBL soll der Einschluss und die Isolation der Abfälle von der Biosphäre im Wesentlichen durch die große Tiefe des Einlagerungsbereiches erreicht werden (IAEA 2003). Das Sicherheitskonzept zielt darauf ab, den sicheren Einschluss und die langfristige Isolierung der Abfälle von der Biosphäre durch die Kombination aus natürlichen und technischen Barrieren zu erreichen. Dieses Multibarrierensystem ist in seiner Sicherheitsfunktion darauf ausgelegt, die Aktivität der Radionuklide durch dichte überlagernde Gesteinsschichten und den Verschluss der Zugangswege so einzudämmen, sodass ein ausreichender Einschluss und Isolierung gewährleistet ist (IAEA 2009a).

Grundsätzlich bietet die Bohrlochlagerung ein hohes Potenzial für den Einschluss und die Isolierung radioaktiver Abfälle. Es kann abgeleitet werden, dass je tiefer die Abfälle gelagert werden, desto höher dabei der Einschluss und die Isolation vor der Biosphäre ist (IAEA 2020b).

Nichtsdestotrotz ist zu betonen, dass die Anwendung des Sicherheitskonzeptes bei der Bohrlochlagerung zum großen Teil unerprobt bleibt und weiterhin erhebliche Forschung

²⁶ 26 Beispiel: Tiefenbohrungen in vergleichsweise weicheren Gesteinen, wie Ton- und Sandsteinen gestalten sich technisch deutlich weniger aufwendig und kostspielig als in härteren kristallinen Gesteinen.

und Entwicklung erforderlich ist (Faybishenko et al. 2016). (IAEA 2020b) betonen ebenfalls, dass die Entwicklung der Sicherheitsbewertung der Sandia National Laboratories bisher nur generisch sei und noch kein Sicherheitsnachweis für ein spezifisches Projekt zur Entsorgung von radioaktiven Abfällen – vor allem in tieferen Bohrlöchern – durchgeführt werden konnte. Die Entwicklung und Genehmigung eines solchen Sicherheitsnachweises sei daher notwendig, um das Konzept in Zukunft weiter zu testen. Darüber hinaus ist offen, ob je nach Tiefe und Konzept der Bohrlochlagerung eine institutionelle Kontrolle und Überwachung während und oder nach der Betriebsphase und Verschluss der Anlagen eingerichtet werden muss.

Den natürlichen Barrieren kommt durch die räumliche Beschränkung der technischen Barrieren besondere Bedeutung zu. Die MBL und TBL bauen vor allem auf eine robuste Isolierung der radioaktiven Abfälle von der Biosphäre durch die Einlagerung der Abfälle in tiefe kristalline Wirtsgesteine des Grundgebirges. In entsprechender Tiefe weisen kristalline Gesteine eine geringe Durchlässigkeit, reduzierende Bedingungen sowie eine Umgebung mit isoliertem (altem) Grundwasser, welches von tiefen Grundwässern überlagert ist, und gut ausgeprägter Dichteschichtung auf (Freete et al. 2020).

Bei entsprechender Eignung des Standorts und des Verschlusses kann davon ausgegangen werden, dass sich das Tiefenkonzept fast vollständig auf das natürliche System stützt, um dauerhaft zu gewährleisten, dass die Radionuklide nicht mit der Biosphäre in Kontakt treten. Dennoch ist vor allem bei kristallinem Wirtsgestein – ähnlich wie bei der Endlagerung in tiefen geologischen Formationen – ein standortspezifischer einschlusswirksamer Einlagerungsbereich nachzuweisen (Freete et al. 2020). Auch (Bracke et al. 2016) weisen darauf hin, dass die Ausweisung einschlusswirksamer Einlagerungsbereiche nur standortspezifisch möglich ist. Bei der Bohrlochlagerung in kristallinem Wirtsgestein ist auf Grund der enormen Tiefen dennoch ein besserer Einschluss zu erwarten als bspw. bei Endlagerbergwerken in geringeren Tiefen, da kristalline Gesteine in größeren Tiefen weniger Wegsamkeiten aufweisen (IAEA 2009a).

Zusätzlichen können mächtige sedimentäre Deckschichten mit unterschiedlichen dichten überlagernden Gesteinsschichten, wie z. B. Tonstein oder Steinsalz mit sogenannten Fallstrukturen zum Schutz vor dem Transport von Schadstoffen beitragen. Dann lässt alleine der große räumliche Abstand vom Schutzgut zur Biosphäre ausreichend lange Transportzeiten erwarten (Bracke et al. 2016). Bei den Konzepten zur Entsorgung von HLW-Abfällen wird bspw. in der Regel auf eine obere Einlagerungstiefe von mindestens 1.000 bis 1.500 Metern

gesetzt. Für LILW-LL-Abfälle sind geringere Tiefen von mehreren hundert bis 2.000 Metern vorstellbar.

Letztendlich muss die Wirksamkeit der natürlichen Barrieren standortspezifisch nachgewiesen werden. Es sollten dabei immer mehrere Barrieren mit unterschiedlichen sich ergänzenden geologischen Eigenschaften gewählt und unterstützend wirksam werden (IAEA 2009a).

Dies gilt ebenso für die technischen Barrieren, welche die Wirksamkeit der natürlichen Barrieren unterstützen sollen. Die Einlagerungsbereiche, welche nur durch das Bohrloch zugänglich sind, werden nach der Einlagerung sicher verschlossen und verfüllt. Dadurch soll ein axialer Schadstofftransport entlang des Bohrloches verhindert werden.

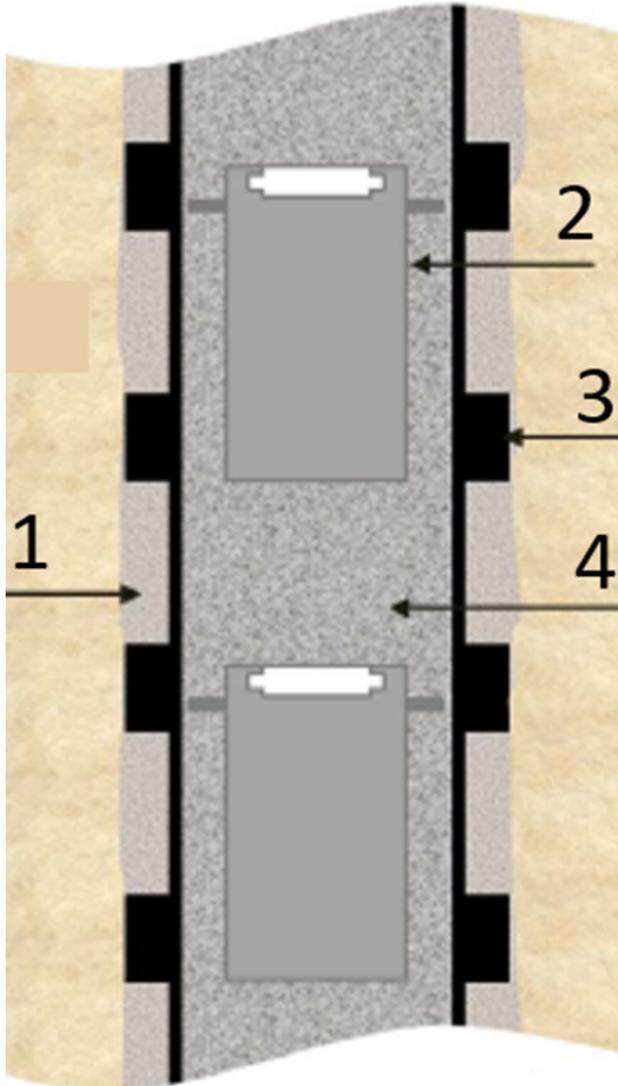
Wie beschrieben bestehen dabei im Wesentlichen hinsichtlich der realisierbaren Durchmesser von Bohrlöchern Schwierigkeiten, die sich direkt auf die zu implementierenden technischen Barrieren auswirken. Die Möglichkeit zu deren Ausgestaltung nimmt mit abnehmendem Bohrlochdurchmesser enorm ab (Bollingerfehr et al. 2018). Zudem herrschen in diesen Tiefen höhere Gebirgsdrücke, welche sowohl Bohrloch, technische Barrieren als auch Abfallgebinde verformen können. Da die technischen Barrieren nur dünnwandig sind, besteht darüber hinaus die Gefahr der Korrosion der Behälter (Endlagerkommission 2016).

Für Konzepte in geringeren Tiefen (FBL bis MBL), bei welchen das Sicherheitskonzept nicht auf der Einlagerung in tiefen und isolierten Wirtsgesteinen ausgelegt werden kann, nimmt die Bedeutung technischer Barrieren für den Nachweis der Sicherheit nach dem Verschluss der Bohrlöcher zu. Eine ausreichend tiefe ungesättigte Zone im Untergrund und entsprechender Entfernung zum Grundwasserspiegel wären ebenfalls wichtig (Freete et al. 2020).

Weitere technische Limitierungen bestehen im Wesentlichen hinsichtlich der Abmessungen und Wandstärken von Abfallgebinden, welche beim Behälterkonzept berücksichtigt werden müssen. Je nach Abfallart und Bohrlochtiefe ist eine spezielle Konditionierung und Anpassung der Abfallgebinde und technischen Barrieren unumgänglich (Bracke et al. 2016).

Neben den Abfallgebinden wird es z. B. gerade bei der Einlagerung von LILW-LL-Abfällen vor allem auf einen entsprechenden Überbehälter ankommen, in welchen die Abfallgebinde eingebracht werden und welches diese zusätzlich schützt (IAEA 2020b). Eine weitere technische Barriere stellen die Teleskopverrohrung und die Bohrlochverschlüsse aus Zement und Bentonit dar, um Schadstofftransporte zu verhindern (Abbildung 33).

Abbildung 33: Schematischer Querschnitt des Endlagerbereichs in einem Bohrloch. Quelle: (IAEA 2020b). 1. Verpresster Hohlraum zwischen Verrohrung und Bohrlochwand; 2: Abfallgebinde in Überbehälter; 3: Verrohrung; 4. Bohrlochverfüllung



Die Dimensionierung der technischen Barrieren hängt dabei von der gewählten Teufe und des vorherrschenden hydrostatischem Drucks bzw. auch dem Überlagerungsdruck durch die übereinander gestapelten Gebinde ab (Bracke et al. 2016).

Herausforderungen werden in (Bracke et al. 2016) dargestellt. Demnach ist für die Langzeitsicherheit weiterhin zu prüfen, ob durch Korrosion der Behälterwände und bei der Verrohrung durch die einhergehende Wasserstoffgasbildung ein entlang des Bohrlochs aufwärts gerichteter Stofftransport entstehen kann und welche Auswirkung dies auf die Ausbreitung von Radionukliden hätte. Eine Auswirkung wäre der Radionuklidtransport in

möglicherweise gestörten Randbereichen des Einlagerungsbereiches und somit durch die geologische Umgebung.

Eine weitere Herausforderung der Bohrlochlagerung ist die Standortauswahl und die Charakterisierung bzw. Sicherheitsbewertung der natürlichen Barrieren. Bei der Charakterisierung der Wirtsgesteine kann bei der Sondierung für Standorte für die Bohrlochlagerung beispielsweise nicht auf eine untertägige Erkundung der geologischen Verhältnisse zurückgegriffen werden, wie es oft bei der Standortauswahl tiefer geologischer Endlager praktiziert wird. Im Fall der Bohrlochlagerung können aber während des Abteufens von Bohrungen Daten gewonnen werden. Sie beruhen auf dem zutage geförderten Bohrklein oder, je nach Bohrverfahren, Bohrkernen, sowie geophysikalischen Bohrlochmessungen.

Um die langfristige Sicherheit eines Endlagers beurteilen zu können, müssen detaillierte Informationen über die geologische Situation vorliegen. Ob diese Informationen zur Ausweisung und Bewertung eines sicheren Einlagerungsbereich und dessen Langzeitsicherheit sowie dem Anspruch des Entscheidungsprozesses genügen, stellt daher eine Unsicherheit dar (Bracke et al. 2016).

Die Rückholung von Abfällen aus Bohrlöchern, z. B: durch Störfälle oder Havarie²⁷ während der Einlagerung ist aufgrund des begrenzten Raumes und der Enge der Bohrlöcher mit großen Schwierigkeiten verbunden (Bracke et al. 2016). Eine Rückholung ist je nach Standzeit und Zustand der Abfälle im Bohrloch (Gebirgstätigkeit, Havarie, Korrosion) und der Einlagerungstiefe nur unter hohem finanziellem und technischem Aufwand möglich. Der Nachweis der Umsetzbarkeit muss erst noch erbracht werden. Dies gilt ebenso für die FBL und MBL.

Mit weiteren großen Schwierigkeiten und sehr hohem Aufwand wäre eine Bergung der Abfälle nach dem Verschluss der Bohrlöcher verbunden (Bracke et al. 2019). Durch die Gebirgskonvergenz ist jedoch davon auszugehen, dass sich sowohl das Bohrloch, technische Barrieren und Abfallgebilde unter dem ständigen Gebirgsdruck mit fortschreitender Zeit verformen. Eine Bergung hätte somit zur Folge, dass die Bohrlöcher mit größerem Bohrchdurchmesser überbohrt werden müssten, bzw. ein Bergwerk zur Bergung aufgefahren werden müsste. Je nach Einlagerungstiefen (ab 1.000 Meter) sind auf Grund der technischen Möglichkeiten, des Gebirgsdrucks und der zunehmenden Temperaturen Grenzen in der Umsetzbarkeit gesetzt und zum jetzigen Stand von W&T erscheint eine Bergung

²⁷ Als Havarie bezeichnet man bei der Bohrlochlagerung Vorfälle, bei denen sich die einzulagernden Behälter z. B. verkanten oder innerhalb des Bohrlochs abstürzen und infolgedessen rückgeholt werden müssen.

technisch und sicherheitstechnisch unmöglich (Bollingerfehr et al. 2018). Die Nutzung der Bohrlochlagerung ist daher vermutlich nur unter Verzicht der Bergbarkeit möglich (Englert et al. 2023). (Bracke et al. 2016) betonen, dass aus diesen Gründen besonders bei der Handhabbarkeit, Korrosionsbeständigkeit und der mechanischen Stabilität der Behälter für eine mögliche Bergbarkeit F&E-Bedarf besteht.

Wirtsgestein

Anforderungen an die geologische Beschaffenheit der Wirtsgesteine ergeben sich nicht primär aus der Anwendung der Bohrtechnologie, sondern aus der Anforderung, die Abfälle langfristig sicher einzuschließen (Englert et al. 2023).

Die meisten bisher diskutierten Konzepte gehen von der Endlagerung von HLW-Abfällen in vertikalen Bohrlöchern mit einer Tiefe von 3.000 – 5.000 m aus. Als Wirtsgestein, in das die radioaktiven Abfälle eingelagert werden sollen, werden dabei in der Regel Kristallingesteine des Grundgebirges angenommen (Bracke et al. 2016).

Deep Isolation® treibt bei ihrem Konzept der HBL voran, sedimentäre Einlagerungshorizonte des Deckgebirges in geringeren Tiefen von 1.000 – 2.000 Metern als Wirtsgesteine für die Endlagerung von HLW-Abfällen zu erschließen (Guido Bracke 2020). Hierfür kommen vor allem Tonsteine in Frage. Diese geologischen Formationen treten zwar weniger mächtig auf, bieten aber auf Grund ihrer horizontalen und meist tektonisch ungestörten Lage größere Volumina an potenziellen Einlagerungsbereichen auf.

3.4.2 Internationale Beispiele von Bohrlochlagerung

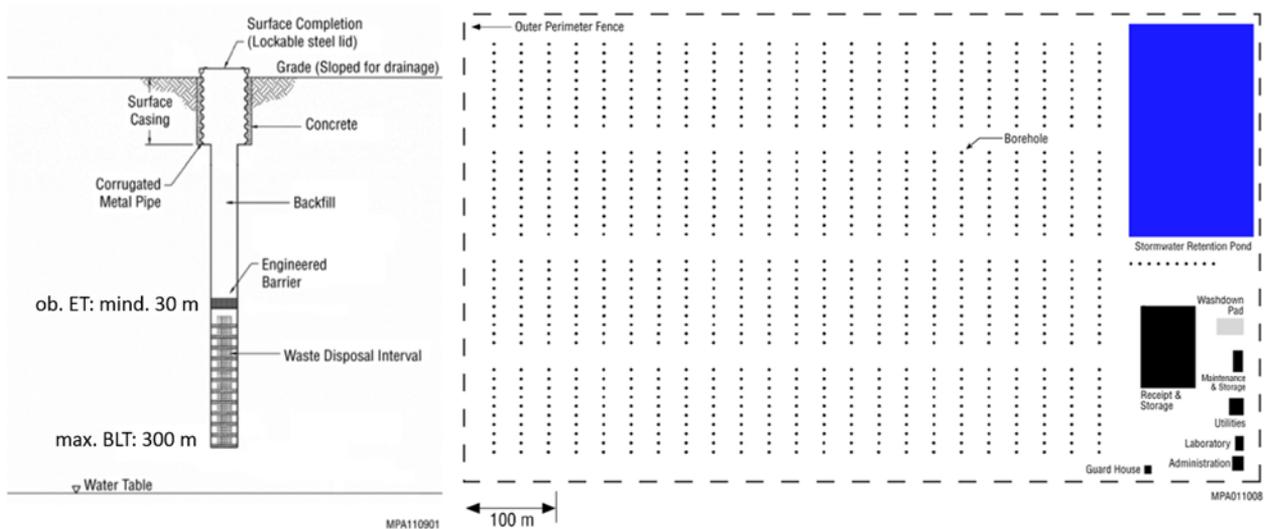
Im Folgenden werden vereinzelte internationale Beispiele für Konzepte der Bohrlochlagerung vorgestellt. International kann so gut wie keine Expertise aus bereits in der Praxis angewendeten Endlagern herangezogen werden. Die einzelnen Konzepte sollen lediglich beispielhaft den aktuellen Entwicklungsstand der Bohrlochlagerung aufzeigen und erheben keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

Fokus: Bohrlochkonzept der Vereinigten Staaten von Amerika

In (USDOE 2016) wird ein Konzept für die Entsorgung von LILW-LL-Abfällen in Bohrlöchern vorgeschlagen. Je nach Abfallmengen und Bohrlochbedarf könnten Anlagen dabei auch

mehrere Bohrlöcher, in unmittelbarer Nähe zueinander, umfassen. (USDOE 2016) zeigen in Abbildung 34 eine schematische Darstellung einer möglichen Ausgestaltung eines Bohrlochendlagers für LILW-LL-ähnliche Abfälle mit mehreren benachbarten Bohrlöchern auf.

Abbildung 34: Schematischer Aufbau eines Bohrlochs der MBL (links) und Konzept einer möglichen Bohrlochanlage zur Entsorgung von LILW-LL-Abfälle (rechts). Quelle: verändert nach (USDOE 2016)



Das Konzept schlägt Bohrlöcher mit einer oberen Einlagerungstiefe von 30 Metern und maximale Bohrlöchtiefen von 300 Metern mit einer großen Spannweite an Bohrlöcherdurchmessern von 0,3 bis 3,7 Metern vor. Der Abstand zwischen den einzelnen nebeneinander liegenden Bohrlöchern ist je nach Konzept flexibel zu gestalten (USDOE 2016). Das Konzept sieht vor, die Bohrlöcher in den obersten 30 Metern bis zur oberen Einlagerungstiefe mit Stahlbeton zu verschließen.

Um das gesamte Inventar der LILW-LL-ähnlichen Abfällen der Vereinigten Staaten von Amerika zu entsorgen, würden nach dem Konzeptentwurf etwa 44 Hektar Land für 930 Bohrlöcher nötig werden. Der Konzeptentwurf beinhaltet auch Oberflächenanlagen, die als unterstützende Infrastruktur benötigt werden, wie z. B. Einrichtungen oder Gebäude für die Annahme und Handhabung von Abfallgebinden oder Containern sowie Platz für ein Regenwasserrückhaltebecken.

Es ist jedoch zu betonen, dass für solche Konzepte bisher keine Sicherheitsnachweise erbracht wurden. Es ist mindestens zu hinterfragen, ob obere Einlagerungstiefen von 30

Metern für den sicheren Einschluss und die Isolation von LILW-LL-Abfällen vor Mensch und Umwelt ausreichen, da es auch die Möglichkeit gäbe, größere obere Einlagerungstiefen von 100 Metern zu wählen. Eine Unterbringung von LILW-SL-Abfällen wäre rein technisch ebenso möglich.

Fokus: Bohrlochlagerung in Australien

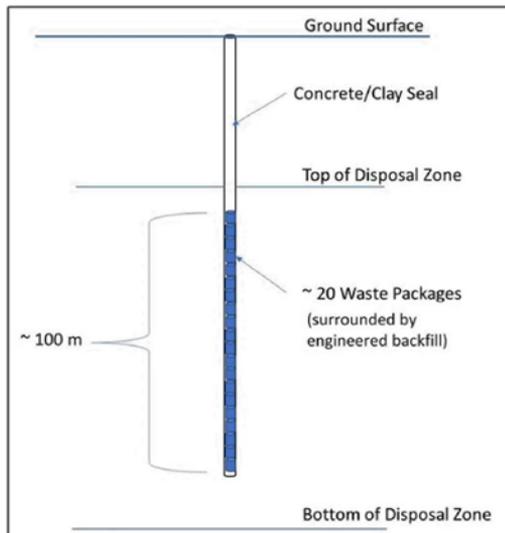
Zwischen 1992 und 1994 wurde in Australien die Einlagerung von schwachradioaktiven und chemischen Abfällen in zwei Bohrlöchern am Standort Mt Walton East erprobt. Die Abfälle wurden in 200-Liter-Fässer einbetoniert anschließend in die Bohrlöcher eingelagert. Die Bohrlöcher verfügen über einen Durchmesser von zwei Metern und einer Tiefe von 28 Metern. An der Basis der Bohrlöcher wurde ein Betonsockel installiert, auf welchen die Fässer gestapelt wurden. Die Zwischenräume wurden mit Beton verfüllt. Die obersten acht Meter der Bohrlöcher wurden mit Lehm verfüllt. Ein abschließende Betondeckel sorgte für den Verschluss. Insgesamt konnten so 66 Fässer eingelagert werden (IAEA 2003).

Fokus: Bohrlochkonzept am Beispiel Israel

Laut (Freete et al. 2020) betrachtet Israel aktuell die Entsorgung von radioaktiven Abfälle in Bohrlöchern mit mittlerer Tiefe in der ariden Yamin Plain Region in Tiefen von einigen Hunderten Metern. Das Konzept sieht vor, dass ein oder mehrere Bohrlöcher in eine Formation siliziklastischer Sedimente gebohrt würden.

Die Bohrlochdurchmesser könnten dabei variieren und an die Dimensionen der Abfallgebinde angepasst werden. Im Referenzmodell ist vorgesehen, dass die Abfallgebinde nach der Einlagerung im Bohrloch mit Beton verfüllt werden, bevor das nächste Abfallgebinde darüber gestapelt wird. Diese Methode soll zusätzliche Stabilität und Isolation von der natürlichen Umgebung bieten. Die Bohrlöcher sollen nach der Einlagerung der Abfälle mit abwechselnden Schichten mit Tonmineralen wie Bentonit und Beton sowie anderen Geomaterialien verschlossen werden (Freete et al. 2020).

Abbildung 35: Schematischer Aufbau der Bohrlöcher für das Konzept der MBL in Israel.
Quelle: (Freete et al. 2020)



Fokus: Entwicklungen und Konzepte der ERDO

Gegenwertig beschäftigt sich die European Repository Development Organisation (ERDO²⁸) mit multinationalen Lösungen bei der Entsorgung radioaktiver Abfälle. Die ERDO befasst sich aktuell mit konkreten Fragestellungen wie den Kosten gemeinsamer Endlager, Fragen der Konditionierung und Verpackung insbesondere von Altabfällen und einer Referenzlösung für tiefe Bohrlochlagerung (Englert et al. 2023).

Die Konzepte des ERDO-Referenzmodells basieren dabei auf dem für die norwegische Entsorgungsgesellschaft Norwegian Nuclear Decommissioning (NND) erstellten Konzept (Fischer et al. 2020b). Dabei wird allerdings nur vom norwegischen Inventar ausgegangen, vertikale Bohrlöcher zu berücksichtigen und nur eine Größe von Behältern für alle Abfallarten angenommen (Englert et al. 2023).

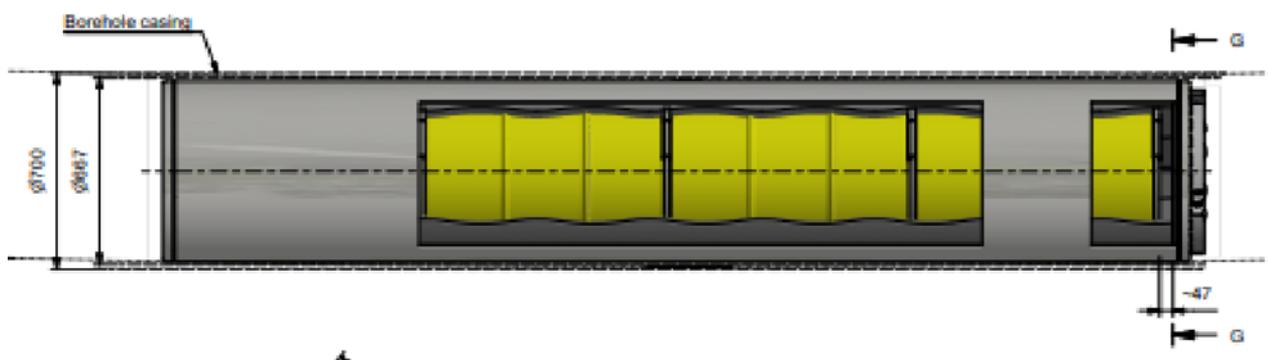
In (Kristiansen et al. 2022) werden neben der hauptsächlich angestrebten Lösung TBL für HLW-Abfälle auch Konzepte zur MBL von LILW-Abfällen in 200-Liter-Fässern beschrieben. Auch hier wird darauf hingewiesen, dass die meisten Staaten Mengen von Abfällen aufweisen, die eine Bohrlochlagerung als nicht effizient genug erscheinen lassen.

²⁸ Für weitere Information zur ERDO, siehe Kapitel 3.5; Internationale Entsorgungsoptionen

Am Beispiel von Österreich wird jedoch aufgezeigt, dass die MBL für geringe Mengen an LILW-LL-Abfällen eine potenzielle Lösung darstellen könnte.

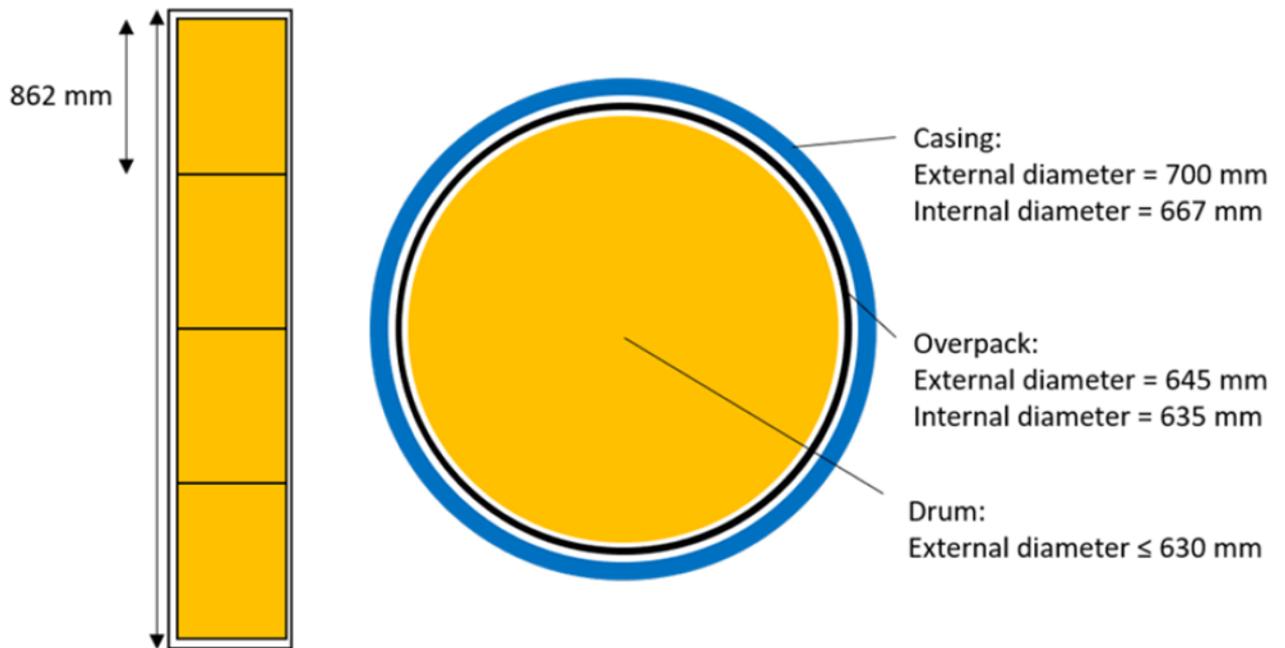
Das ERDO-Referenzkonzept für LILW-Abfälle erwägt dabei die Entsorgung der Abfälle in 200-Liter-Fässern, welche in speziell konzipierten Überbehältern (Abbildung 36) eingebracht werden und in den unteren 400 Metern der insgesamt 500 Meter tiefen Bohrlöchern eingelagert werden sollen. Die Überbehälter sind so konzipiert, dass sie vier Stück 200-Liter-Fässer übereinandergestapelt aufnehmen können. Die Überbehälter sind etwa 3,7 Meter lang und weisen einen äußeren Durchmesser von 645 Millimetern auf bei 5 Millimeter dicken Wänden aus Stahlkarbon.

Abbildung 36: Schematische Darstellung eines Überbehälters für die Bohrlochlagerung von 200-Liter-Fässern. Quelle: (Karlsen et al. 2021)



Die Bohrlochdurchmesser würden sich demnach auf etwa 700 Millimeter belaufen, um genügend Platz für technischen Barrieren zu erlauben (Abbildung 37). Die oberen 100 Meter würden dafür genutzt werden, die Bohrlöcher zu verschließen und den sicheren Einschluss und die Isolation der radioaktiven Abfälle von Mensch und Umwelt zu gewährleisten. Die Tiefe und Ausgestaltung der Bohrlöcher und der geotechnischen Barrieren bleiben jedoch stark standort- und wirtsgesteinspezifisch (Kristiansen et al. 2022).

Abbildung 37: Schematischer Aufbau eines Bohrlochs bei dem Konzept der ERDO. Quelle: (Fischer et al. 2020b)



(Kristiansen et al. 2022) führen ein, auf diesem Konzept aufbauendes, Rechenbeispiel für das österreichische Inventar an LILW-Abfällen an und rechnen mit einer Gesamtmenge von 60 m³ an LILW-LL-Abfällen, welche sich für die MBL eignen könnte. Es wird betont, dass sich die LILW-SL-Abfälle auf Grund ihrer Menge und die Sonderabfallgebinde wie die Konrad Container und Mosaik[®] Behälter auf Grund ihrer Form und Geometrie nicht für eine Bohrlochlagerung eignen würden (Abbildung 38).

Abbildung 38: Eignung der verschiedenen Typen von Abfallgebinden für die Bohrlochlagerung in Österreich. Quelle: (Kristiansen et al. 2022)

Waste type	Container type	Suitability for borehole disposal	m ³
Institutional waste (LILW-SL)	Drum (200 l)	Not suitable (too large total volume)	2215
Decommissioning waste (LILW-SL)	Mosaik [®]	Not suitable (too large container)	7
Decommissioning waste (LILW-SL)	Konrad type II	Not suitable (too large container)	23
Long-lived LILW	Drum (200 l)	Suitable for drum concept	60

Für die 60 m³ an LILW-LL-Abfällen könnten jedoch in ungefähr 300 Stück 200-Liter-Fässern in rund 75 der Überbehälter eingebracht werden, welche wiederum eine Gesamtstrecke von ~263 Metern als Einlagerungsbereich benötigen. Daraus ergäbe sie für Österreich die Option von ein bis drei Bohrlöchern für den Anteil an LILW-LL-Abfällen. (Kristiansen et al. 2022) rechnen darüber hinaus mit Kosten von zwei bis sechs Millionen Euro (zwei Millionen Euro pro Bohrloch) für ein solches Szenario. Die Bereitstellung der 75 Überbehälter würde weitere 1,13 Mio. Euro veranschlagen.

3.4.3 Vor- und Nachteile von Bohrlochlagerung

Im Folgenden werden die Vor- und Nachteile der Bohrlochlagerung dargestellt. Was die Vor- und Nachteile im Einzelnen für die Entsorgung radioaktiver Abfälle in Österreich bedeuten, folgt in der vergleichenden Bewertung der Optionen in Kapitel 4. Die Auflistung an dieser Stelle dient lediglich für eine erste Übersicht und generische Bewertung.

Vorteile:

- **Einschluss und Isolation:** Grundsätzlich böte die Endlagerung von radioaktiven Abfällen in Bohrlöchern – besonders in mittleren bis großen Tiefen – Potenzial als alternative Entsorgungsoption für den sicheren Einschluss und die Isolation der Abfälle. Daher wird der Einschluss und die Isolation von der Biosphäre als Vorteil bewertet. Dennoch ist der Nachweis eines funktionierenden Multibarrierenkonzeptes und der langfristigen passiven Sicherheit noch zu erbringen. Ohne diesen Nachweis bleibt auch die Frage nach der Notwendigkeit einer institutionellen Kontrolle und Überwachung offen.
- **Abfallflexibilität:** Konzepte zur Entsorgung von HLW- und LILW-LL-Abfällen und von umschlossenen Strahlenquellen in Bohrlöchern von verschiedener Tiefe werden aktuell entwickelt (IAEA 2020b; Bracke et al. 2016). Größe und Form der Abfälle sind bei der Bohrlochlagerung jedoch limitiert.
- **Zeitbedarfe:** Da sich bisher noch kein Staat auf die Bohrlochlagerung als Entsorgungsoption festgelegt hat, sind Aussagen bezüglich der Zeitbedarfe mit großen Unsicherheiten behaftet. Dies betrifft vor allem F&E-Bedarfe. Grundsätzlich ist dennoch anzunehmen, dass der Zeitbedarf für die Errichtung, den Betrieb und

Verschluss eines Bohrlochendlagers als geringer angesehen werden kann als der Zeitbedarf für Errichtung, den Betrieb und die Stilllegung eines Endlagerbergwerks.

- **Oberflächenanlagen:** Es ist davon auszugehen, dass die Oberflächenanlagen bei Bohrlochendlagern grundsätzlich kleiner ausfallen als bei den vergleichbaren Entsorgungsoptionen, auf größere Schächte, Rampen oder Bewitterungsanlagen kann verzichtet werden.
- **Kosten:** Bei der Bohrlochlagerung hängen die Kosten vor allem von der Tiefe der Bohrlöcher, den benötigten Bohrlochdurchmessern sowie den Wirtsgesteinen ab. Je tiefer die Bohrlöcher, desto technisch anspruchsvoller, aufwendiger und kostspieliger.

Daher gibt es auch an dieser Stelle große Unsicherheiten bezüglich der aufzubringenden Kosten.

Nachteile:

- **Technische Machbarkeit:** Der Nachweis der Langzeitsicherheit ist bisher nicht erbracht und die Sicherheitsbewertung beruht bisher auf generischen Annahmen. Darüber hinaus kann so gut wie keine Expertise aus bereits in der Praxis angewendeten Endlagern herangezogen werden. Viele technische Aspekte, wie die umsetzbaren Durchmesser, sowie technische Barrierenkonzepte, etc. sind noch offen und zu diskutieren.
- **Charakterisierung des Standorts:** Die Charakterisierung der natürlichen Barrieren kann sich bei der Bohrlochlagerung als wesentlicher Nachteil darstellen. Es ist noch offen, ob die Eignung der standortspezifischen natürlichen Barrieren mit Erkundungen von der Erdoberfläche aus nachgewiesen werden kann.
- **Aufnahmekapazität:** Auf Grund der geringen Bohrlochdurchmesser und daraus resultierenden zur Verfügung stehenden Räume ist die Menge und Form der Abfälle begrenzt. Bohrlöcher eignen sich auf Grund der räumlich begrenzten Einlagerungsbereiche eher für geringe Abfallvolumina.
- **Rückholbarkeit und Bergung:** Die Rückholung von Abfällen aus tieferen Bohrlöchern ist aufgrund des begrenzten Raumes und der Enge der Bohrlöcher mit großen Schwierigkeiten verbunden. Der Nachweis einer erfolgreichen Rückholung und

Bergung auch über längere Zeiträume hinweg muss erst noch erbracht werden und ist momentan als technisch unmöglich einzuschätzen. Inwiefern dies auch für FBL und MBL zutrifft, lässt sich momentan nicht verlässlich einschätzen.

- **F&E-Bedarfe:** Die (Endlagerkommission 2016) kommt zu dem Schluss, „eine Lagerung hoch-radioaktiver Abfälle in großen Tiefen mittels tiefer Bohrungen“ könne „unter der Voraussetzung einer aktiven Unterstützung von Forschung und Entwicklung sowie Verzicht auf eine Bergbarkeit mittelfristig in Deutschland eine denkbare technische Option sein“. Dies lässt sich ebenso auf die Endlagerung von LILW-Abfällen in Bohrlöchern übertragen. Dennoch müssten nationale Regelwerke im Hinblick auf Rückholbarkeit und Bergung gegebenenfalls überdacht werden.

Die Bohrlochlagerung stellt unter den in diesem Bericht aufgeführten Entsorgungsoptionen zum jetzigen Zeitpunkt die Option mit dem größten F&E-Bedarf dar.

Es bestehen bisher keine Betriebserfahrungen (siehe Techn. Machbarkeit). F&E-Bedarfe bestehen vor allem im Hinblick auf die Realisierbarkeit von Bohrlochdurchmessern, Rückholbarkeit und Bergung, und die Charakterisierung der Gesteine im Einlagerungsbereich bzw. der geologischen Barrieren.

3.5 Internationale Entsorgungsoptionen

Staaten der europäischen Union ist es auf Basis der EURATOM-Direktive 2011/70/EURATOM (Euratom 2011) möglich, gemeinsame Entsorgungsoptionen mit anderen Staaten umzusetzen.

Die IAEA (IAEA 2020b) verweist auf die Unsicherheiten und Risiken bei der Umsetzung eines multinationalen Endlagers und empfiehlt, als Staat nicht ausschließlich auf eine solche Strategie zu setzen. Eine nationale Strategie sollte ebenfalls angestrebt werden („dual track“).

Bei den multinationalen Entsorgungsoptionen stellt die IAEA (IAEA 2020b) folgende drei Optionen vor:

- „Add-on“ Szenarium, bei dem eine Nation mit eigenem großen Entsorgungsprogramm radioaktive Abfälle eines Landes mit kleinem Inventar aufnimmt.

- Supranationales Szenarium, bei dem eine Entsorgungsanlage für mehr als eine Nation von einem internationalen Management errichtet und betrieben wird.
- Partner-Szenarium bei dem zwei oder mehr Länder ein oder mehrere gemeinsame Endlager betreiben.

Für das Add-on Szenario gibt es bereits Beispiele. So übernehmen beispielsweise die USA die abgebrannten Brennelemente aus ihrer Herstellung von Forschungsreaktoren verschiedener Länder. Das Land Luxemburg kann seinen radioaktiven Abfall an Belgien abgeben. Generell ist die Bereitschaft der meisten Staaten, radioaktiven Abfall aus dem Ausland zu importieren, aber eher gering und bezieht sich, wenn dies doch geschieht, auf spezifische Fälle im Zusammenhang mit Forschungsk Kooperationen oder der Rückführung ausgedienter Strahlenquellen oder abgebrannter Brennstoffe an die jeweiligen Hersteller.

Eine Zusammenstellung der IAEA zu nationalen Politiken einzelner Staaten bezüglich des Vorgehens bei hochradioaktiven Abfällen bzw. abgebrannten Brennstoffen findet sich in der nachfolgenden Tabelle mit Stand 2016 (IAEA 2016).

Tabelle 2: Nationale Politik im Hinblick auf den Import und Export hochradioaktiver Abfälle, Stand 2016. Quelle: (IAEA 2016)

Country	Disposal policy for HLW/Spent fuel, attitude towards international repository	Import for disposal permitted?	Export permitted?
Australia	National	Yes (under certain conditions)	Yes (under certain conditions)
Austria	Return to USA (research reactor only)	No	Yes (under certain conditions)
Belgium	Dual track; 1st priority national	Yes (under certain conditions)	Yes (under certain conditions)
Croatia	No official policy	No	Left open
Czech Republic	Dual track; 1st priority national	No	Yes (under certain conditions)
Finland	National only	No	No
France	National only	No	Yes (under certain conditions)
Germany	National only	Yes (under certain conditions)	Yes (under certain conditions)
Hungary	Dual track; 1st priority national	No	Yes
Italy	No official policy	No	Yes (for treatment)
Japan	National only	Yes (under certain conditions)	Yes (under certain conditions)
Latvia	Dual track	No	Yes (under certain conditions)
Lithuania	Dual track	No	Yes (under certain conditions)
Netherlands	Dual track	Left open	Left open
Romania	No official policy	No	Yes (under certain conditions)
Russian Federation	National only	Yes (under certain conditions)	Yes (under certain conditions)
Slovakia	Dual track; 1st priority national	No	Yes (under certain conditions)
Slovenia	Dual track	Yes (under certain conditions)	Yes (under certain conditions)
Spain	No official policy	Yes (under certain conditions)	Yes (under certain conditions)
Sweden	National only	Yes (small quantities, under certain conditions)	Yes (under certain conditions)
Switzerland	Dual track; 1st priority national	Yes (under certain conditions)	Yes (under certain conditions)
United Arab Emirates	Dual track	No	Yes (under certain conditions)
United Kingdom	National only	Yes (under certain conditions)	Yes (under certain conditions)
United States of America	National only	Yes (under certain conditions)	Yes (under certain conditions)

Ein supranationales Szenarium wurde bisher nicht umgesetzt. Es gab aber Vorhaben z. B. unter europäischer Förderung zur Umsetzung regionaler europäischer Endlager (z. B. SAPIERR und SAPIERR II (Chapman et al. 2008)). 2002 wurde in der Schweiz die „Association for Regional and International Underground Storage“ (ARIUS)²⁹ gegründet, die als Plattform für Entwicklung und Austausch zu multinationalen Entsorgungsoptionen fungierte. U. a. die Arbeit von ARIUS führte 2021 zur Gründung der „European Repository Development Organisation“ (ERDO)³⁰ in den Niederlanden (Hore-Lacy 2021). Österreich war Mitglied in der die Gründung vorbereitenden ERDO working group aber ist bisher nicht in der nun gegründeten ERDO Association.

Die ERDO Association ist eine Vereinigung von Unternehmen und Behörden verschiedener europäischer Nationen (Englert et al. 2023). Die ERDO befasst sich mit multinationalen Lösungen bei der Entsorgung radioaktiver Abfälle. Aktuell zählen zu den Mitgliedsstaaten Kroatien, Dänemark, Italien, die Niederlande, Norwegen, Polen und Slowenien. Die ERDO befasst sich aktuell mit konkreten Fragestellungen wie den Kosten gemeinsamer Endlager, Fragen der Konditionierung und Verpackung insbesondere von Altabfällen und einer Referenzlösung für tiefe Bohrlochlagerung (siehe dazu Kapitel 3.4).

Weitere multinationale Initiativen sind die „Global Nuclear Power Infrastructure“ (GNPI) der russischen Föderation von 2006 und das „International Framework for Nuclear Energy Cooperation“ (IFNEC) geführt von den USA. Beide Organisationen zielen auf den gesamten Brennstoffkreislauf und insbesondere die Kernbrennstoffanreicherung ab.

Für das Partner-Szenarium gibt es hinsichtlich eines gemeinsamen Endlagers ebenfalls noch keine Beispiele. Generell lassen sich verschiedene Varianten für Partnerschaften von zwei oder mehr Staaten bei der Entsorgung ableiten wie z. B.:

- ein gemeinsames Endlager für eine (oder mehrere) Abfallkategorie(n) in einem der Partnerstaaten,
- mehrere gemeinsame Endlager für verschiedene Abfallkategorien z. B. aufgeteilt auf die Partnerstaaten,

²⁹ Weitere Informationen s. <http://www.arius-world.org/>

³⁰ Weitere Informationen s. <https://www.erdo.org/>, Vorläufer war die ERDO working group, die ebenfalls Informationen bereithält unter <http://www.erdo-wg.com/>

- gemeinsame Nutzung von Abfallbehandlungsanlagen (festinstalliert in einem der Partnerländer oder mobile Anlagen),
- Tausch von radioaktiven Abfällen zur Entsorgung, angepasst an die Entsorgungsoptionen des jeweiligen Landes³¹.

Die IAEA beschreibt in ihrem Bericht “Challenges for Initiating Multinational Cooperation for the Development of a Radioactive Waste Repository“ (IAEA 2016) anhand eines hypothetischen Referenzszenarios, wie ein multinationales Endlager in einem kooperativen Ansatz entwickelt werden kann. Zu berücksichtigen ist ein breites Spektrum an Themen, die jeweils alle Partnerstaaten berührt. Dies sind z. B. völkerrechtliche Fragestellungen, vertragliche Aspekte zwischen den Staaten, wirtschaftliche und finanzielle Vereinbarungen, Haftungsfragen, Fragen der Sicherung und der atomrechtlichen Regulierung sowie der grenzüberschreitenden Abfalltransporte. Zudem sind gesellschaftlich relevante Fragestellungen z. B. der Akzeptanz zu klären. So nennt der Bericht als größte Herausforderung die Entwicklung und Durchführung eines Standortauswahlprozesses, der die Zustimmung aller Interessengruppen findet.

Internationale Kooperation gibt es vor allen Dingen auf der Ebene von Forschung und Entwicklung insbesondere hinsichtlich der Endlagerung in tiefen geologischen Formationen. Diese werden entweder binational vereinbart oder unter der Trägerschaft beispielsweise der IAEA, der OECD/NEA oder der europäischen Union organisiert. Beispielhaft zu nennen sind die Forschungsk Kooperationen bei den Untertagelaboren in der Schweiz und Frankreich. Auf europäischer Ebene besteht derzeit das Forschungsprogramm European joint programme on radioactive waste management (EURAD)³². Darüber hinaus gibt es Plattformen wie die Implementing Geological Disposal of radioactive waste Technology Platform (IGD-TP)³³, die dem Wissensaustausch dienen, um Forschung effizienter zu machen.

Basierend auf der Tatsache, dass derzeit noch keine konkreten Vorschläge für eine internationale Entsorgungsoption vorliegen, geht dieser Ansatz bisher nicht über den Status „Zusatzoption“ hinaus. Da er zum jetzigen Standpunkt keine realistische Alternative darstellt,

³¹ Im Zusammenhang mit der Rückführung von radioaktiven Abfällen aus der Wiederaufarbeitung in Frankreich und dem Vereinigten Königreich erfolgten solche Tauschs beispielsweise mit Deutschland.

³² Siehe <https://www.ejp-eurad.eu/>

³³ Siehe <https://igdtp.eu/>

werden internationale Entsorgungsoptionen bei der vergleichenden Bewertung der Entsorgungsoptionen nicht weiter betrachtet.

4 Vergleichende Bewertung

Der vergleichenden Bewertung von Optionen für die Entsorgung der LILW-Abfälle in Österreich liegen die in Kapitel 2 aufgeführten Randbedingungen Österreichs als wesentliche Voraussetzungen zu Grunde.

Aus dem aktuellen Sachstand ist laut (NES 2022) zu entnehmen, dass bis zum Jahr 2045 insgesamt ein Gesamtvolumen von etwa 3.500 m³ endzulagernde Abfälle anfallen werden. Dabei geht man von einem LILW-LL-Anteil von maximal 100 m³ in etwas weniger als 500 Abfallgebinden (200-Liter-Fässer) aus. Die Berechnungen der NES leiten daraus einen Volumenbedarf für die Gesamtmenge an endlagerfähig verpackten Abfällen von etwa 17.700 m³ ab. Wir gehen auf Basis dieser Annahmen von einem maximalen anteiligen Volumen an endlagerfähig verpackten LILW-LL-Abfällen von 500 m³ aus.

Neben den vorhandenen Mengen des Abfallinventars und dessen Klassifizierung ist ebenfalls der Zeithorizont zu berücksichtigen, da eine sichere und schnelle Lösung bis 2045 von Interesse ist, um u. a. Auswirkungen auf die Zwischenlagerung der radioaktiven Abfälle durch eine mögliche Verzögerung bei der Endlagersuche zu vermeiden.

Wesentliche Anforderungen ergeben sich aus dem Anspruch der langfristigen passiven Sicherheit nach § 141 Absatz 4. StrSchG des Einschlusses und der Isolation der radioaktiven Abfälle von Mensch und Umwelt.

Weitere Voraussetzungen leiten sich aus dem Sachstand regulatorischer Anforderungen an die Entsorgung ab. Das (BMK 2022) geht demnach von einem faktengestützten und dokumentierten Entscheidungsprozess aus. Diesem komplexen mehrstufigen Entscheidungsprozess soll außerdem eine Standortauswahl nach international anerkannten Sicherheitsstandards zu Grunde liegen. Weitergehend soll das Entsorgungskonzept so aufgebaut sein, dass durch Eingriffe oder Wartungsarbeiten unzumutbare Belastungen für zukünftige Generationen vermieden werden. Trotzdem oder gerade deswegen gibt es den Anspruch, dass bei der Konzeption der Entsorgung Optionen zur Rückholung oder Bergung stets miteingeplant werden. Bei diesen Anforderungen wird nicht unterschieden in langlebige und kurzlebige radioaktive Abfälle.

Für die vergleichende Bewertung von Optionen für die Entsorgung schwach- und mittelradioaktiver Abfälle werden die einzelnen Entsorgungsoptionen unter Berücksichtigung der formulierten Voraussetzungen aufbauend auf den in Kapitel 3 vorgestellten Bewertungskriterien eingeordnet und miteinander verglichen. Die Einordnung erfolgt mit Hilfe einer verkürzten Likert-Skala³⁴.

In der Likert-Skala stehen

- „-“ für „(Das Risiko/Die Chance) trifft überhaupt nicht zu“,
- „-“ für „(Das Risiko/Die Chance) trifft eher nicht zu“,
- „+“ für „(Das Risiko/Die Chance) trifft eher zu“ und
- „++“ für „(Das Risiko/Die Chance) trifft voll und ganz zu“.

Auf Basis dieser Bewertung wurde die Likert-Skala auf die Bewertungskriterien wie folgt angepasst:

- „-“ für „überhaupt nicht günstig“,
- „-“ für „eher nicht günstig“,
- „+“ für „eher günstig“ und
- „++“ für „sehr günstig“

Im Folgenden werden die Bewertungen (siehe Tabelle 3 und Tabelle 4), welche sich aus der qualitativen Anwendung der Bewertungskriterien und dem Optionenvergleich ergeben, erläutert. Dabei wird zunächst auf den Abfallstrom der LILW-SL-Abfälle eingegangen. Die

³⁴ Die Likert Skala ist benannt nach ihrem Begründer, dem amerikanischen Sozialforscher Rensis Likert. Sie besteht aus einer Abfolge von Aussagen, die auf einer vorgegebenen Antwortskala abstuftend zustimmend oder ablehnend bewertet werden. Im Gegensatz zu Binärfragen ermöglicht die Likert Skala eine gestaffelte Bewertung der Aussagen. Am häufigsten werden fünf- oder siebenstufige Likert-Skalen bei Befragungen genutzt. Die mittlere Stufe bietet hierbei eine neutrale Bewertung der Aussage. Bei der verkürzten Likert-Skala steht diese neutrale Bewertung nicht zur Verfügung.

Einschätzung für die LILW-LL-Abfälle folgt anschließend in Form einer Delta-Beschreibung, welche auf die gesondert betrachteten Aspekte eingeht.

4.1 Endlageroptionen für LILW-SL-Abfälle

Tabelle 3 zeigt die vergleichende Bewertung der verschiedenen Entsorgungsoptionen hinsichtlich der Entsorgung der LILW-SL-Abfälle. Erläuterungen zur Einschätzung und Vergleich der einzelnen Optionen sind nachfolgend aufgeführt.

Tabelle 3: Bewertung der einzelnen Entsorgungsoptionen für die Entsorgung der LILW-SL-Abfälle in Österreich. Verkürzte Likert-Skala: -- für „überhaupt nicht günstig“, - für „eher nicht günstig“, + für „eher günstig“ und ++ für „sehr günstig“. Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut e. V.

Bewertungskriterien	Entsorgungsoptionen			
	Oberflächenlagerung	Lagerung mittlerer Tiefe	geologische Tiefenlager	Bohrlochlagerung
Einschluss & Isolation	-	++	++	+
Techn. Machbarkeit	++	++	++	--
Zeitbedarfe	++	+	-	-
Charakterisierung des Standorts	++	+	+	-
Abfallflexibilität	--	++	++	-
Aufnahmekapazität	++	++	++	--
Oberflächenanlagen	-	+	+	++
Rückholbarkeit & Bergung	+	-	-	--
Kosten	++	+	-	--
F&E-Bedarfe	++	++	++	--

Einschluss und Isolation

Nach aktuellem Erfahrungsstand kann davon ausgegangen werden, dass für alle vier Entsorgungsoptionen in Bezug auf Einschluss und Isolation der radioaktiven Abfälle ein ausreichendes Sicherheitskonzept für die Entsorgung von LILW-SL-Abfällen gewährleistet werden kann. Allerdings können nicht alle Entsorgungsoptionen die im österreichischen Strahlenschutzgesetz geforderte langfristige passive Sicherheit darstellen (s. Kapitel 2.3).

Für die Entsorgung der LILW-SL-Abfälle in der Oberflächenlagerung sind im Besonderen Fragen bezüglich unzumutbarer Belastungen für zukünftige Generationen zu berücksichtigen, da zukünftige Aktivitäten, wie die institutionelle Überwachung und Kontrolle sowie die Sicherung der Anlagen und der Abfälle vor dem Einwirken Dritter nach der Betriebsphase ungünstige Belastungen für zukünftige Generationen darstellen können. Eine langfristig passive Sicherheit liegt dem Konzept nicht zugrunde. Institutionelle Überwachungen und Kontrollen gestalten sich oft aufwendig und kostspielig. Es liegen keine Erfahrungen vor, ob sie über die erforderliche Zeitdauer von einigen hundert Jahren in ausreichender Qualität sichergestellt werden kann. Insgesamt führt dies zu einer grundsätzlich eher nicht günstigen (-) Bewertung der Oberflächenlagerung von LILW-SL-Abfällen in Österreich mit leichten Abstufungen im Vergleich zu den anderen Optionen.

Der sichere Einschluss und die Isolation der LILW-SL-Abfälle ist grundsätzlich bei der oberflächennahen Entsorgung – insbesondere bei der geologischen Endlagerung in mittleren Tiefen – sowie der Entsorgung in geologischen Tiefenlagern auf Grund der angestrebten Sicherheitskonzepte am besten (++) sichergestellt. Die Konzepte beider Optionen basieren auf der Idee der langfristigen und passiven Sicherheit und hängen maßgeblich von der Ausgestaltung der standortspezifischen Barrierenwirksamkeit ab. Darüber hinaus kann prinzipiell angenommen werden, dass mit der Tiefe die Einschlusswirksamkeit der natürlichen Barrieren zunimmt.

Die vorhandenen Konzepte der Bohrlochlagerung versprechen grundsätzlich ein großes Potenzial für einen sicheren Einschluss und die Isolation der radioaktiven Abfälle. Jedoch weist die Bohrlochlagerung nach jetzigem Stand von W&T im Vergleich zu den weiteren verfügbaren Entsorgungsoptionen die größten Unsicherheiten auf. Auch wenn der Einschluss und die Isolation der radioaktiven Abfälle grundsätzlich als eher günstig (+) bewertet wurde, müssen hier Abzüge vorgenommen werden, da die bisherigen Konzepte noch keinen in der Praxis erprobten Nachweis der langfristigen passiven Sicherheit erbracht haben. Zudem basieren die bisherigen Sicherheitsanalysen in der Regel auf generischen Annahmen im

Hinblick auf die geologischen Rückhalteeigenschaften der natürlichen Barrieren. Daher bleiben gegenwärtig auch Fragen bezüglich der Notwendigkeit nach einer institutionellen Kontrolle und Überwachung offen.

Technische Machbarkeit

Sowohl für die beiden Entsorgungsoptionen der oberflächennahen Entsorgung (Oberflächenlagerung und Lagerung mittlerer Tiefe) als auch für die geologische Tiefenlagerung gibt es zahlreiche Beispiele für sich in Planung, Errichtung und Betrieb befindende Anlagen für die sichere Entsorgung von LILW-SL-Abfällen. Für diese Beispiele konnten soweit standort-spezifische Sicherheitsnachweise erbracht werden. Dennoch hat es in der Vergangenheit z. B. in Frankreich bei der Anlage der Oberflächenlagerung „Centre de la Manche“ und in den Vereinigten Staaten am Beispiel des Endlagers WIPP sowie in Deutschland am Beispiel der Asse Vorfälle gegeben, bei denen Mängel und Versäumnisse bei der Einhaltung der WAC oder des Sicherheitskonzeptes dazu geführt haben, Abfälle rückzuholen und /oder die Endlager zu schließen.

Nichtsdestotrotz sind in der Summe alle drei Entsorgungsoptionen für die Entsorgung von LILW-SL-Abfällen mit sehr günstig (++) zu bewerten. Dennoch ist festzuhalten, dass der technische Aufwand und Schwierigkeitsgrad für Anlagen der geologischen Endlagerung, wie Anlagen der Lagerung mittlerer Tiefe und geologischen Tiefenlagern generell als hoch einzuschätzen sind. Es ist anzunehmen, dass der Aufwand mit zunehmender Tiefe der Anlage ansteigt.

Für die Bohrlochlagerung für die Entsorgung von LILW-SL-Abfällen stehen weder sich in Betrieb befindende Beispiele zur Verfügung, noch gibt es uns bekannte Ansätze zur Konzeption und Planung von Bohrlöchern zur Entsorgung von LILW-SL-Abfällen. Aufgrund dessen und der teilweise nicht ausgereiften generischen Konzepte und zu erwartenden hohen F&E-Bedarfe ist diese Entsorgungsoption zum jetzigen Zeitpunkt als überhaupt nicht günstig (--) zu bewerten.

Zeitbedarf

Grundsätzlich hängen die Zeitbedarfe, die für die jeweiligen Entsorgungsoptionen in Anspruch genommen werden müssen, von verschiedenen Faktoren ab. Zeitbedarf besteht für den Prozess der Standortentscheidung und dem Genehmigungsverfahren. Zeitbedarf besteht außerdem für die Phasen der Erkundung, der Planung und Ausgestaltung des

Sicherheitskonzepts, für die Errichtung, den Einlagerungsbetrieb, ggf. Überwachungsphasen und den Verschluss.

Die internationalen Beispiele zeigen, dass bereits abgeschlossene oder noch laufende Standortauswahlverfahren und Entscheidungsprozesse generell mehrere Jahre bis wenige Jahrzehnte andauern können. Auch die Genehmigungsverfahren nehmen mindestens einige Jahre in Anspruch. Zu berücksichtigen sind jeweils die Belange der Öffentlichkeit hinsichtlich eines transparenten Entscheidungsprozesses. Ob diesbezüglich eine Entsorgungsoption einen Vorteil gegenüber einer anderen hat, ist nicht abschätz- oder belegbar. Entsprechend wird dieser Aspekt in die Bewertung nicht einbezogen.

Grundsätzlich bieten die Optionen der Oberflächenlagerung, der Lagerung mittlerer Tiefe in Form der geologischen Endlagerung und geologische Tiefenlager den Vorteil, dass Konzepte zur Entsorgung von LILW-SL-Abfällen bereits bestehen und der Nachweis des Sicherheitskonzeptes und der technischen Machbarkeit erbracht wurde. Nichtsdestotrotz sind standortspezifische Nachweise zu erbringen, die anhand der nationalen Anforderungen Österreichs zu bewerten sind.

Für die Errichtung der Anlagen der Oberflächenlagerung zur Entsorgung von LILW-SL-Abfällen sind im Vergleich eher geringere Zeitbedarfe von einzelnen bis wenigen Jahren anzunehmen. Alle Schritte zur Errichtung der Anlagen können von der Erdoberfläche aus ohne größeren Aufwand, wie z. B. dem Auffahren von Untertagebergwerken durchgeführt werden. Die Betriebsdauer dieser Anlagen für die aktive Einlagerung hängt von den Mengen des einzulagernden Inventars ab. Weiterhin ist zu berücksichtigen, inwieweit auch zukünftig (nach 2045) radioaktive Abfälle anfallen werden. In Angesicht der geringen Mengen an LILW-SL-Abfällen, die Österreich zu entsorgen hat, ist anzunehmen, dass die Betriebsphasen deutlich kürzer als im internationalen Vergleich zu veranschlagen sind. Dennoch bleibt offen, wie sich die Notwendigkeit der institutionellen Kontrolle und Überwachung der Anlagen auf die Dauer der Betriebsphase auswirkt. Insgesamt können für Planung, Errichtung und der Betrieb von Anlagen zur Oberflächenlagerung exklusive Standortauswahl und Entscheidungsprozess Zeitbedarfe von einem bis zu einigen wenigen Jahrzehnten ausgegangen werden. Damit ist anzunehmen, dass die Oberflächenlagerung die im Vergleich am schnellsten umsetzbare Entsorgungsoption darstellt. Im Hinblick auf den Anspruch einer schnellen Lösung der Entsorgung der radioaktiven Abfälle bis 2045 (BMK 2022) wird diese Option daher als sehr günstig (++) eingeschätzt.

Die Zeitbedarfe, die für die Entsorgung der LILW-SL-Abfälle in Anlagen der Lagerung mittlerer Tiefe benötigt werden, orientieren sich je nach Auslegung des Sicherheitskonzeptes an den Zeitbedarfen der oberflächennahen Entsorgung oder an denen der geologischen Tiefenlager. Es ist anzunehmen, dass sich diese Entsorgungsoption als Mischform auch bei den Zeitbedarfen zwischen den ihr zu Grunde liegenden Sicherheitskonzepten einordnet. Prinzipiell kann von einem höheren technischen Aufwand als bei Anlagen der Oberflächenlagerung ausgegangen werden. Andererseits kann angenommen werden, dass der technische Aufwand bei Anlagen der geologischen Endlagerung in mittleren Tiefen geringer ausfällt als bei geologischen Tiefenlagern. Daher wird die Entsorgungsoption der Lagerung mittlerer Tiefe grundsätzlich als eher günstig (+) eingeschätzt. Nichtsdestotrotz sind mit Zeitbedarfen von ggf. einigen wenigen Jahrzehnten für Planung, Errichtung und den Betrieb der Anlagen zu rechnen. Im Hinblick auf den Anspruch einer schnellen Lösung der Entsorgung der radioaktiven Abfälle bis 2045 (BMK 2022) bedeutet dies, dass ggf. mit einer verlängerten Zwischenlagerung der radioaktiven Abfälle gerechnet werden muss.

Die Beispiele im internationalen Vergleich zeigen, dass die Errichtung von geologischen Tiefenlagern prinzipiell am meisten Zeit erfordern werden. Dabei ist allerdings zu berücksichtigen, dass die betrachteten Beispiele für die Einlagerung radioaktiver Abfälle mit langen Halbwertszeiten und/oder höherer Aktivität vorgesehen sind, was einen höheren Zeitaufwand bei der Erkundung und Planung sowie in der Betriebsphase bei Handhabungsvorgängen erwarten lässt. Die Zeitbedarfe hängen maßgeblich von Tiefe der Anlagen, den Wirtsgesteinen und den Abfallvolumina ab. Grundsätzlich kann mit Zeitbedarfen von einigen Jahrzehnten gerechnet werden. Diese Zeitspannen sind so weit übertragbar für die Betriebsphase und den anschließenden Verschluss anzunehmen. Damit stellen die geologischen Tiefenlager die Option dar, für die tendenziell am meisten Zeit eingeplant werden muss. Im Hinblick auf den Anspruch einer schnellen Lösung der Entsorgung der radioaktiven Abfälle bis 2045 (BMK 2022) bedeutet dies, dass mit einer verlängerten Zwischenlagerung der radioaktiven Abfälle gerechnet werden muss. Vor diesem Hintergrund ist die Entsorgungsoption geologische Tiefenlager für LILW-SL-Abfälle tendenziell als eher nicht günstig (-) einzuschätzen.

Beim Konzept der Bohrlochlagerung bestehen große Unsicherheiten bezüglich der Zeitbedarfe. Einerseits ist festzuhalten, dass die reine Errichtung, Einlagerung während der Betriebsphase und der Verschluss ähnlich wenig Zeit wie bei der Errichtung von Anlagen zur oberflächennahen Entsorgung in Anspruch nehmen. Hierfür könnten einige wenige bis mehrere Jahre benötigt werden. Auf Grund der großen Unsicherheiten bezüglich der technischen Machbarkeit und der ausstehenden F&E-Bedarfe für die Entwicklung eines

konkreten Sicherheitskonzepts können die Zeitbedarfe für die Bohrlochlagerung einschließlich F&E und Planung jedoch nicht seriös abgeschätzt werden. Zum jetzigen Zeitpunkt ist diese Entsorgungsoption mit Hinblick des Anspruches einer schnellen Lösung der Entsorgung der radioaktiven Abfälle für 2045 (BMK 2022) trotz des hohen Potentials einer kurzen Zeitdauer für Errichtung, Betrieb und Verschluss auf Grund der großen Unsicherheiten nur mit eher nicht günstig (-) einzuschätzen.

Charakterisierung des Standorts

Die Charakterisierbarkeit der Standorte entscheidet maßgeblich über den Ausgang der Standortauswahl und des Entscheidungsprozesses und hat Auswirkungen auf den Beteiligungsprozess und die Akzeptanz der Öffentlichkeit. Des Weiteren beeinflusst die Umsetzbarkeit und der Aufwand der geologischen Erkundungen zum Nachweis der spezifischen geologischen Eignung des Standorts die Zeitbedarfe, welche für die Planung, die Standortauswahl und den Entscheidungsprozess erforderlich sind.

Für die Bewertung von Oberflächenanlagen sind hier vorrangig die oberflächennahen Schichten relevant. Die geologischen Erkundungen können mit technisch erprobten Methoden von der Erdoberfläche aus erfolgen. Es ist davon auszugehen, dass für die oberflächennahe Entsorgung keine untertägigen Erkundungen erforderlich sein werden. Daher ist anzunehmen, dass die Charakterisierung des Standorts bei der Oberflächenlagerung und der Lagerung mittlerer Tiefe nach dem Sicherheitskonzept der oberflächennahen Entsorgung weniger aufwendig und kostspielig ausfällt. Daher ist die Charakterisierung des Standorts für die Optionen der oberflächennahen Entsorgung generell als sehr günstig (++) einzuschätzen.

Die Charakterisierung des Standorts bei der geologischen Endlagerung stellt einen erheblichen technischen und finanziellen Aufwand dar und kann größere Auswirkungen auf die Zeitbedarfe haben allerdings mit dem deutlich ambitionierteren Ziel einer langfristig passiven Sicherheit. Dennoch haben zahlreiche internationale Beispiele gezeigt, dass dieses Vorgehen technisch machbar und ohne größere Schwierigkeiten durchzuführen ist. Daher bewerten wir die Charakterisierung des Standorts bei den Optionen der Lagerung mittlerer Tiefe in Form der geologischen Endlagerung und den geologischen Tiefenlagern grundsätzlich als eher günstig (+).

Im Gegensatz dazu stellt die Charakterisierung des Standorts bei der Entsorgungsoption der Bohrlochlagerung eine wesentliche Herausforderung dar und kann sich je nach Tiefe des

Bohrlochkonzepts als Nachteil herausstellen. Da grundsätzlich geologische Erkundungen zur Charakterisierung des Standorts bei der Bohrlochlagerung nur von der Erdoberfläche vorgenommen werden können, muss der wirtsgestein- und standortspezifische Nachweis der Standorteignung mit übertägigen Methoden erbracht werden. Zwar bieten geophysikalische Bohrlochmethoden kombiniert mit bspw. seismischen Erkundungen von der Erdoberfläche aus, eine gute Möglichkeit, den Untergrund zu charakterisieren, ob dies jedoch für die Standortauswahl ausreicht und dem Anspruch des Entscheidungsprozesses, bleibt zum jetzigen Stand von W&T offen. Die Charakterisierung ist u. a. abhängig von der Wahl des Wirtsgesteins und der Tiefe der Bohrlöcher. Daher schätzen wir die Charakterisierung des Standorts für die Option der Bohrlochlagerung zum jetzigen Zeitpunkt mit eher nicht günstig (-) ein.

Abfallflexibilität

Die Oberflächenlagerung bietet neben der Möglichkeit, LILW-SL-Abfälle zu entsorgen, für Abfälle mit höherer Anfangsradioaktivität oder Nukliden mit Halbwertszeiten von über 30 Jahren keinen sicheren Einschluss und Isolation der radioaktiven Abfälle von Mensch und Umwelt. Daher besteht auch keine Möglichkeit zu einer kombinierten Entsorgung von LILW-SL- und -LL-Abfällen. Aufgrund dessen schätzen wir die Abfallflexibilität im Hinblick auf ein mögliches Kombilager für überhaupt nicht geeignet (--) ein. Zudem kommt auf Grund der geringeren passiven Rückhalteeigenschaften den WAC besondere Bedeutung zu teil. Dies ist ebenso für die Lagerung mittlerer Tiefe nach dem Prinzip der oberflächennahen Entsorgung anzunehmen.

Demgegenüber können Anlagen zur Lagerung mittlerer Tiefe, die auf dem Konzept der geologischen Endlagerung fußen, ebenso wie geologische Tiefenlager neben LILW-SL-Abfällen auch LILW-LL-Abfälle aufnehmen. Damit wäre, was die Abfallflexibilität, Abfallgebindeformen und -geometrien angeht eine kombinierte Endlagerung beider Abfallströme gegeben. Daher schätzen wir die Abfallflexibilität der Lagerung mittlerer Tiefe, die auf dem Konzept der geologischen Endlagerung beruhen und der geologischen Tiefenlager als sehr geeignet (++) ein.

Prinzipiell gilt dies auch für die geologische Endlagerung von radioaktiven Abfällen in Bohrlöchern. Da die Bohrlochlagerung jedoch hinsichtlich der Größe und Formen der Abfallgebinde Limitationen aufweist, muss bei der Bewertung eine Abstufung vorgenommen werden. Dennoch ist eine kombinierte Entsorgung von LILW-SL- und -LL-Abfällen in Anlagen zur Bohrlochlagerung nicht unmöglich. Es bestehen jedoch große technische und ökonomische

Zweifel. Daher schätzen wir die Abfallflexibilität für die Option der Bohrlochlagerung also als eher nicht geeignet (-) ein.

Aufnahmekapazität

Grundsätzlich können sowohl Anlagen zur Oberflächenlagerung, Lagerung mittlerer Tiefe und geologische Tiefenlager große Mengen an radioaktiven Abfällen aufnehmen. Alle Optionen bieten eine große Flexibilität hinsichtlich der Mengen von aufzunehmenden Abfällen und es sind keine größeren Schwierigkeiten in der Unterbringung von Abfallgebinden der üblichen Form, Größe oder Geometrie zu erwarten. Bei der geologischen Endlagerung hängt die Aufnahmekapazität ggf. von den geologischen Begebenheiten und der Größe des ausgewiesenen Einlagerungsbereich ab. Bei der im Vergleich zu anderen Staaten sehr geringen Menge an LILW-SL-Abfällen in Österreich sind bei allen drei aufgeführten Entsorgungsoptionen jedoch keine Schwierigkeiten hinsichtlich der Aufnahmekapazität zu erwarten. Für alle drei Entsorgungsoptionen wird die Aufnahmekapazität daher mit sehr günstig (++) eingeschätzt.

An internationalen Beispielen lassen sich erste Annahmen zur Größe der benötigten Entsorgungskonzepte treffen. Zieht man z. B. die französischen Grabenanlagen der Oberflächenlagerung der Anlage CIREs heran, würde eine der Grabenzellen mit einer Aufnahmekapazität von bis zu 34.000 m³ an LILW-SL-Abfällen für das gesamte österreichische LILW-SL-Inventar ausreichen. Auch bei dem Modell der spanischen Anlage El Cabril würde eine Grabeneinheit ausreichen. Die Betongewölbe der französischen Anlage l'Aube fassen etwa 5.000 m³ an Abfällen pro Gewölbe. In Österreich würden also drei bis vier solcher Betongewölbe für die Mengen an LILW-SL-Abfälle ausreichen.

Ein Silo der slowenischen Konzeption im Endlager Vrbina fasst rund 9.400 m³ an Abfällen. Die Silos können als Mischform zwischen Oberflächenlagerung und oberflächennaher Lagerung in Form der oberflächennahen Entsorgung verstanden werden. Mit zwei solcher Silos wäre das gesamte LILW-SL-Inventar von Österreich somit abgedeckt.

In den schwedischen SFR-Anlagen werden bei der Lagerung mittlerer Tiefe in Form der geologischen Endlagerung deutlich größere Mengen an LILW-SL-Abfällen in verschiedenen großen Betongewölben eingelagert. Einige der Gewölbezellen fassen um die 4.000 m³ an Abfällen und können auch als Referenz für geologische Tiefenlager herangezogen werden.

International wird die Bohrlochlagerung als Entsorgungsoption für LILW-SL-Abfälle auf Grund der Mengen als nicht sinnvoll angesehen. Selbst die österreichischen Mengen an LILW-SL-Abfällen würden je nach Konzept eine große Anzahl an Bohrlöchern erfordern. Als Beispiel können die Berechnungen von (Kristiansen et al. 2022) herangezogen werden. Für die 17.200 LILW-SL-Abfallgebinde ergeben sich mit den vorgeschlagenen Überbehältern (4 Abfallgebinde pro Überbehälter) ein Einlagerungsbereich mit der Bohrstrecke von knapp über 15.000 Metern. In Bohrlöcher mit 500 Meter maximaler BLT und oberer ET von 100 Metern, wie sie von (Kristiansen et al. 2022) für die Einlagerung von LILW-LL-Abfällen vorgeschlagen werden, wären etwa 37 Bohrlöcher nötig.

Mit ökonomisch gesehen günstigeren Bohrlöchern von 100 Metern maximaler BLT und oberer ET von 30 Metern wären sogar über 200 Bohrlöcher nötig. Auch (Kristiansen et al. 2022) gibt an, dass die Bohrlochlagerung nach einem solchen Modell für LILW-SL-Abfälle nicht als geeignet angesehen werden kann. Auf Grund dieser einfachen Beispielrechnungen kommen wir zu der Bewertung der Bohrlochlagerung als überhaupt nicht günstig (--) für die Entsorgung von Österreichs LILW-SL-Inventar.

Oberflächenanlagen

Grundsätzlich ist zu erwarten, dass alle Entsorgungsoptionen über größere Oberflächenanlagen verfügen werden, welche industriellen Großanlagen gleichen und einen entsprechenden Flächenbedarf in Anspruch nehmen werden. Prinzipiell hängt dieser Flächenbedarf, abgesehen von den optionenspezifischen Anlagen von der Ausgestaltung des Einlagerungskonzeptes ab: sprich von der Abfallannahme, Konditionierung und Verpackung. Es ist anzunehmen, dass diese Maßnahmen und somit Flächenbedarfe für alle Entsorgungsoptionen anfallen werden, sofern sich für ein Konzept entschieden wird, welches vorsieht die Abfälle am Entsorgungsstandort handzuhaben (siehe Kapitel 3).

Bei der Oberflächenlagerung befinden sich sowohl Entsorgungsanlage als auch Oberflächenanlagen an der Erdoberfläche. Dadurch ist per se ein größerer Flächenbedarf anzunehmen. Nachteilig wirkt sich weiterhin die Tatsache aus, dass die Oberflächenanlagen nach der Betriebsphase nicht in dem Maße stillgelegt und rückgebaut werden können, wie es bei der geologischen Endlagerung mit langfristiger passiver Sicherheit der Fall ist. Es ist zu erwarten, dass für den Überwachungs- und Isolationszeitraum auch auf Gebäude und Infrastruktur zurückgegriffen werden muss. Auch können die Flächen für diesen Zeitraum nicht renaturiert oder für gewerbliche oder landwirtschaftliche Zwecke genutzt werden. Das Bewertungskriterium Oberflächenanlagen wird daher für die Option der Oberflächenlagerung

als eher nicht günstig (-) eingeschätzt. Dies gilt gleichermaßen für die Oberflächenanlagen der Lagerung mittlerer Tiefe nach dem Prinzip der oberflächennahen Entsorgung.

Die Oberflächenanlagen der Lagerung mittlerer Tiefe nach dem Prinzip der geologischen Endlagerung und der geologischen Tiefenlager werden hingegen mit eher günstig (+) eingeschätzt. Zwar werden für die geologische Endlagerung die Errichtung bergwerksbetriebliche Infrastruktur, wie z. B. Schächte oder Rampen und Bewetterungsvorrichtungen notwendig. Art und Flächenbedarf der Oberflächenanlagen der geologischen Endlagerung sind jedoch abhängig von der Ausgestaltung des Entsorgungskonzeptes. Ein Vorteil ist, dass die Anlagen nach dem Verschluss des Endlagers stillgelegt und rückgebaut werden können. Sofern keine institutionelle Überwachung und Kontrolle vorgesehen ist, können die Flächen vollständig für andere Zwecke genutzt werden.

Die Flächenbedarfe der Oberflächenanlagen zur Bohrlochlagerung sind prinzipiell gering einzuschätzen und werden damit mit sehr günstig (++) bewertet. Es sind keine bergwerksbetrieblichen Anlagen notwendig. Die Einlagerung kann mit sehr geringen Zeitbedarfen geschehen und die Bohrlöcher relativ schnell verschlossen werden. Eventuell können Bohrtürme sogar mobil operieren, was einen Rückbau nochmal beschleunigt. Daher sind die Flächen schnell wieder für andere Zwecke nutzbar. Ändern könnten sich diese Annahmen durch die Notwendigkeit einer institutionellen Überwachung und Kontrolle, bzw. Notwendigkeit der Sicherung der Bohrlöcher vor dem Einwirken Dritter. Dies hängt aber vom standortspezifischen Sicherheitskonzept ab und bleibt daher gegenwärtig offen.

Rückholbarkeit und Bergung

Das Kriterium der Rückholbarkeit und die Möglichkeit der Bergung wurde aufgrund des Vorschlags für Sicherheitskriterien des Entsorgungsbeirats aufgenommen. Internationale Beispiele zur Rückholbarkeit und Bergbarkeit wie z. B. das Standortauswahlverfahren in Deutschland beziehen sich allerdings insbesondere auf hochradioaktive Abfälle. Ein Konzept für die eventuelle Bergung kurzlebiger Abfälle gibt es derzeit nicht. Entsprechend sollte bei der Entwicklung eines Sicherheitskonzeptes die Relevanz der Bergbarkeit für LILW-SL geprüft werden.

Potenziell ist eine Rückholbarkeit während dem Betrieb bei allen Entsorgungsoptionen bis auf die Bohrlochlagerung gegeben. Mit dem Fortschritt der Einlagerung und dem fortlaufenden Verschluss der Anlagen steigt jedoch der Aufwand der Rückholung prinzipiell an.

Bei der Oberflächenlagerung ist die Rückholbarkeit und auch die Bergung nach dem Verschluss der Anlagen auf Grund der Lagerung an der Oberfläche mit dem vergleichsweise kleinsten technischen und finanziellen Aufwand sowie Schwierigkeiten verbunden. Trotzdem ist abzusehen, dass die radioaktiven Abfälle aus den Überbehältern und oder Betongewölben herausgetrennt werden müssen. Wir schätzen das Bewertungskriterium Rückholbarkeit und Bergung daher insgesamt für eher günstig (+) ein.

Auch für die Entsorgungsoptionen der geologischen Endlagerung ist eine Rückholbarkeit während des Betriebs prinzipiell gegeben. Wenn einzelne Einlagerungstunnel gleich nach der Einlagerung verfüllt und versetzt werden, steigt allerdings auch hier der Aufwand einer Rückholung.

Grundsätzlich gilt: je tiefer die Anlagen unter der Erdoberfläche liegen, desto mehr steigt der Aufwand für die Bergung. Es ist anzunehmen, dass für die geologische Endlagerung eigene neue Bergwerke aufgefahren werden müssen, um die Abfälle zu bergen. Dies ist bei der Oberflächenlagerung und den geologischen Tiefenlagern prinzipiell technisch möglich, jedoch nur mit einem sehr hohen technischen, zeitlichen und finanziellen Aufwand zu leisten. Mit zunehmender Zeit nach dem Verschluss können durch den Gebirgsdruck Abfallgebinde nicht mehr in ihrer ursprünglichen Form vorzufinden und somit die Abfälle nur noch sehr schwer zu bergen sind. Daher schätzen wir die Rückholbarkeit und Bergung für die Optionen der geologischen Endlagerung mit eher nicht günstig (-) ein.

Bei der Bohrlochlagerung in mittleren und großen Tiefen sind auf Grund der Instabilität der Bohrlöcher größere Auswirkungen der Gebirgsdrücke auf die Einlagerungsbereiche zu erwarten. Der Nachweis einer erfolgreichen Rückholbarkeit und Bergung ist zum jetzigen Zeitpunkt nicht erbracht und technisch als ggf. nicht möglich einzuschätzen. Daher müssen bei der Bewertung eine weitere Abstufung getroffen werden und die Rückholbarkeit und Bergung wird mit überhaupt nicht günstig (--) eingestuft.

Kosten

Die hier diskutierten Kosten für die Entsorgungskonzepte beziehen sich auf die Errichtung, den Betrieb und Verschluss und beziehen die Planung, die Standortauswahl, den Entscheidungsprozess und die F&E-Bedarfe nicht mit ein.

Generell kann davon ausgegangen werden, dass auf Grund der vergleichsweise sehr geringen Mengen an zu entsorgenden radioaktiven Abfällen in Österreich die Kosten für die

Entsorgungskonzepte geringer ausfallen werden, als sie im internationalen Vergleich (bspw. durch die IAEA) für große Abfallmengen angegeben werden. International beziehen sich die Angaben oft auf Mengen von radioaktiven Abfällen, die größere nationale Atomenergieprogramme mit sich bringen. Für Sicherheitskonzepte für HLW-Abfälle entstehen ebenfalls wesentlich höhere Kosten als für LILW-SL-Abfälle.

Dennoch ist anzunehmen, dass die Kosten für Oberflächenanlagen im Vergleich am geringsten ausfallen. Alle Abläufe können an der Erdoberfläche erfolgen und erzeugen vergleichsweise nur geringen Aufwand oder Schwierigkeiten. Auf Basis internationaler Projekte können Kosten für die Entsorgung der LILW-SL-Abfälle grob auf Werte im mittleren zwei- bis niedrigen dreistelligen Millionen Euro Bereich abgeschätzt werden. Die Bewertung für die Kosten der Oberflächenlagerung fällt daher als sehr günstig (++) aus.

Für die Lagerung mittlerer Tiefe, sind auf Grund der Tiefe und konzeptionellen Ausgestaltung der Anlagen höhere Kosten zu veranschlagen. Die Kosten bei der geologischen Endlagerung hängen zum einen von der Tiefe aber auch wesentlich von der Wahl der Wirtsgesteine ab. Tendenziell gilt: Je tiefer die Lagerung mittlerer Tiefe, desto technisch anspruchsvoller, aufwendiger und kostspieliger. An dieser Stelle gibt es daher größere Unsicherheiten bezüglich der aufzubringenden Kosten. Auf Basis internationaler Projekte können Kosten für die Entsorgung der LILW-SL-Abfälle in Anlagen der Lagerung mittlerer Tiefe je nach Konzept grob auf Werte im höheren zwei- bis niedrigen dreistelligen Millionen Euro Bereich abgeschätzt werden. Es ist aber auch abzusehen, dass für die Lagerung mittlerer Tiefe weniger Kosten als für geologische Tiefenlager zu erwarten sind. Daher bewerten wir die Lagerung mittlerer Tiefe als eher günstig (+).

Für geologische Tiefenlager sind wegen der Tiefe, des konzeptionellen Aufbaus und der Größe der Anlagen tendenziell die größten Kosten zu veranschlagen. Dennoch gibt es auch hier große Unsicherheiten und die internationalen Projekte zeigen eine große Bandbreite von mehreren Hundert Millionen bis einigen Milliarden Euro an möglichen Kosten. Auf Grund der geringen Mengen an Abfällen in Österreich sind hier ggf. geringere Kosten zu erwarten als bei den internationalen Beispielen. Auf Basis internationaler Projekte können Kosten für die Entsorgung der LILW-SL-Abfälle in geologischen Tiefenlager grob auf Werte im niedrigen bis hohen dreistelligen Millionen Euro Bereich abgeschätzt werden. In jedem Fall ist bei geologischen Tiefenlagern im Vergleich mit erheblicheren Kosten zu rechnen. Daher bewerten wir die Kosten der geologischen Tiefenlager als eher nicht günstig (-).

Bei der Bohrlochlagerung hängen die Kosten vor allem von der Tiefe und der Anzahl und Durchmesser der Bohrlöcher sowie den Wirtsgesteinen ab. Da selbst für die geringe Menge von LILW-SL-Abfällen in Österreich eine große Menge von Bohrlöchern von Nöten wäre, wäre mit deutlich höheren Kosten als bspw. bei der Oberflächenlagerung zu rechnen. Zudem bestehen große Unsicherheiten bei den Abschätzungen zu den Kosten bei den Konzepten der Bohrlochlagerung. Wir schätzen daher die Kosten bei der Bohrlochlagerung für die Entsorgung von LILW-SL-Abfällen für überhaupt nicht günstig (--) ein.

F&E-Bedarfe

Für die F&E-Bedarfe ist festzuhalten, dass sowohl für Oberflächenanlagen, die Lagerung mittlerer Tiefe als auch geologische Tiefenlager prinzipiell eher wenig F&E-Bedarf besteht. Generell kann angenommen werden, dass die Notwendigkeit von konzept- und standort-spezifischer F&E besteht. Dennoch sind Grundlagen vorhanden, Konzepte wurden umgesetzt und haben sich in der Praxis bewährt. Es kann auch auf zahlreiche Beispiele und Ausgestaltungen zurückgegriffen werden. Für diese Optionen bewerten wir daher den Stand von W&T für die Entsorgung von LILW-SL-Abfällen für sehr günstig (++).

Bei den Konzepten zur Bohrlochlagerung existieren noch große Unsicherheiten. Eine wirkliche Umsetzbarkeit ist nicht absehbar, es kann nicht auf Betriebserfahrungen zurückgegriffen werden und Sicherheitsnachweise wurden bisher nicht erbracht. Auch im Hinblick auf Rückholbarkeit und Bergung und der Charakterisierung des Standorts bestehen große F&E-Bedarfe. Daher bewerten wir den momentanen Stand von W&T als überhaupt nicht günstig (--) für die Einlagerung von LILW-SL-Abfällen in Bohrlöchern.

4.2 Endlageroptionen LILW-LL-Abfällen

Tabelle 4 zeigt die vergleichende Bewertung der verschiedenen Entsorgungsoptionen hinsichtlich der Entsorgung der LILW-LL-Abfälle. Erläuterungen zur Einschätzung und Vergleich der einzelnen Optionen sind nachfolgend aufgeführt und erfolgen in einer Delta-Beschreibung zu den Erläuterungen zur Bewertung der LILW-SL-Abfälle in Kapitel 4.1.

Tabelle 4: Bewertung der einzelnen Entsorgungsoptionen für die Entsorgung der LILW-LL-Abfälle in Österreich. Verkürzte Likert-Skala: -- für „überhaupt nicht günstig“, - für „eher nicht günstig“, + für „eher günstig“ und ++ für „sehr günstig“. Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut e.V. N. a.: nicht anwendbar.

Bewertungskriterien	Entsorgungsoptionen			
	Oberflächenlagerung	Lagerung mittlerer Tiefe	geologische Tiefenlager	Bohrlochlagerung
Einschluss & Isolation	n. a.	+	++	+
Techn. Machbarkeit	n. a.	++	++	--
Zeitbedarfe	n. a.	+	-	-
Charakterisierung des Standorts	n. a.	+	+	-
Abfallflexibilität	n. a.	++	++	+
Aufnahmekapazität	n. a.	++	++	+
Oberflächenanlagen	n. a.	+	+	++
Rückholbarkeit & Bergung	n. a.	-	-	--
Kosten	n. a.	+	-	++
F&E-Bedarfe	n. a.	+	+	--

Einschluss und Isolation

Der Einschluss und die Isolation der radioaktiven Abfälle ist bei der Oberflächenlagerung für die Entsorgung von LILW-LL-Abfällen nicht gegeben. Daher fällt sie als Entsorgungsoption für die Entsorgung von LILW-LL-Abfällen aus der Bewertung (n. a.) und wird hier nicht weiter betrachtet. Das Sicherheitskonzept der Lagerung mittlerer Tiefe kann, sofern es dem der geologischen Endlagerung nachempfunden ist, für den sicheren Einschluss und die Isolation der LILW-LL-Abfälle ausreichen. Standortspezifische Sicherheitsnachweise müssen jedoch erbracht werden. Internationale Beispiele zeigen grundsätzlich funktionierende Konzepte. Daher bewerten wir die Option der Lagerung mittlerer Tiefe in Form der geologischen Endlagerung für die Entsorgung von LILW-LL-Abfällen als eher günstig (+). Für die Bewertung der geologischen Tiefenlager und der Bohrlochlagerung für die LILW-LL-Abfälle gelten die Ausführungen aus Kapitel 4.1.

Technische Machbarkeit

Siehe Kapitel 4.1

Für die Entsorgung von LILW-LL-Abfällen mit der Bohrlochlagerung bestehen bereits vereinzelte Konzepte, welche aber nicht über generische Annahmen hinaus gehen, so dass sich daher unsere Bewertung im Vergleich zu Kapitel 4.1 nicht ändert.

Zeitbedarf

Siehe Kapitel 4.1

Für die Entsorgung der geringen Mengen an LILW-LL-Abfällen in Bohrlöchern ist anzunehmen, dass sich die kürzere Einlagerung während der Betriebsphase vorteilhaft auf die Zeitbedarfe auswirken könnte. Da jedoch der Stand von W&T nicht über den Status der Konzeption hinausgeht, ist anzunehmen, dass sich die Zeitbedarfe, welche für F&E-Bedarfe und Planung solcher Anlagen zur Bohrlochlagerung notwendig werden, wesentlich relevanter auf die Gesamtdauer der Entsorgung auswirken. Im Vergleich zu einem möglichen Zeitgewinn durch eine kürzere Einlagerungsphase würden diese deutlicher ins Gewicht fallen.

Charakterisierung des Standorts

Tendenziell ist auf Grund des bei LILW-LL-Abfällen längeren Isolationszeitraums die Charakterisierung des Standorts aufwendiger. Dennoch bleibt der technische, finanzielle und zeitliche Aufwand in Relation der Entsorgungsoptionen prinzipiell gleich. Für die vergleichende Bewertung hat dies daher keine Auswirkungen (siehe Kapitel 4.1).

Abfallflexibilität

Siehe Kapitel 4.1

Aufnahmekapazität

Für die Bewertung der Lagerung mittlerer Tiefe in Form der geologischen Endlagerung und der geologischen Tiefenlagern gelten die Ausführungen aus Kapitel 4.1

Für die geringen Mengen an LILW-LL-Abfällen, welche in Österreich zu entsorgen sind, könnte eine Bohrlochlagerung dennoch interessant sein. Nach den Berechnungen von

(Kristiansen et al. 2022) könnten ausgehend von 60 m³ an LILW-LL-Abfällen ein bis drei Bohrlöcher ausreichen. Geht man von unseren Berechnungen mit maximal 100 m³ LILW-LL-Abfällen (in ungefähr 485 Abfallgebinden) aus Kapitel 2.2 aus, könnten 115 Überbehälter (à 3,5 Meter und 4 Abfallgebinden) ausreichen. Damit ergäbe sich ein Einlagerungsbereich mit einer Bohrstrecke von etwas mehr als 400 Metern. Mit der Einhaltung von oberen ET von 100 Metern würde sich damit ein Bohrloch mit einer Gesamttiefe von etwas mehr als 500 Metern ergeben, welches ausreichen würde, um alle LILW-LL-Abfälle Österreichs aufzunehmen.

Aufbauend auf diesen Annahmen schätzen wir die Bohrlochlagerung für die Entsorgung der LILW-LL-Abfälle aus Sicht der Aufnahmekapazität als eher günstig (+) ein. Dennoch ist auch bei der Entsorgung von LILW-LL-Abfällen mittels Bohrlöchern auf die teils große Unsicherheiten in der Konzeptentwicklung zu verweisen. Insofern bewerten wir die Bohrlochlagerung für die Entsorgung von LILW-LL-Abfällen in Abstufung als weniger günstig im Vergleich zu den anderen Optionen der geologischen Endlagerung ein.

Oberflächenanlagen

Siehe Kapitel 4.1

Rückholbarkeit und Bergung

Siehe Kapitel 4.1

Kosten

Die Bewertung der Bohrlochlagerung fällt für die LILW-LL-Abfälle differenziert zu Kapitel 4.1 aus. Auf Grund der geringen Mengen an LILW-LL-Abfällen in Österreich und der daraus resultierenden Anzahl notwendiger Bohrlöcher kann die Entsorgungsoption für die Endlagerung der LILW-LL-Abfälle im Vergleich zu den weiteren möglichen Optionen Kostenvorteile aufweisen.

(Kristiansen et al. 2022) berechnen für ihr Beispiel mit ein bis drei Bohrlöchern Ausgaben für die Bohrlöcher von zwei bis sechs Millionen Euro (2 Mio. Euro/Bohrloch). Dazu kämen 1,25 Mio. Euro für die Herstellung der Überbehälter. Zu Kosten zum Betrieb und Verschluss werden keine expliziten Angaben gemacht.

Auch trotz großer Unsicherheiten fällt unsere Bewertung der Kosten für die Bohrlochlage-
rung für die Entsorgung der LILW-LL-Abfälle als sehr günstig (++) aus.

F&E-Bedarfe

Siehe Kapitel 4.1

4.3 Konsequenzen und Schlussfolgerungen

Auf Basis der vergleichenden Bewertung von Optionen für die Entsorgung von schwach-
und mittelradioaktiven Abfällen lassen sich folgende Konsequenzen und Schlussfolgerun-
gen für die Entsorgung radioaktiver Abfälle in Österreich formulieren:

1. „Safety First“: Es ist zu empfehlen, dass die zu wählende Entsorgungsoption in einem transparenten, faktengestützten und dokumentierten Entscheidungsprozess in einem komplexen mehrstufigen Standortauswahlverfahren mit den höchsten Sicherheitsansprüchen und unter Beteiligung der Bevölkerung zu bestimmen ist.
2. „Graded Approach“: Gleichzeitig können Unterschiede in den Eigenschaften der in Österreich vorhandenen bzw. zu erwartenden Mengen kreditiert werden, es muss nicht zwingend für alle Abfälle eine einheitliche Lösung mit gleichen Sicherheitsanforderungen gewählt werden.
3. Die in Österreich vorhandenen bzw. zu erwartenden Mengen sind im internationalen Vergleich sehr gering. Grundsätzlich dürfte bei allen Optionen aufgrund der Mengen eine Endlagerung an einem (noch zu bestimmenden geeigneten) Standort möglich sein.
4. Die in Österreich vorhandenen bzw. zu erwartenden Mengen an radioaktiven Abfällen enthalten auch Abfälle mit nicht zu vernachlässigenden Mengen an langlebigen Radionukliden mit Halbwertszeiten von über 30 Jahren (LILW-LL-Abfälle).
5. Damit ist eine gemeinsame Entsorgung der Abfälle in Anlagen zur Oberflächenlagerung oder in Anlagen der Lagerung mittlerer Tiefe nach dem Prinzip der oberflächennahen Entsorgung nicht möglich, da diese keine ausreichende Sicherheit für LILW-LL-Abfälle gewährleisten (siehe 1.).
6. Für die Entsorgung der LILW-LL-Abfälle sind Entsorgungsoptionen, die dem Sicherheitskonzept der geologischen Endlagerung entsprechen – also Anlagen der Lagerung mittlerer Tiefe in Form der geologischen Endlagerung oder ein geologisches Tiefenlager – notwendig. Eine Lösung bestünde darin, die Endlagerung der LILW-LL-

Abfälle mit den LILW-SL-Abfällen in einem solchen geologischen Endlager gemeinsam an einem Standort vorzunehmen. Dabei kann ggf. für die unterschiedlichen Abfallarten ein getrennter Einlagerungsbereich vorgesehen werden.

7. Eine Entscheidung über die zu wählende Tiefe einer solchen Anlage hat insbesondere die österreichischen geologischen Gegebenheiten, aber auch die geforderten Isolationszeiträume zu berücksichtigen. Die geforderten Isolationszeiträume ergeben sich wiederum aus den vom Entsorgungsbeirat noch festzulegenden Sicherheitskriterien und den Abfalleigenschaften (insbesondere Gebinde- und nuklidspezifische Aktivitäten). In Abhängigkeit von diesen Festlegungen könnte ein geeigneter Standort in Österreich gesucht werden.
8. Eine geologische Endlagerung – als geologische Tiefenlager oder der Lagerung mittlerer Tiefe nach dem Prinzip der geologischen Endlagerung – ist für die LILW-LL-Abfälle erforderlich. Für den Anteil der LILW-SL-Abfälle gelten diese Anforderungen nicht zwingend. Da diese den größten Anteil der in Österreich vorhandenen bzw. zu erwartenden Mengen darstellen, ist auch eine getrennte Lagerung der LILW-SL- und -LL-Abfälle denkbar.
9. Im Falle einer getrennten Lagerung reduziert sich der in einer Anlage der geologischen Endlagerung erforderliche Platzbedarf auf die alleinige Endlagerung der LILW-LL-Abfälle. Dies kann zu Vorteilen bei der Standortsuche und dem erforderlichen Sicherheitsnachweis führen. Hinsichtlich der Kosten für die reine LILW-LL-Abfalllagerung ergäben sich voraussichtlich geringe Vorteile, der Zeitbedarf wird demgegenüber voraussichtlich nur wenig verändert.
10. Für die getrennte und alleinige Entsorgung der LILW-SL-Abfälle könnte die Option der Oberflächenlagerung in Betracht gezogen werden. Diese würde jedoch keine langfristig passive Sicherheit gemäß § 141 Absatz 4. StrSchG bieten. Diese kann voraussichtlich schneller und zu geringeren Kosten errichtet werden als ein geologisches Tiefenlager. Unklar ist jedoch, ob sich bei zwei getrennten Anlagen in der Summe Kostenvorteile gegenüber einer gemeinsamen geologischen Endlagerung ergeben würden. Ebenfalls offen ist, ob eine solche Lösung aufgrund des Ansatzes des „Graded Approaches“ mit Blick auf die Sicherheit der Entsorgung der radioaktiven Abfälle eine gesellschaftliche Akzeptanz finden würde.
11. Grundsätzlich kann für die LILW-LL-Abfälle auch die Option der Bohrlochlagerung gewählt werden. Diese Option kann heute aber noch nicht als technisch verfügbar eingestuft werden. Für die Entsorgung der LILW-SL-Abfälle käme die Bohrlochlagerung aus technischen, zeitlichen und ökonomischen Gründen generell eher nicht in Frage, da hier vergleichsweise viele Bohrlöcher erforderlich würden.

12. Würde für die gesamte Menge der in Österreich vorhandenen bzw. zu erwartenden Abfälle eine Bohrlochlagerung in großen Tiefen vorgesehen, würden sich voraussichtlich auch keine relevanten Vorteile gegenüber einer geologischen Tiefenlagerung ergeben. Nur wenn auch bei der Bohrlochlagerung eine Unterscheidung zwischen den LILW-SL- und den LILW-LL-Abfällen getroffen wird, könnten spezifischen Vorteile der Bohrlochlagerung zum Tragen kommen.
13. Insbesondere für die alleinige Entsorgung der LILW-LL-Abfälle könnte die Option der Bohrlochlagerung in Bohrlöchern mittlerer Tiefe vorgesehen werden. Deren Sicherheitskonzept (Tiefe, Behälter, Barrierenwirksamkeit, Verfüllung, Überwachung, Rückholung/Bergung) wäre auf Basis der noch vom Entsorgungsbeirat festzulegenden Sicherheitskriterien zu entwickeln (vgl. 6.). Aufgrund der geringen Mengen an LILW-LL-Abfälle in einem geologischen Tiefenlager zu Kostenvorteilen führen. Hinsichtlich der zeitlichen Umsetzbarkeit bestünden jedoch auf Grund der F&E-Bedarfe erhebliche Unsicherheiten.
14. In Kombination mit einer Bohrlochlagerung der LILW-LL-Abfälle könnte für die LILW-SL-Abfälle wiederum eine Option der Oberflächenlagerung oder Lagerung mittlerer Tiefe gewählt werden. Diese Option geht allerdings mit hohen Unsicherheiten bezüglich ihrer Realisierbarkeit einher.
15. Schließlich verbleibt grundsätzlich auch die Möglichkeit, die in Österreich vorhandenen bzw. zu erwartenden Mengen nicht national zu entsorgen, sondern eine internationale Lösung anzustreben. Wie in Kapitel 3.5 näher ausgeführt, gibt es diesbezüglich einen Arbeitsprozess aber keine konkreten Optionen.
16. Für die Entsorgung der LILW-SL-Abfälle ist dabei allerdings nicht erkennbar, inwieweit eine internationale Lösung signifikante Vorteile gegenüber einer nationalen Entsorgungslösung – Oberflächenlagerung oder Lagerung mittlerer Tiefe in Form der oberflächennahen Entsorgung – bieten würde.
17. Für die vergleichsweise geringen Mengen an LILW-LL-Abfällen könnte eine internationale Lösung (sowohl eine in Österreich befindliche Anlage, die auch von anderen Staaten genutzt werden könnte, als auch eine in einem anderen Land befindliche Anlage, die von Österreich mit genutzt werden kann) insbesondere Kostenvorteile aufgrund der gemeinsamen Nutzung der in jedem Fall erforderlichen Infrastrukturanlagen bieten.
18. Eine internationale Option geht allerdings aus heutiger Sicht auch mit hohen Unsicherheiten einher (gemeinsame Sicherheitsstandards, Akzeptanz im Ausland etc.). Eine solche Option kann daher gegenwärtig lediglich als Rückfalloption (dual track) in

Betracht kommen, eine nationale Entsorgungsoption sollte als Referenzoption in jedem Fall entwickelt werden.

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht der Abfallgebinde im Zwischenlager der NES nach Abfallklassifizierung. Quelle: NES 2022	12
Tabelle 2: Nationale Politik im Hinblick auf den Import und Export hochradioaktiver Abfälle, Stand 2016. Quelle: (IAEA 2016)	108
Tabelle 3: Bewertung der einzelnen Entsorgungsoptionen für die Entsorgung der LILW-SL-Abfälle in Österreich. Verkürzte Likert-Skala: -- für „überhaupt nicht günstig“, - für „eher nicht günstig“, + für „eher günstig“ und ++ für „sehr günstig“. Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut e. V.	114
Tabelle 4: Bewertung der einzelnen Entsorgungsoptionen für die Entsorgung der LILW-LL-Abfälle in Österreich. Verkürzte Likert-Skala: -- für „überhaupt nicht günstig“, - für „eher nicht günstig“, + für „eher günstig“ und ++ für „sehr günstig“. Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut e.V. N. a.: nicht anwendbar.	127

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Darstellung der Monolith Type I, II, und III Stahlbetonbehälter (Überbehälter) nach dem Beispiel in der Anlage zur Oberflächenlagerung in Dessel, Belgien. Quelle: (van Geet et al. 2019)	14
Abbildung 2: Schematische Darstellung verschiedener Entsorgungsoptionen. Quelle: verändert nach (IAEA 2020a). Darstellung der Tiefe nicht maßstabsgerecht.	21
Abbildung 3: Darstellung des Aufbaus eines Betongewölbes als Oberflächenhügel zur Oberflächenlagerung von LILW-SL-Abfällen. Quelle: modifiziert nach (DES 2023). 1: Gewölbedach; 2: Behälter; 3: Trennmauer; 4: Zugangsrampe; 5: Betonwand; 6: Betonsockel; 7: Bentonit angereicherter Sand (BES); 8: Granulatfüllung; 9: Betongewölbe; 10: Absperrwand.	25
Abbildung 4: Gewölbedesign der Oberflächenlagerung für Endlageranlagen für LILW-SL-Abfälle. Quelle: (ANDRA 2023b). 1: Betongewölbe mit Abfallgebinden; 2: geologische Bodenformationen; 3: undurchlässige Tonschicht.	26
Abbildung 5: Schematische Darstellung der Gewölbezellen der Oberflächenlagerung in Grabenform für Endlageranlagen für LILW-SL-Abfälle in Frankreich. Quelle: (ANDRA 2023a). 1: Geomembran; 2: Abfallgebinde; 3: Auffüllung; 4: obere Bodenschicht; 5: Entwässerungsschicht; 6: Sand; 7: Ton; 8: Sand	28
Abbildung 6: Schematische Darstellung der oberflächennahen Entsorgung in Form eines Silos zur Oberflächenlagerung in Slowenien. Quelle: (IAEA 2020a)	29
Abbildung 7: Schematischer Aufbau des Multibarrierensystems einer oberflächennahen Entsorgungszelle in Grabenform der Anlage CIRES zur Oberflächenlagerung in Frankreich. Quelle: (IAEA 2020a)	31
Abbildung 8: Schematische Darstellung des Multibarrierenkonzeptes der Entsorgungsanlagen in Form von Betongewölben zur Oberflächenlagerung in Dessel, Belgien. Quelle: (van Geet et al. 2019).....	33
Abbildung 9: Stahlbetongewölbekonzepte der Anlage zur Oberflächenlagerung in Rohhasho-mura, Japan. Quelle: (USDOE 2011)	39
Abbildung 10: Schematische Darstellung eines Silos zur Lagerung mittlerer Tiefe nach dem Prinzip der oberflächennahen Entsorgung. Quelle: (IAEA 2020b).....	43
Abbildung 11: Schematische Darstellung der Anlagen der Lagerung mittlerer Tiefe nach dem Prinzip der geologischen Endlagerung in Finnland. Quelle: (NDA 2017).....	44
Abbildung 12: Darstellung einer möglichen Ausgestaltung von Entsorgungssilos als Oberflächennahe Anlage in mehreren Dutzend Metern Tiefe. Quelle: verändert nach (NDA 2020). 1: Unterbringung der Abfälle unter der Erde; 2: Kappe; 3: Außenwand; 4: Bentonit angereicherte Sand (BES); 5: Multibarrierensystem; 6: Membranwand; 7: Innenwand; 8:	

Betonsockel; 9: interne Bodenplatte; 10: Zwischenboden; 11: Fugenmasse; 12: Abfallbehälter; 13: Ablende; 14: Verfüllung; 15: Erdoberfläche.	46
Abbildung 13: Konzept des Betonsilos der LILW-SL-Entsorgungsanlage Vrbinja, Slowenien. Quelle: (Kegel et al. 2019)	49
Abbildung 14: Schematische Darstellung des flachen SFR-Endlagers zur Lagerung mittlerer Tiefe in Schweden. Quelle: (SKB 2018)	51
Abbildung 15: Schematischer Aufbau des Endlagers am Standort Loviisa, Finnland. Quelle: (IAEA 2020b).....	52
Abbildung 16: Schematische Darstellung des LILW-Endlagers am Standort Olkiluoto in Finnland. Quelle: (NDA 2017).....	54
Abbildung 17: Schematischer Aufbau des WLDC-Endlagers für LILW-Abfälle in Südkorea. Quelle: (Chul-Hyung Kang 2014)	55
Abbildung 18: Schematischer Aufbau der Betonsilos zur Einlagerung der LILW-Abfälle am WLDC, Südkorea. Quelle: (Chul-Hyung Kang 2014)	57
Abbildung 19: Schematisches Modell des Schweizer Tiefenlagers der Nagra. Quelle: verändert nach (Nagra 2023)	63
Abbildung 20: Schematische Darstellung des Grubengebäudes des Endlagers Konrad in Deutschland. Quelle: (BGE 2018)	70
Abbildung 21: Darstellung der Abfallgebinde in den Einlagerungskammern in der Streckenlagerung. Quelle: https://www.bge.de/de/konrad/	71
Abbildung 22: Schematische Darstellung des geologischen Tiefenlagers „Cigéo“ für HLW und LILW-LL Abfälle in Frankreich. Quelle: (ANDRA 2020)	72
Abbildung 23: Modell eines LILW-LL-Abfälle Einlagerungstunnels im geologischen Tiefenlager „Cigéo“ in Frankreich. Quelle: (IAEA 2020a).....	74
Abbildung 24: Behälter- und Einlagerungskonzept der Nagra für LILW-Abfälle. Quelle: (Nagra 2022b).....	76
Abbildung 25: Einlagerungskonzept für LILW-LL-Abfälle im Monolith B Behälter im Tiefenlager in Belgien. Quelle: (ONDRAF 2012)	78
Abbildung 26: Schematische Darstellung der Abfallbehälter (links) und der Einlagerungstechnik des Tonkonzepts (rechts) in einem Gewölbetunnel für das SFL- Endlager in Schweden. Quelle: (SKB 2013). Links: Stahlbeton-Überbehälter für in 200 Liter Fässern (blau) eingebrachte radioaktive Abfälle. Rechts: Einlagerungstechnik des Tonkonzepts (Clay Concept) in einem Gewölbetunnel: 1: Tunnelwand; 2: Bentonit Pellets; 3: Fugenmasse; 4: Betonstruktur (0,5 m); 5: Granitpfeiler; 6: Abfallüberbehälter (siehe links); 7: Bentonitblöcke. Ungefähre Abmessungen: A = 20 m, B = 17 m, C = 16 m, D = 2 m, E = 2 m, F = 3-4 m, G = 2-3 m.....	79

Abbildung 27: Darstellung der unterschiedlichen Tiefen von Bohrlochlagerung. Quelle: verändert nach (Freete et al. 2020). EZ: Einlagerungszone; ob. ET: obere Einlagerungstiefe; max. BLT: maximale Bohrlochteufe.....	84
Abbildung 28: Schematische Darstellung des Konzepts der horizontalen Bohrlochlagerung des Unternehmens Deep Isolation®. Quelle: (Deep Isolation Inc. 2020).....	86
Abbildung 29: Schematische Darstellung eines Bohrlochendlagers. Quelle: (IAEA 2009a)	88
Abbildung 30: Querschnitt eines Bohrlochs mit eingelagertem Abfallbehälter vor Verschluss. Quelle: (Englert et al. 2023)	89
Abbildung 31: Querschnitt durch die Teleskopverrohrung eines Bohrlochs. Quelle: (Fischer et al. 2020a).....	91
Abbildung 32: Bohrlochlagerung vor und nach Verschluss. Quelle: (IAEA 2020b).....	92
Abbildung 33: Schematischer Querschnitt des Endlagerbereichs in einem Bohrloch. Quelle: (IAEA 2020b). 1. Verpresster Hohlraum zwischen Verrohrung und Bohrlochwand; 2: Abfallgebinde in Überbehälter; 3: Verrohrung; 4. Bohrlochverfüllung	96
Abbildung 34: Schematischer Aufbau eines Bohrlochs der MBL (links) und Konzept einer möglichen Bohrlochanlage zur Entsorgung von LILW-LL-Abfälle (rechts). Quelle: verändert nach (USDOE 2016)	99
Abbildung 35: Schematischer Aufbau der Bohrlöcher für das Konzept der MBL in Israel. Quelle: (Freete et al. 2020)	101
Abbildung 36: Schematische Darstellung eines Überbehälters für die Bohrlochlagerung von 200-Liter-Fässern. Quelle: (Karlsen et al. 2021)	102
Abbildung 37: Schematischer Aufbau eines Bohrlochs bei dem Konzept der ERDO. Quelle: (Fischer et al. 2020b)	103
Abbildung 38: Eignung der verschiedenen Typen von Abfallgebinden für die Bohrlochlagerung in Österreich. Quelle: (Kristiansen et al. 2022).....	103

Literaturverzeichnis

Äikäs, T. & Anttila, P., 2008. *Repositories for low- and intermediate-level radioactive wastes in Finland*. In: Rempe, N. T. (Hg.): *Deep geologic repositories*. Boulder (Colo.): Geological Society of America (Reviews in engineering geology, 19).

ANDRA - Agence Nationale Pour La Gestion Des Déchets Radioactifs, 2020. *The Cigeo Project. France's Industrial Centre for Geological Disposal of radioactive waste*. Châtenay-Malabry, France. [Online] available at: https://international.andra.fr/sites/international/files/2021-11/Andra-Plaquette_Cigeo-MAJ-19_08-ALR_C02_V2_EN.pdf.

ANDRA - Agence Nationale Pour La Gestion Des Déchets Radioactifs, 2023a. *A specific solution for VLLW*, Agence Nationale Pour La Gestion Des Déchets Radioactifs. [Online] available at: <https://international.andra.fr/operational-facilities/industrial-facility-grouping-sorting-and-very-low-level-waste-vllw-disposal-facility-cires/specific-solution-vllw>. [Zugriff am 28.06.2023].

ANDRA - Agence Nationale Pour La Gestion Des Déchets Radioactifs, 2023b. *The surface disposal concept for LIL-SL waste*, leaflet.

BASE - Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung, 2023. *Pressemitteilung: Endlagersuche Frankreich: Baugenehmigung beantragt, Vorhabenträgerin Andra plant tiefengeologisches Endlager*. Berlin. [Online] available at: <https://www.base.bund.de/SharedDocs/Kurzmeldungen/BASE/DE/2023/0118-endlagersuche-frankreich.html>.

BFE - Bundesamt für Energie, 2011. *Sachplan geologische Tiefenlager, Konzeptteil*, Bern, Schweiz.

BGE - Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH, 2023. *Pressemitteilung: Fertigstellung des Endlagers Konrad verzögert sich, Das Endlager Konrad ist auf der Zielgeraden. Allerdings gibt es noch einige Hürden zu überwinden*. [Online] available at: <https://www.bge.de/de/aktuelles/meldungen-und-pressemitteilungen/meldung/news/2023/6/752-endlager-konrad-1/>.

BGE - Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH, 2020a. *Begriffsbestimmung Wirtsgestein Steinsalz*.

BGE - Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH, 2020b. *Begriffsbestimmung: Wirtsgestein Tonstein/ Tongestein.*

BGE - Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH, 2023. *Fertigstellung 2027 - was passiert nun?, Informationen über das Endlager Konrad*, Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH. [Online] available at: <https://www.bge.de/de/konrad>.

BGE - Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (Hg.), 2018). *Konrad Einblicke, Fertigstellung 2027 - Was passiert nun? Information über das Endlager Konrad*. Peine. [Online] available at: [https://www.einblicke.de/fileadmin/downloads/BGE Einblicke 02 Konrad.pdf](https://www.einblicke.de/fileadmin/downloads/BGE_Einblicke_02_Konrad.pdf).

BMK - Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (Hg.), 2022. *Nationales Entsorgungsprogramm, Gemäß § 142 Strahlenschutzgesetz 2020. Aktualisierte Fassung 2022*. Vienna, Austria.

Bracke, G., 2020. *Aktuelle Entwicklungen in Wissenschaft und Technik in Bezug auf die Option der Lagerung von radioaktiven Abfällen in Bohrlöcher (Technical Report)*. Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit GmbH.

Bollingerfehr, W., Dietrichs, C., Herold, M., Kudla, W., Reich, M. & Rosenzweig, T., 2018. *Untersuchungen zu Chancen und Risiken der Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle und ausgedienter Brennelemente in Tiefen Bohrlöchern „CREATIEF“*, Abschlussbericht. Technische Universität Bergakademie Freiberg. BGE Technology GmbH (Hg.).

Bracke, G., Charlier, F., Geckeis, H., Harms, U., Heidbach, O., Kienzler, B., Liebscher, A., Müller, B., Prevedel, B., Röckel, T., Schilling, F. & Sperber, A., 2016. *Tiefe Bohrlöcher (K-MAT, 52)*. Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit gGmbH. Köln.

Bracke, G., Kudla, W. & Rosenzweig, T., 2019. Status of Deep Borehole Disposal of High-Level Radioactive Waste in Germany. In: *Energies* 12 (13), S. 2580. DOI: 10.3390/en12132580.

Chapman, N., McCombie, C. & Richardson, P., 2008. *Strategic Action Plan for Implementation of European Regional Repositories: Stage 2, Work Package 3, Economic Aspects of Regional Repositories (SAPIERR II)*.

Chul-Hyung Kang, 2014. *Disposal solutions implemented for ILW*. International Atomic Energy Agency Scientific Forum: Radioactive Waste: Meeting the Challenge. Korea Radioactive Waste Agency. Veranstalter: International Atomic Energy Agency (IAEA). Vienna, Austria, 22.09.2014.

Deep Isolation EMEA Limited, 2021. *Deep Isolation and ERDO, Preliminary assessment of a Deep Isolation borehole repository as a disposal option for nuclear waste in the ERDO countries*. London.

Deep Isolation Inc., 2020. *Spent Nuclear Fuel Disposal in a Deep Horizontal Drillhole Repository Sited in Shale: Numerical Simulations in Support of a Generic Post-Closure Safety Analysis*. Berkeley.

Deep Isolation, Inc., 2021. *Deep Isolation, An introduction for policy-makers around the world*. Berkeley.

DepV, 2009. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Verordnung über Deponien und Langzeitlager (Deponieverordnung), DepV, Fassung vom 09.07.2021.

DES - Department for Energy Security & Net Zero, 2023. *Consultation: Part I UK policy proposals for managing radioactive substances and nuclear decommissioning*.

Endlagerkommission - Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe, 2016. *Abschlussbericht der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe, Verantwortung für die Zukunft ein faires und transparentes Verfahren für die Auswahl eines nationalen Endlagerstandortes (K-Drs. 268)*, zuletzt geprüft am 25.08.2021.

Englert et al., 2023. *Verfolgung und Aufbereitung des Standes von Wissenschaft und Technik bei alternativen Entsorgungsoptionen für hochradioaktive Abfälle altEr*. Öko-Institut e.V.

ENSI - Eidgenössisches Nuklearinspektorat, 2021. *Geologische Tiefenlager, Radioaktive Abfälle sicher entsorgen* (Informationsbroschüre — Geologische Tiefenlager, 3. Auflage) (ENSI, 33/879). Brugg, Schweiz.

Entsorgungsbeirat Österreich, 2022. *Vorschlag für Sicherheitskriterien für eine Anlage zur langfristigen Entsorgung radioaktiver Abfälle*. Vienna, Austria.

Euratom - Europäische Atomgemeinschaft, 1999. *COMMISSION RECOMMENDATION of 15 September 1999 on a classification system for solid radioactive waste (1302 final) (669)*. Brüssel, Belgien.

Euratom, 2011. *Richtlinie 2011/70/Euratom des Rates vom 19. Juli 2011 über einen Gemeinschaftsrahmen für die verantwortungsvolle und sichere Entsorgung abgebrannter Brennelemente und radioaktiver Abfälle*.

Falck, W. E. & Nilsson, K.-F., 2009. *Geological disposal of radioactive waste, Moving towards implementation* (JRC reference reports, EUR 23925 EN). European Commission. Luxembourg.

Faybishenko, B., Birkholzer, J. & Persoff, P., 2016. *International Approaches for Nuclear Waste Disposal in Geological Formations: Report on Fifth Worldwide Review* (Fuel Cycle Research & Development, SAND2016-8229R). Sandia National Laboratories.

Fischer, T., Engelhardt, H.-J. & Wanne, T., 2020a. *Deep Borehole Disposal Concept (Technical Report)*. AINS - Civil Engineering; BGE TECHNOLOGY.

Fischer, T., Engelhardt, H.-J. & Wanne, T. 2020b. *Scoping the possibility of ILW disposal in boreholes*, Technical Note. BGE Technology GmbH (Hg.).

FMRA - Federal Ministry Republic of Austria for Climate Action, Environment, Energy Mobility, Innovation and Technology, 2020. *Seventh National Report of Austria. On the implementation of the obligations of the Joint Convention on the Safety of Spent fuel and on the Safety of Radioactive Waste Management*. Vienna, Austria.

Freete, G., Sassani, D., Klein-Ben David, O., Calco, R. & Peer, G., 2020. *Borehole Disposal of Radioactive Waste in Israel (20388)*. Sandia National Laboratories; Geological Survey of Israel; Nuclear Research Center Negev. WM2020 Conference, March 8 - 12, 2020, Phoenix, Arizona, USA.

Garamszeghy, M., 2021. *Disposal of Low- and Intermediate-Level Waste: International experience*. Report prepared for the Nuclear Waste Management Organization of Canada (Rev. 1 – February 2021).

Hore-Lacy, I., 2021. *International Nuclear Waste Disposal Centers*. World Nuclear Association. Blackburn North, VIC, Australia.

IAEA - International Atomic Energy Agency, 2003. *Safety considerations in the disposal of disused sealed radioactive sources in borehole facilities* (IAEA TECDOC, 1368). Vienna, Austria.

IAEA - International Atomic Energy Agency, 2009a. *Borehole Disposal Facilities for Radioactive Waste (Specific Safety Guide, 1)*. Vienna, Austria.

IAEA - International Atomic Energy Agency, 2009b. *Classification of Radioactive Waste (General Safety Guide, 1)*. Vienna, Austria.

IAEA - International Atomic Energy Agency, 2009c. *Disposal Approaches for Long Lived Low and Intermediate Level Radioactive Waste* (Nuclear Energy Series, NW-T-1.20).

IAEA - International Atomic Energy Agency, 2011a. *Disposal of Radioactive Waste* (Specific Safety Requirements, No. SSR-5).

IAEA - International Atomic Energy Agency, 2011b. *Geological Disposal Facilities for Radioactive Waste* (Specific Safety Guide, 14). Vienna, Austria.

IAEA - International Atomic Energy Agency, 2014. *Near Surface Disposal Facilities for Radioactive Waste* (Specific Safety Guide, 29). Vienna, Austria.

IAEA - International Atomic Energy Agency, 2016. *Framework and Challenges for Initiating Multinational Cooperation for the Development of a Radioactive Waste Repository* (Nuclear Energy Series, NW-T-1.5).

IAEA - International Atomic Energy Agency, 2018. *Integrated Regulatory Review Service (IRRS) Mission to Austria*. Vienna, Austria.

IAEA - International Atomic Energy Agency, 2020a. *Design Principles and Approaches for Radioactive Waste Repositories* (Nuclear Energy Series, NW-T-1.27). Vienna, Austria.

IAEA - International Atomic Energy Agency, 2020b. *Underground Disposal Concepts for Small Inventories of Intermediate and High Level Radioactive Waste* (TECDOC SERIES, 1934). Vienna, Austria.

IAEA - International Atomic Energy Agency, 2022a. *Integrated Review Service for radioactive waste and spent fuel management, decommissioning and remediation (ARTEMIS) Mission to Austria*.

IAEA - International Atomic Energy Agency, 2022b. *Status and Trends in Spent Fuel and Radioactive Waste Management*, No. NW-T-1.14 (Rev. 1). Vienna, Austria.

Karlsen, T. M., Nguyen, T., Edvardsen, S. T. & Bratteli, J., 2021). *Overpack for disposal of 200 liter drums in boreholes*. Unter Mitarbeit von Design, Strength Calculations and Cost Estimate (J.M. Karlsen, T. Nguyen) (IFE/F-2021/032). Institute of Energy Technology. Kjeller, Norway.

Kegel, L., Ropic, A., Vrankic, Z. & Kukmanovic, G., 2019. *Third Revision of the Krško NPP Radioactive Waste and Spent Fuel Disposal Program (1.3)*. Agency for Radwaste Management, Ljubljana.

Kreusch, J., Neumann, W. & Eckhardt, A., 2019. *Entsorgungspfade für hoch radioaktive Abfälle, Analyse der Chancen, Risiken und Ungewissheiten*. Springer, Energie in Naturwissenschaft, Technik, Wirtschaft (Hg.). Berlin, Deutschland.

Kristiansen, H., Rapić, A., Thomsen, H. S., Kegel, L., Vuorio, M. & Neckel, W., 2022. *Boreholes as a permanent solution for national inventories of radioactive waste*. Unter Mitarbeit von Håvard Kristiansen, Norwegian Nuclear Decommissioning, Norway. Association for Multi-national Radioactive Waste Solutions.

MITC - Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, Spain, 2006. *6th General Radioactive Waste Plan*.

Nagra - Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, 2018. *Vergleich der Kosten der geologischen Tiefenlager und des zugehörigen Bundesanteils an diesen Kosten gemäss KS11 und KS16, Eine zusammenfassende Darstellung der Nagra im Auftrag des Bunde*. [Online] available at: https://www.bag.admin.ch/dam/bag/de/dokumente/str/fanm/radioaktive-materialen-abfaelle/Vergleich-Kosten_KS11-KS16.pdf.download.pdf/Vergleich-Kosten_KS11-KS16.pdf.

Nagra - Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, 2019. *Tongesteine und ihr Beitrag zur Lagerung der radioaktiven Abfälle*.

Nagra - Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, 2022a. *Arbeitsbericht NAB 21-06, Betriebskonzept für die geologische Tiefenlagerung.*

Nagra - Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, 2022b. *Der Standort für das Tiefenlager, Der Vorschlag der Nagra.*

Nagra - Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, 2023. *Das geologische Tiefenlager: Abfälle im Untergrund sicher entsorgen*, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle. [Online] available at: <https://nagra.ch/wissensforum/das-geologische-tiefenlager/>, zuletzt geprüft am 13.07.2023.

NDA - Nuclear Decommissioning Authority, 2017. *Geological Disposal, Review of Alternative Radioactive Waste Management Options* (NDA Report Radioactive Waste Management, 146).

NDA - Nuclear Decommissioning Authority (Hg.), 2020. *Near-Surface Disposal Strategic Position Paper.*

NEA, 1993. *Disposal of radioactive waste, The cost of high-level waste disposal in geological repositories : an analysis of factors affecting cost estimates*, Nuclear Energy Agency; OECD (Disposal of radioactive waste). Paris: Nuclear Energy Agency, Organisation for Economic Co-operation and Development.

NES - Nuclear Engineering Seibersdorf GmbH, 2022. Studie für den Entsorgungsbeirat zum Thema Inventar radioaktiver Abfälle (Bericht Nr.: 2022/015).

OECD NEA - ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT, NUCLEAR ENERGY AGENCY, 1999. *LOW-LEVEL RADIOACTIVE WASTE REPOSITORIES, An Analysis of Costs*. Paris, France.

ONDRAF - Organisme national des déchets radioactifs et des matières fissiles enrichies, 2012. *ONDRAF/NIRAS Research, Development and Demonstration (RD&D) Plan, for the geological disposal of high-level and/or long-lived radioactive waste including irradiated fuel if considered as waste.*

Pusch, R., Yong, R. N. & Nakano, M., 2017. *Geologic Disposal of Low- and Intermediate-Level Radioactive Waste*. Milton: CRC Press.

République Française, 2017. Sixth National Report on Compliance with the Joint Convention Obligations, Joint Convention on the safety of the management of spent fuel and on the safety of the management of radioactive waste. [Online] available at: <https://www.iaea.org/sites/default/files/6rm-france.pdf>.

Seetharam, S., Perko, J., Mallants, D, Jacques, D., 2011. *Model assumptions for the cementitious near field of the Dessel near surface repository, Project near surface disposal of category A waste at Dessel* (Technical Report, NIROND-TR 2008–12E V1). Organisme national des déchets radioactifs et des matières fissiles enrichies.

SKB - Svensk Kärnbränslehantering AB, 1995. *Prestudy of final disposal of long-lived low and intermediate level waste* (Technical Report, 95-03).

SKB - Svensk Kärnbränslehantering AB, 2013. *SFL concept study. Main report* (Technical Report, TR-13-14).

SKB - Svensk Kärnbränslehantering AB, 2017. *Plan 2016, Costs from and including 2018 for the radioactive residual products from nuclear power. Basis for fees and guarantees for the period 2018-2020* (Technical Report, 17-02). Stockholm, Sweden.

SKB - Svensk Kärnbränslehantering AB, 2018. *Extending the SFR*. Factsheet.

StrSchG, 2020. Bundeskanzleramt Österreich. *Bundesgesetz über Maßnahmen zum Schutz vor Gefahren durch ionisierende Strahlung* (Strahlenschutzgesetz 2020 – StrSchG 2020), StrSchG.

UNECE - United Nations Economic Commission for Europe, 2023. *About the ADR, Agreement concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Road*, United Nations Economic Commission for Europe. [Online] available at: <https://unece.org/about-adr>.

USDOE - U.S. Department of Energy, 2011. *International Low Level Waste Disposal Practices and Facilities*. Unter Mitarbeit von Mary Finster and Sunita Kamboj (Fuel Cycle Research & Development, ANL-FCT-324). Argonne National Laboratory.

USDOE - U.S. Department of Energy, 2012. *Blue Ribbon Commission on America's Nuclear Future*. [Online] available at: https://www.energy.gov/sites/prod/files/2013/04/f0/brc_finalreport_jan2012.pdf, zuletzt geprüft am 15.01.2021.

USDOE - U.S. Department of Energy, 2016, *Final Environmental Impact Statement for the Disposal of Greater-Than-Class C (GTCC) Low Level Radioactive Waste and GTCC-Like Waste* (DOE/EIS-375), Summary (DOE/EIS-375).

van Geet, M., Levasseur, S. & Sillen, X., 2019. *Stockage géologique de déchets radioactifs en Belgique? Rôle et missions de l'ONDRAF/NIRAS*. Organisme national des déchets radioactifs et des matières fissiles enrichies, 07.03.2019.

Wagner, Erika, M.; Semmelrock-Picej, Maria, Th., 2022. *Rahmenbedingungen für die Entsorgung radioaktiver Abfälle, Zwischenbericht*. Johannes Kepler Universität Linz (Hg.)

Abkürzungen

ADR	Accord européen relatif au transport international des marchandises Dangereuses par Route (deutsch: Europäisches Übereinkommen über die internationale Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße)
Andra	Agence Nationale pour la Gestion des Déchets Radioactifs (deutsch: Nationale Einrichtung für die Entsorgung radioaktiver Abfälle)
BGE	Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH
BMK	Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie
Bq	Becquerel
BLT	Bohrlochteufe
CSA	Centre de Stockage de l'Aube
Cigéo	Centre industriel de stockage géologique
CIRES	Centre Industriel de Regroupement, d'Entreposage et de Stockage (Deutsch: Industrielles Zentrum für Sammlung, Zwischenlagerung und Endlagerung)
Cs	Cäsium
Deko	Dekommissionierung
DSRS	Disused Sealed Radioactive Sources (deutsch: umschlossene hochradioaktive Strahlenquellen)
ENRESA	Empresa Nacional de Residuos Radiactivos (deutsch: Nationale Gesellschaft für radioaktive Abfälle)
ERDO	European Repository Development Organisation
EURATOM	Europäische Atomgemeinschaft
ET	Einlagerungstiefe
EZ	Einlagerungszone
FBL	Flache Bohrlochlagerung
F&E	Forschung und Entwicklung
KORAD	Korean Radioactive Waste Agency (deutsch: koreanische Agentur für radioaktive Abfälle)
HBL	Horizontale Bohrlochlagerung
HLW	High-Level Waste (deutsch: hochradioaktive Abfälle)
IAEA	International Atomic Energy Agency (deutsch: Internationale Atomenergie Organisation)

ILW	Intermediate-Level Waste (deutsch: mittelradioaktive Abfälle)
LILW	Low- and intermediate-Level Waste (deutsch: schwach- und mittelradioaktive Abfälle)
LILW-SL	Low- and intermediate-Level Waste-Short Lived (deutsch: kurzlebige schwach- und mittelradioaktive Abfälle)
LILW-LL	Low- and intermediate-Level Waste-Long Lived (deutsch: langlebige schwach- und mittelradioaktive Abfälle)
LL	Long-lived (deutsch: langlebig)
LLW	Low-Level Waste (deutsch: schwachradioaktive Abfälle)
MBL	Mittlere Bohrlochlagerung
MIF	Medizin, Industrie, Forschung
Mio.	Millionen
Mrd.	Milliarden
mSv	Millisievert
Nagra	Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle
NDA	Nuclear Decommissioning Authority
NES	Nuclear Engineering Seibersdorf GmbH
NND	Norwegian Nuclear Decommissioning (deutsch: norwegische Entsorgungsgesellschaft)
ONDRAF/NIRAS	Organisme national des déchets radioactifs et des matières fissiles enrichies (deutsch: Nationale Einrichtung für radioaktive Abfälle und angereichertes Material)
SFL	Schwedisches Endlager für langlebige radioaktive Abfälle
SFR	Schwedisches Endlager für kurzlebige radioaktive Abfälle
SKB	Svensk Kärnbränslehantering Aktiebolag
SL	Short-lived (deutsch: kurzlebige)
Sr	Strontium
StrSchG	Strahlenschutzgesetz
TBL	Tiefe Bohrlochlagerung
TU	Technische Universität
VLLW	Very Low-Level Waste (deutsch: sehr schwachradioaktive Abfälle)
VSLW	Very Short-Lived Waste (deutsch: sehr kurzlebige Abfälle)

WAC	Waste Acceptance Criteria (deutsch: Abfallannahmekriterien)
WLDC	Wolsong LILW Diposal Centre
W&T	Wissenschaft und Technik

Österreichischer Beirat für die Entsorgung radioaktiver Abfälle

kontakt@entsorgungsbeirat.gv.at

entsorgungsbeirat.gv.at