

# Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung



| Projekt | PSP-Element | Funktion/Thema | Komponente | Baugruppe | Aufgabe | UA | Lfd.-Nr. | Rev |
|---------|-------------|----------------|------------|-----------|---------|----|----------|-----|
| NAAN    | NNNNNNNNNN  | NNAAANN        | AANNNA     | AANN      | AAAA    | AA | NNNN     | NN  |
| SG      | 0330        |                |            |           | EA      | TF | 0002     | 00  |

Blatt: 116

## 4.2 Vorläufige Auslegung des Endlagers

Die in diesem Kapitel beschriebene vorläufige Auslegung des Endlagers gemäß § 6 Abs. 4 Endl-SiUntV schließt den Teil der Grundlagenerarbeitung im Rahmen der rvSU ab und liefert wichtige Eingangsgrößen für die Analyse des Endlagersystems (§ 7 Endl-SiUntV), siehe Abbildung 14.

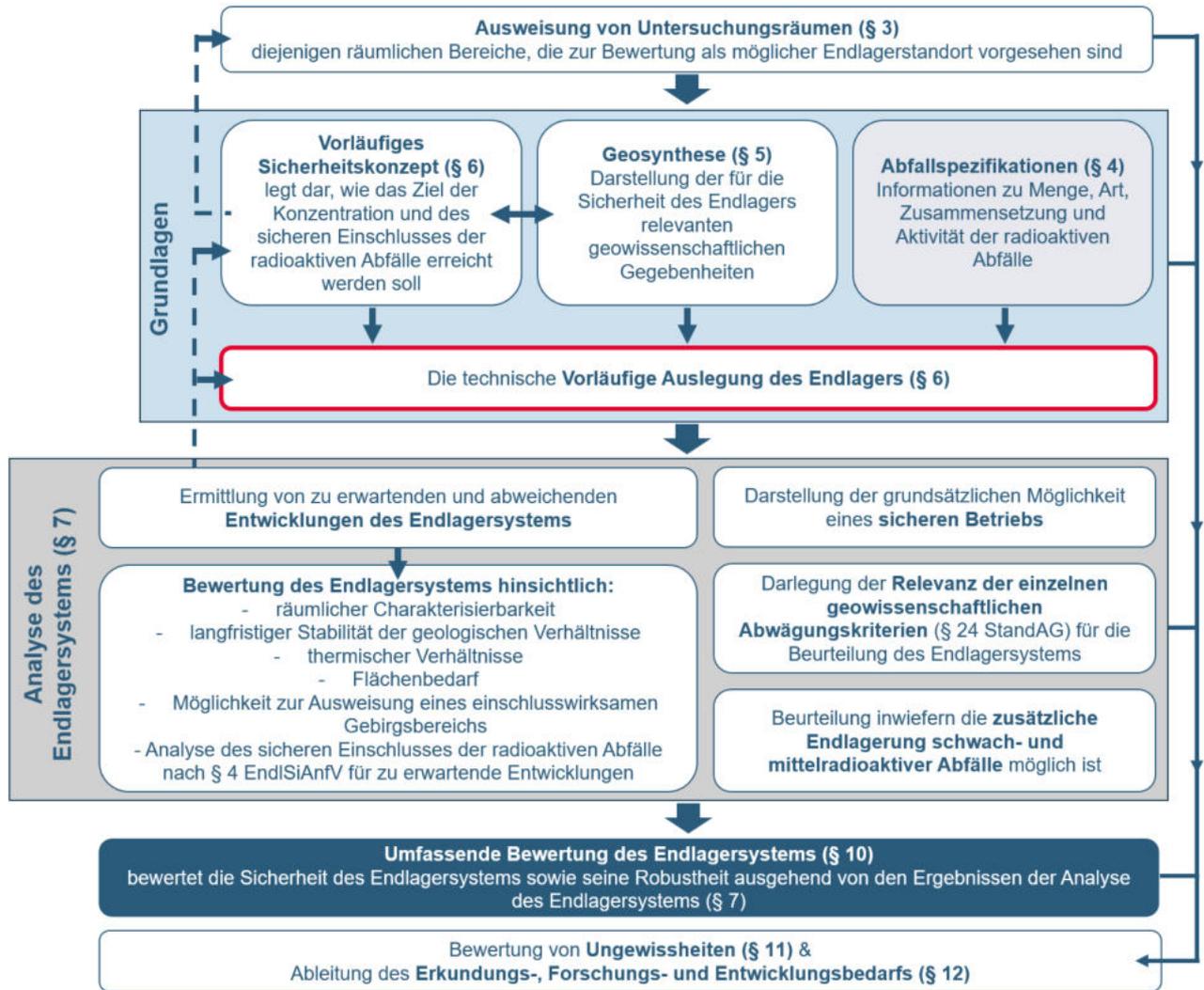


Abbildung 14: Einordnung der vorläufigen Auslegung des Endlagers in den Kontext der rvSU. Die Abfallspezifikationen müssen einmalig zusammengestellt werden, während alle anderen Arbeitsschritte (§§ 5 bis 12) je Untersuchungsraum durchzuführen sind.

## Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung



| Projekt | PSP-Element | Funktion/Thema | Komponente | Baugruppe | Aufgabe | UA | Lfd.-Nr. | Rev |
|---------|-------------|----------------|------------|-----------|---------|----|----------|-----|
| NAAN    | NNNNNNNNNN  | NNAAANN        | AANNNA     | AANN      | AAAA    | AA | NNNN     | NN  |
| SG      | 0330        |                |            |           | EA      | TF | 0002     | 00  |

Blatt: 117

### 4.2.1 Einleitung

Für jeden Untersuchungsraum ist in Übereinstimmung mit dem vorläufigen Sicherheitskonzept eine vorläufige Auslegung des Endlagers zu erstellen, die in den rvSU gemäß § 6 Abs. 4 EndlSiUntV folgende Inhalte umfassen muss:

1. *„die Beschreibung der wesentlichen Barrieren nach § 4 Abs. 3 EndlSiAnfV, deren grundlegende Eigenschaften und deren räumliche Erstreckung sowie die Beschreibung der weiteren Barrieren des Endlagersystems,*
2. *die maximale Größe eines möglichen Endlagerbergwerkes, einschließlich der Zugangs- und Bewetterungsbauwerke und der Infrastrukturbereiche, sowie die geplante Tiefenlage,*
3. *die geplante Art der Einlagerung,*
4. *mögliche Maßnahmen zur Gewährleistung der Rückholbarkeit bereits eingelagerter Endlagergebäude,*
5. *mögliche Verschluss- und Versatzmaßnahmen und*
6. *mögliche Maßnahmen zur Geringhaltung der Schädigung der wesentlichen Barrieren während der Erkundung, der Errichtung, dem Betrieb und der Stilllegung des Endlagers.“*

Trotz des reduzierten Detaillierungsgrades der vorläufigen Auslegung des Endlagers im Rahmen der rvSU gegenüber den Inhalten gemäß § 11 EndlSiAnfV ist die Durchführung aufgrund der hohen Anzahl der zu bearbeitenden Untersuchungsräume bzw. Teiluntersuchungsräume sowie der großen Fläche, die diese abdecken, eine große Herausforderung. In den rvSU müssen für alle auf Grundlage der jeweiligen Geosynthese potenziell geeigneten Gebiete vorläufige Auslegungen des Endlagers durchgeführt werden. Allerdings liegen in dieser frühen Phase des Standortauswahlverfahrens nur wenig spezifische Daten für die einzelnen Untersuchungsräume bzw. Teiluntersuchungsräume vor. Um dieser Herausforderung zu begegnen, wurde eine 2-stufige Methodik zur Erarbeitung von vorläufigen Auslegungen des Endlagers entwickelt, die in Kapitel 4.2.2 zusammenfassend beschrieben wird. Anschließend werden ab Kapitel 4.2.3 die einzelnen Schritte der Vorgehensweise der wirtsgesteinsspezifischen Auslegung im Detail beschrieben und mit Beispielen dazu und zur (teil-)untersuchungsraumspezifischen Auslegung ergänzt.

Zum derzeitigen Stand der Methodenentwicklung zur vorläufigen Auslegung des Endlagers für die rvSU werden folgende Punkte zugrunde gelegt:

1. Die hier vorgestellte grundlegende Methodik ist allgemeingültig für die Erarbeitung vorläufiger Auslegungen von Endlagern in allen in Betracht kommenden Wirtsgesteinen. In den Ausführungen zu einzelnen Aspekten der Endlagerauslegung wird im Rahmen dieser Methodenentwicklung nur auf Endlagersysteme des Typ 1 eingegangen (vgl. Kapitel 4.1). Dabei wird die grundsätzliche Auslegung für die Wirtsgesteine Tongestein und Steinsalz detaillierter beschrieben, und anhand von Beispielen speziell für den Opalinuston und eine Salzformation in steiler Lagerung erläutert.

# Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung



| Projekt | PSP-Element | Funktion/Thema | Komponente | Baugruppe | Aufgabe | UA | Lfd.-Nr. | Rev |
|---------|-------------|----------------|------------|-----------|---------|----|----------|-----|
| NAAN    | NNNNNNNNNN  | NNAAANN        | AANNNA     | AANN      | AAAA    | AA | NNNN     | NN  |
| SG      | 0330        |                |            |           | EA      | TF | 0002     | 00  |

Blatt: 118

2. Das kristalline Wirtsgestein wird in den hier gezeigten Beispielen zur vorläufigen Auslegung des Endlagers noch nicht betrachtet. Die hier vorgestellte grundlegende Methodik zur Erarbeitung von vorläufigen Auslegungen des Endlagers kann auch auf ein Endlagersystem Typ 2 angewendet werden. Die besonderen Herausforderungen bei der Entwicklung von Endlagerkonzepten in kristallinem Wirtsgestein sind in Anhang 2 dargestellt.
3. Die Teufenbereiche, die aktuell bei den vorläufigen Endlagerauslegungen und damit in den Berechnungen zur Bestimmung der maximalen Größe eines möglichen Endlagerbergwerks innerhalb der rvSU berücksichtigt werden, sind 350 m bis 900 m für Tongestein (Opalinuston) und 450 m bis 1 200 m für Steinsalz (in steiler Lagerung). Die Festlegung eines im Rahmen der vorläufigen Endlagerauslegung zu betrachtenden Teufenbereiches für kristallines Wirtsgestein steht noch aus.

## 4.2.2 Zusammenfassende Beschreibung der Methodik für die vorläufige Auslegung des Endlagers

Das Vorgehen der 2-stufigen Methodik ist in Abbildung 15 und Abbildung 16 schematisch dargestellt. Im ersten Teil wird die vorläufige Auslegung des Endlagers grundlegend, wirtsgesteinsspezifisch und unabhängig von den weiteren geologischen Gegebenheiten der einzelnen Untersuchungs-räume bzw. Teiluntersuchungsräume durchgeführt, siehe Abbildung 15. Ziel ist es, pro Wirtsgestein den Endlagerflächenbedarf als Funktion der initialen Temperatur im Einlagerungsbereich  $T_{EB}$ , also der Temperatur vor Beginn der Einlagerung der wärmeentwickelnden radioaktiven Abfälle, und der Teufenlage des Endlagers zu erarbeiten. Im anschließenden zweiten Teil wird die wirtsgesteinsspezifische Endlagerauslegung mit (teil-)untersuchungsraumspezifischen Daten zu den geologischen Barrieren, Teufe und  $T_{EB}$  an den jeweiligen Untersuchungsraum bzw. Teiluntersuchungsraum angepasst, siehe Abbildung 16.

Zu Beginn des ersten Teils der Methodik müssen einige Grundlagen zur Verfügung stehen (siehe Kapitel 4.2.3). Dazu zählen die Inventardaten des endzulagernden hochradioaktiven Abfalls (HAA), also Informationen über dessen Art, Menge und Eigenschaften (siehe Kapitel 2), typische Wirtsgesteinseigenschaften sowie das vorläufige Sicherheitskonzept des Endlagersystems (siehe Kapitel 4.1).

# Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung

| Projekt | PSP-Element | Funktion/Thema | Komponente | Baugruppe | Aufgabe | UA | Lfd.-Nr. | Rev |
|---------|-------------|----------------|------------|-----------|---------|----|----------|-----|
| NAAN    | NNNNNNNNNN  | NNAAANN        | AANNNA     | AANN      | AAAA    | AA | NNNN     | NN  |
| SG      | 0330        |                |            |           | EA      | TF | 0002     | 00  |

Blatt: 119

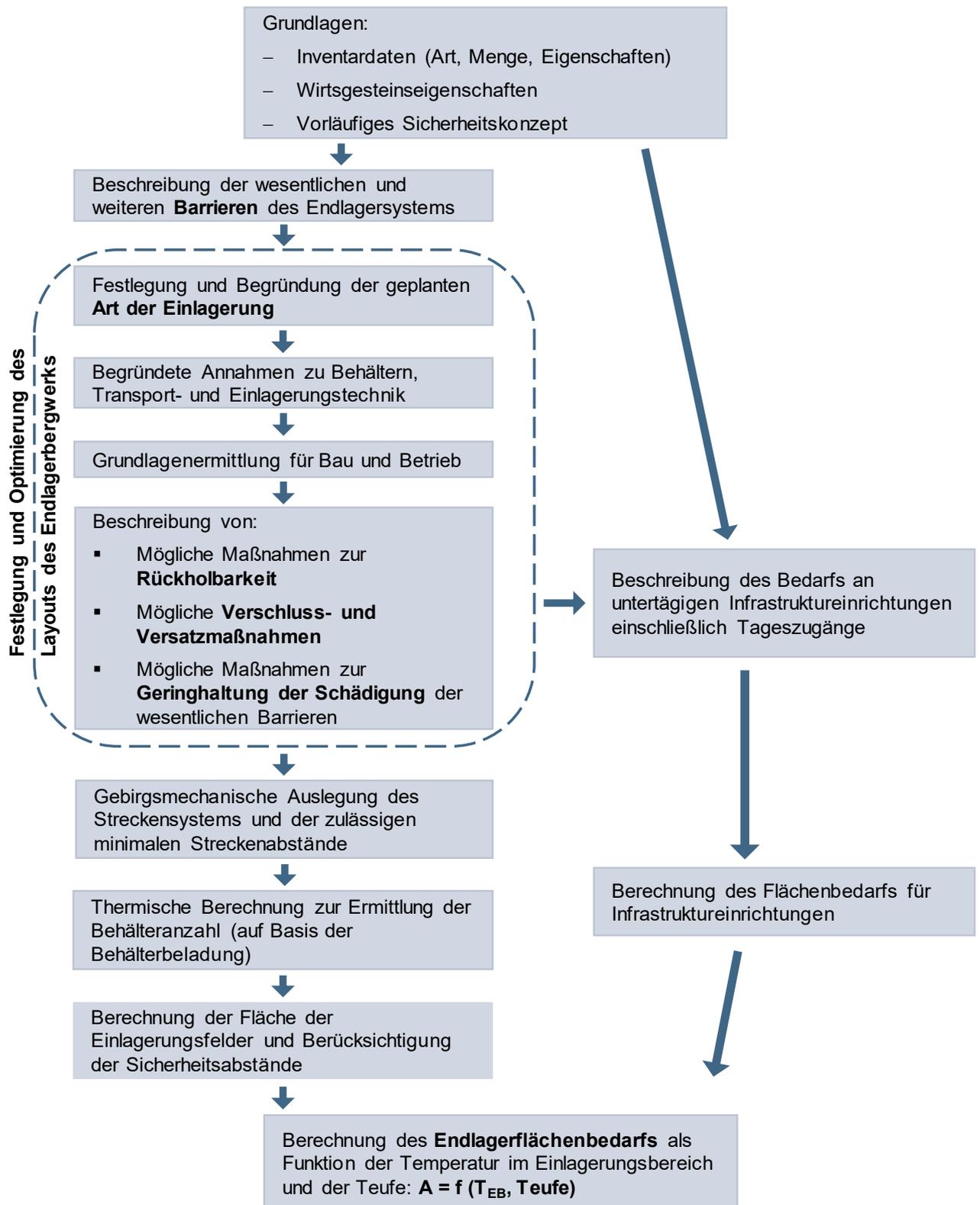


Abbildung 15: Schematische Darstellung der Methodik zur wirtsgesteinsspezifischen vorläufigen Endlagerauslegung im Rahmen der rvSU (Teil 1 der Methodik)

## Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung



| Projekt | PSP-Element | Funktion/Thema | Komponente | Baugruppe | Aufgabe | UA | Lfd.-Nr. | Rev |
|---------|-------------|----------------|------------|-----------|---------|----|----------|-----|
| NAAN    | NNNNNNNNNN  | NNAAANN        | AANNNA     | AANN      | AAAA    | AA | NNNN     | NN  |
| SG      | 0330        |                |            |           | EA      | TF | 0002     | 00  |

Blatt: 120

Mit diesen Grundlagen erfolgen die vorläufigen Endlagerauslegungen nach § 6 Abs. 4 EndlSiUntV zunächst wirtsgesteinsspezifisch. Im ersten Schritt einer jeden vorläufigen Endlagerauslegung werden auf Basis des zugrundeliegenden vorläufigen Sicherheitskonzepts (siehe Kapitel 4.1) die wesentlichen und weiteren Barrieren des Endlagersystems beschrieben, siehe Kapitel 4.2.4. Es folgt für die verschiedenen Wirtsgesteine die vorläufige Festlegung der geplanten Art der Einlagerung, also wie die hochradioaktiven Abfälle in ein Endlagerbergwerk eingelagert werden sollen. Die Begründung der vorläufigen Festlegung erfolgt dabei verbalargumentativ unter Berücksichtigung der Aspekte Betriebs- und Langzeitsicherheit, technische Reife und Robustheit der Einlagerungsart sowie Rückholbarkeit, siehe Kapitel 4.2.5. Mit der Festlegung der geplanten Einlagerungsart beginnen auch die Arbeiten zur Festlegung und Optimierung des Layouts des Endlagerbergwerks für die rvSU. In die Bearbeitung des Layouts gehen zudem Aspekte aus den nachfolgenden drei Schritten der vorläufigen Endlagerauslegung ein (vgl. gestrichelte Umrandung in Abbildung 15).

So werden im nächsten Schritt auf Grundlage der Beschreibung der wesentlichen und weiteren Barrieren sowie der geplanten Art der Einlagerung begründete Annahmen zum Endlagerbehälter sowie der entsprechenden Transport- und Einlagerungstechnik getroffen, siehe Kapitel 4.2.6.2 und Kapitel 4.2.6.3. Konkrete Endlagerbehälterkonzepte, die die hohen Anforderungen nach deutschem Recht (insbesondere hinsichtlich Rückholbarkeit und Bergbarkeit) nachweisbar erfüllen können (BGE 2021b), liegen derzeit noch nicht vor, die Entwicklung von entsprechenden Endlagerbehälterkonzepten befindet sich jedoch in der Vorbereitung. Daher werden ausschließlich begründete Annahmen und Analogieschlüsse zum Behälterkonzept sowie zur Transport- und Einlagerungstechnik aus Ergebnissen von Forschungsarbeiten und anderen Endlagerprojekten formuliert. Mit der geplanten Art der Einlagerung, den Behälterannahmen und der Transport- und Einlagerungstechnik liegen die ersten Aspekte zur Erarbeitung des prinzipiellen Layouts, also einer Vorstellung des Aufbaus des Endlagerbergwerks, vor.

Mit den weiteren Schritten wird das Layout des Endlagerbergwerks weiterentwickelt und optimiert. Dabei werden zunächst die Grundlagen zum Bau und Betrieb des auszulegenden Endlagers ermittelt, siehe Kapitel 4.2.6.4. Anschließend werden durch die Beschreibungen von möglichen Maßnahmen zur Rückholbarkeit, möglichen Verschluss- und Versatzmaßnahmen und möglichen Maßnahmen zur Geringhaltung der Schädigung der geologischen Barrieren weitere Teile der vorläufigen Auslegung des Endlagers erarbeitet, siehe Kapitel 4.2.6.5 bis Kapitel 4.2.6.7. Bei der Planung wird geprüft, ob die einzelnen Aspekte Auswirkungen oder Rückwirkungen auf andere Aspekte haben. Dementsprechend werden die einzelnen Planungsteile angepasst bzw. überarbeitet. Zusätzlich erfolgt gemäß Abbildung 15 die Beschreibung der notwendigen untertägigen Infrastruktureinrichtungen einschließlich der Tageszugänge und einer abgeschätzten Flächenbedarfsbestimmung in Abhängigkeit der Teufe, siehe Kapitel 4.2.6.8. Auf Basis der bis hierhin erarbeiteten Aspekte kann das grundsätzliche Layout des Endlagerbergwerks für die rvSU abschließend festgelegt werden.

Anhand des grundsätzlichen Layouts des Endlagerbergwerks ist ersichtlich, an welchen Stellen geobirgsmechanische Berechnungen zur Ermittlung zulässiger minimaler Streckenabstände notwendig sind, siehe Kapitel 4.2.7. Hierbei werden mögliche Arten von Streckenausbauten berücksichtigt. Auf-

## Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung



| Projekt | PSP-Element | Funktion/Thema | Komponente | Baugruppe | Aufgabe | UA | Lfd.-Nr. | Rev |
|---------|-------------|----------------|------------|-----------|---------|----|----------|-----|
| NAAN    | NNNNNNNNNN  | NNAAANN        | AANNNA     | AANN      | AAAA    | AA | NNNN     | NN  |
| SG      | 0330        |                |            |           | EA      | TF | 0002     | 00  |

Blatt: 121

grund der unzureichenden Datengrundlage im aktuellen Verfahrensschritt bezüglich der felsmechanischen Eigenschaften der Wirtsgesteins- und Deckgebirgsschichten werden überschlägige Berechnungen mit Werten, die für das jeweilige Wirtsgestein repräsentativ sind, durchgeführt. Die minimal zulässigen Abstände sind insbesondere abhängig vom Gebirgsdruck und damit von der Teufe des Einlagerungsbereichs.

Die Ausarbeitungen zum Layout des Endlagerbergwerks und die Annahmen zu den Endlagerbehältern bilden zusammen mit den Ergebnissen der gebirgsmechanischen Berechnung den Ausgangspunkt für Bemessungen zur Ermittlung der maximalen Größe eines möglichen Endlagerbergwerks, siehe Kapitel 4.2.8. Dazu gehört insbesondere die thermische Berechnung der notwendigen Anzahl an Endlagerbehältern pro Abfallart in Abhängigkeit von der initialen Temperatur im Einlagerungsbereich  $T_{EB}$ , der Teufe, dem Streckenabstand sowie dem Behälterabstand und der Behälterbeladung. Auslegungskriterium ist hierbei die gemäß § 27 Abs. 4 StandAG derzeit geltende Grenztemperatur von 100 °C an der Außenfläche der Behälter. Auf Grundlage der Streckenabstände, Behälterabstände und -anzahl der einzelnen Abfallarten erfolgt die Berechnung des Flächenbedarfs der Einlagerungsfelder. Zusätzlich werden auch die Sicherheitsabstände des Endlagers berücksichtigt. Die Sicherheitsabstände sind Abgrenzungen zum umgebenden Neben- und Deckgebirge und müssen im intakten Wirtsgestein liegen. Die sich daraus ergebenden Mindestabstandsflächen werden zum Flächenbedarf des Endlagerbergwerks hinzuaddiert.

Im letzten Schritt des ersten Teils der Methodik werden die Ergebnisse der wirtsgesteinsspezifischen Auslegung zusammengeführt und der gesamte Endlagerflächenbedarf als Funktion der initialen Temperatur im Einlagerungsbereich  $T_{EB}$  und der Teufe grafisch dargestellt, siehe Kapitel 4.2.8.7.

Bei der Bearbeitung der beschriebenen Schritte wird die wirtsgesteinsspezifische Auslegung des Endlagers in Hinblick auf Betriebs- und Langzeitsicherheit optimiert. Damit ist die wirtsgesteinsspezifische vorläufige Endlagerauslegung abgeschlossen.

# Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung

| Projekt | PSP-Element | Funktion/Thema | Komponente | Baugruppe | Aufgabe | UA | Lfd.-Nr. | Rev |
|---------|-------------|----------------|------------|-----------|---------|----|----------|-----|
| NAAN    | NNNNNNNNNN  | NNAAANN        | AANNNA     | AANN      | AAAA    | AA | NNNN     | NN  |
| SG      | 0330        |                |            |           | EA      | TF | 0002     | 00  |

Blatt: 122

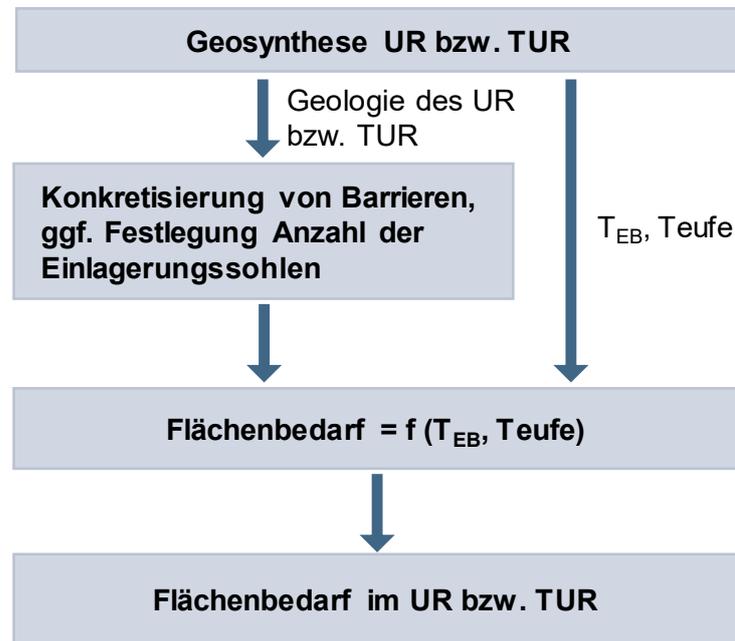


Abbildung 16: Schematische Darstellung der Methodik zur (teil-)untersuchungsraumspezifischen vorläufigen Endlagerauslegung im Rahmen der rvSU (Teil 2 der Methodik)

Mit dem zweiten Teil der Methode wird die wirtsgesteinsspezifische vorläufige Auslegung des Endlagers hinsichtlich des jeweils zu betrachteten Untersuchungsraums bzw. Teiluntersuchungsraums fortgeführt und angepasst, siehe Abbildung 16. Aufgrund der Informationen zur Geologie (z. B. räumliche Erstreckung des Wirtsgesteinsbereichs mit Barrierenfunktion, der einen einschlusswirksamen Gebirgsbereich aufnehmen kann, und Informationen zum Deckgebirge) aus der Geosynthese des Untersuchungsraums bzw. Teiluntersuchungsraums (siehe Kapitel 5.7) werden die Beschreibungen der entsprechenden Barrieren konkretisiert. Zusätzlich muss auf Basis der horizontalen und vertikalen Ausdehnung des Wirtsgesteinsbereichs mit Barrierenfunktion ggf. entschieden werden, ob die Einlagerung auf ein oder auf zwei Einlagerungssohlen stattfinden soll. Sollte diese Option bei einem der Wirtsgesteine grundsätzlich in Frage kommen, so werden bei allen Aspekten der wirtsgesteinsspezifischen Auslegung des Endlagers bereits beide Optionen verfolgt.

In einem weiteren Schritt werden aus der entsprechenden Geosynthese Informationen zur Teufe des Wirtsgesteinsbereichs mit Barrierenfunktion im jeweiligen Untersuchungsraums bzw. Teiluntersuchungsraums sowie der zugehörigen initialen Temperatur im Einlagerungsbereich entnommen. Unter Verwendung dieser ortspezifischen Daten wird mit der im Rahmen von Teil 1 der Methodik erarbeiteten wirtsgesteinsspezifischen Flächenbedarfsfunktion der Flächenbedarf für den Untersuchungsraum bzw. Teiluntersuchungsraum ermittelt. Der ermittelte Flächenbedarf bildet eine Grundlage für die gemäß § 7 EndlSiUntV durchzuführenden Bewertungen im Rahmen der Analyse des geplanten Endlagersystems (vgl. Kapitel 8).

## Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung



| Projekt | PSP-Element | Funktion/Thema | Komponente | Baugruppe | Aufgabe | UA | Lfd.-Nr. | Rev |
|---------|-------------|----------------|------------|-----------|---------|----|----------|-----|
| NAAN    | NNNNNNNNNN  | NNAAANN        | AANNNA     | AANN      | AAAA    | AA | NNNN     | NN  |
| SG      | 0330        |                |            |           | EA      | TF | 0002     | 00  |

Blatt: 123

### 4.2.3 Grundlagen

#### 4.2.3.1 Abfallinventar

Innerhalb der vorläufigen Auslegung des Endlagers ist ein genauer Kenntnisstand über das einzulagernde Abfallinventar essentiell, um den Flächenbedarf für das Endlager möglichst präzise abschätzen zu können. Die prognostizierten Abfallmengen pro Inventarart werden durch das sog. Abfallmengengerüst spezifiziert. Auf Basis des Abfallmengengerüsts kann der Flächenbedarf für die Einlagerungsfelder abgeschätzt werden. Für die Abfallinventararten mit signifikanter Wärmefreisetzungsrates sind zudem Approximationen der zeitlich veränderlichen Wärmeleistungen notwendig, da diese eine wesentliche Eingangsgröße in den Simulationsmodellen zur Flächenbedarfsberechnung darstellen. Detaillierte Informationen zum Abfallinventar finden sich im Kapitel 2.

#### 4.2.3.2 Wirtsgesteinseigenschaften

Für die wirtsgesteinsspezifische Abschätzung der Flächenbedarfe sind insbesondere die thermophysikalischen sowie die gebirgsmechanischen Eigenschaften der Wirtsgesteine von Bedeutung. Die einzelnen Wirtsgesteine weisen eine sehr unterschiedliche Charakteristik hinsichtlich ihrer Materialparameter auf, wodurch auch die finalen Flächenbedarfsprognosen wesentlich beeinflusst werden. Die gebirgsmechanischen Kennwerte (z. B. Druckfestigkeit) gehen insbesondere in die Abschätzung der notwendigen Pfeilergrößen für das Endlagerbergwerk ein. Eine ausführliche Beschreibung zu dieser Thematik findet sich in Kapitel 4.2.7 Die thermophysikalischen Parameter (z. B. Wärmeleitfähigkeit) fließen in die Flächenbedarfsberechnungen der wärmeentwickelnden Abfallarten mit ein. Hierzu finden sich ausführlichere Informationen in Kapitel 4.2.8.

#### 4.2.3.3 Sicherheitskonzept

Gemäß § 6 Abs. 1 EndSiUntV muss in den rvSU ein vorläufiges Sicherheitskonzept für jeden Untersuchungsraum erstellt werden. Das Sicherheitskonzept eines Endlagersystems gibt die wesentliche Strategie wieder, mit der das Ziel der Konzentration und des sicheren Einschlusses der radioaktiven Abfälle nach § 4 Abs. 1 EndSiAnfV erreicht werden soll. Dabei muss das Sicherheitskonzept alle Phasen des Endlagersystems von Errichtung über Betrieb und Stilllegung bis in die Nachverschlussphase abdecken (§ 10 Abs. 1 EndSiAnfV). Das Kernstück des vorläufigen Sicherheitskonzeptes ist die Darstellung der Barrieren des Endlagersystems und deren Sicherheitsfunktionen. Dieses wird zunächst wirtsgesteinsspezifisch erarbeitet, vgl. Kapitel 4.1. Damit dient das vorläufige Sicherheitskonzept als Grundlage für die Beschreibung der wesentlichen und weiteren Barrieren bei der wirtsgesteinsspezifischen und der (teil-)untersuchungsraumspezifischen vorläufigen Auslegung des Endlagers.

#### 4.2.4 Beschreibung der wesentlichen und weiteren Barrieren des Endlagersystems

Eine ausführliche Beschreibung der Barrieren, ihrer Sicherheitsfunktionen und der Einteilung in wesentliche und weitere Barrieren erfolgt in Kapitel 4.1, weshalb innerhalb der Methodenbeschreibung zur vorläufigen Auslegung des Endlagers nicht erneut auf die Grundlagen zum Barrierensystem ein-

# Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung



| Projekt | PSP-Element | Funktion/Thema | Komponente | Baugruppe | Aufgabe | UA | Lfd.-Nr. | Rev |
|---------|-------------|----------------|------------|-----------|---------|----|----------|-----|
| NAAN    | NNNNNNNNNN  | NNAAANN        | AANNNA     | AANN      | AAAA    | AA | NNNN     | NN  |
| SG      | 0330        |                |            |           | EA      | TF | 0002     | 00  |

Blatt: 124

gegangen wird. Wie in Kapitel 4.2.1 beschrieben, erfolgt die wirtsgesteinsspezifische vorläufige Auslegung des Endlagers zunächst für alle Wirtsgesteinsvarianten entsprechend des Endlagersystems Typ 1. Grundsätzlich werden dabei folgende Barrieren betrachtet:

- geologische Barrieren: der Wirtsgesteinsbereich mit Barrierefunktion sowie das Deck- und Nebengebirge
- geotechnische Barrieren: der Versatz und die Verschlussbauwerke
- technische Barrieren: der Endlagerbehälter und die Abfallform

Im Rahmen der wirtsgesteinsspezifischen vorläufigen Auslegung des Endlagers werden unter Bezugnahme auf das jeweilige vorläufige Sicherheitskonzept und gemäß der Vorgabe nach § 6 Abs. 4 Nr. 1 EndlSiUntV die wesentliche Barriere und deren grundlegende Eigenschaften beschrieben sowie die weiteren Barrieren, die grundsätzlich für das entsprechenden Wirtsgestein in Frage kommen, aufgezählt. Dabei werden die drei oben genannten Barrierearten den wesentlichen und weiteren Barrieren zugeordnet und wirtsgesteinsspezifisch beschrieben.

Eine Konkretisierung der Beschreibung der wesentlichen (z. B. räumliche Erstreckung) und weiteren Barrieren (z. B. Neben- und Deckgebirge) erfolgt mit dem zweiten Teil der Methodik in der für einen Untersuchungsraum bzw. Teiluntersuchungsraum angepassten vorläufigen Auslegung des Endlagers, siehe Abbildung 16 und Kapitel 4.2.10.

## 4.2.5 Geplante Art der Einlagerung

Für die Einlagerung von hochradioaktiven Abfällen sind international im Wesentlichen drei Konzepte bekannt, wobei sich die technische Ausgestaltung im Einzelnen von Land zu Land unterscheidet. Die erwähnten drei wesentlichen Konzepte sind:

- die Einlagerung in horizontalen Strecken  
(so vorgesehen z. B. in der Schweiz durch NAGRA (Nagra 2002c)),
- die Einlagerung in horizontalen Bohrlöchern  
(so vorgesehen z. B. in Frankreich durch ANDRA (Andra 2020)),
- die Einlagerung in vertikalen Bohrlöchern  
(so vorgesehen z. B. in Schweden und Finnland durch SKB und Posiva Oy (SKB 2010)).

Grundsätzlich sind der sichere Betrieb und eine langzeitsichere Endlagerung in all diesen Varianten vorstellbar. Die technische Umsetzung der Einlagerungsarten in den jeweiligen Ländern lässt sich jedoch nicht direkt auf die vorläufige Endlagerauslegung im Rahmen der rvSU übertragen, da sich insbesondere Abfallarten und damit Endlagerbehälterkonzepte von Land zu Land deutlich unterscheiden. Darüber hinaus fand in den meisten Ländern eine frühe Festlegung auf ein Wirtsgestein statt, wodurch eine frühe Spezialisierung möglich war, die im Rahmen der rvSU nicht umsetzbar ist. Die Wahl der geplanten Art der Einlagerung für die rvSU orientiert sich deshalb an der technischen Umsetzung, wie sie in der Forschung und Entwicklung für ein Endlager in Deutschland bislang erarbeitet wurde.

## Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung



| Projekt | PSP-Element | Funktion/Thema | Komponente | Baugruppe | Aufgabe | UA | Lfd.-Nr. | Rev |
|---------|-------------|----------------|------------|-----------|---------|----|----------|-----|
| NAAN    | NNNNNNNNNN  | NNAAANN        | AANNNA     | AANN      | AAAA    | AA | NNNN     | NN  |
| SG      | 0330        |                |            |           | EA      | TF | 0002     | 00  |

Blatt: 125

Komplexität, Robustheit und Reifegrad der entsprechenden Technologien sind wichtige Kriterien zur Unterscheidung. Die Einlagerungstechnik in Strecken wurde in den 90er Jahren erstmalig entwickelt. Ein Prototyp wurde gebaut und getestet und ist seitdem Stand der Technik (Engelmann et al. 1995). Sie basierte auf den abschirmenden Behältern des POLLUX® Systems (Bollingerfehr et al. 2012). Die horizontale Bohrlochlagerung wurde innerhalb Deutschlands erstmalig für flach lagernde Steinsalzformationen in (Bollingerfehr et al. 2018) konzeptionell betrachtet. Für die Streckenlagerung sprechen die höhere technische Reife, die einfachere und damit robuste Technik und das aus vielen Forschungsvorhaben (z. B. Bollingerfehr et al. 2018; Bertrams et al. 2017; Jobmann & Lommerzheim 2015)) bekannte Zusammenspiel zwischen Einlagerung, thermischer Endlagerauslegung und Verfüllkonzept. Bei der horizontalen Bohrlochlagerung kommen außerdem insbesondere im Steinsalz und Tongestein noch Anforderungen an die Bohrlochverrohrung hinzu, da Rückholbarkeit nach § 13 EndlSiAnV dort nur mit einer stabilen Bohrlochverrohrung gewährleistet werden kann. Die bisher lediglich konzeptionelle Auslegung der horizontalen Bohrlochlagerung mit offenen Punkten in Bezug auf die Ausführung der Verrohrung und der Verfüllung des Bohrloches lassen die horizontale Bohrlochlagerung im Vergleich zur Streckenlagerung zum jetzigen Zeitpunkt als weniger geeignete Variante zur Verwendung im Rahmen der rvSU erscheinen.

Die Technik der vertikalen Bohrlochlagerung wurde hingegen bereits entwickelt, als Prototyp gebaut und getestet (Filbert et al. 2010). Die technische Reife ist damit vergleichbar zu der der Streckenlagerung und gilt als Stand der Technik. Auch wurde die vertikale Bohrlochlagerung in vielen Vorhaben der Forschung und Entwicklung im Zusammenhang mit Verfüll- und Verschlusskonzepten untersucht (z. B. Bertrams et al. 2017; Bollingerfehr et al. 2018; Lommerzheim & Jobmann 2015). Für die Endlagerauslegung im Rahmen der rvSU wird die Streckenlagerung dennoch auch gegenüber der vertikalen Bohrlochlagerung bevorzugt: Das Konzept der Einlagerung in vertikale Bohrlöcher sieht nicht-selbstabschirmende Behälter vor und erfordert eine höhere technische Komplexität aufgrund der größeren Anzahl notwendiger technischer Sicherheitskomponenten, z. B. eine Bohrlochschleuse und Sicherheitseinrichtungen gegen einen Absturz im Bohrloch. Darüber hinaus sollte auch bei der vertikalen Bohrlochlagerung bedacht werden, dass Endlagergebäude nach 500 Jahren noch erreichbar sein müssen.

Aufgrund der ausgeführten Abwägung wird für ein Endlagersystem Typ 1 (vgl. Kapitel 4.1), ein Endlagersystem bei dem der sichere Einschluss auf einem oder mehreren einschlusswirksamen Gebirgsbereichen beruht, innerhalb der rvSU die Einlagerung in Strecken präferiert. Im Fall eines begrenzten Platzangebots im Wirtsgesteinsbereich mit Barrierefunktion eines Endlagersystems Typ 1 (Steinsalz in steiler Lagerung) wird aufgrund entsprechender ortsspezifischer Informationen hingegen untersucht, ob die Streckenlagerung auf ein oder zwei Einlagerungssohlen geplant werden kann. Dieser Schritt erfolgt im Rahmen des zweiten Teils der Methodik, vgl. Abbildung 16 und Kapitel 4.2.10. Bei der Flächenbedarfsbestimmung innerhalb der wirtsgesteinsspezifischen Auslegung eines Endlagers in Steinsalz in steiler Lagerung müssen bereits beide Optionen berücksichtigt werden.

Eine historische Darstellung der Entwicklung der Transport- und Einlagerungstechnik sowie eine Weiter- bzw. Neuentwicklung nach aktuellem Stand der Technik der Varianten finden sich in

## Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung



| Projekt | PSP-Element | Funktion/Thema | Komponente | Baugruppe | Aufgabe | UA | Lfd.-Nr. | Rev |
|---------|-------------|----------------|------------|-----------|---------|----|----------|-----|
| NAAN    | NNNNNNNNNN  | NNAAANN        | AANNNA     | AANN      | AAAA    | AA | NNNN     | NN  |
| SG      | 0330        |                |            |           | EA      | TF | 0002     | 00  |

Blatt: 126

Bertrams et al. (2021). Beispiel 3 und Beispiel 4 erläutern die Abwägung jeweils für das Tongestein Opalinuston und Steinsalz in steiler Lagerung.

*Beispiel 3:*        *Wirtsgesteinsspezifische Abwägung der Art der Einlagerung für das Tongestein Opalinuston*

### Abwägung der Art der Einlagerung für das Tongestein Opalinuston

Gemäß der beschriebenen Abwägung wird im Opalinuston die Streckenlagerung für die rvSU vorgesehen. Das Konzept der Streckenlagerung im Opalinuston basiert auf der Ablage des Endlagergebindes auf einem Sockel (Jobmann & Lommerzheim 2015). Dieser wird aus Formsteinen errichtet. Durch den Sockel ist das Endlagergebäude nach Einlagerung und Verfüllung des Hohlraums in der Einlagerungsstrecke allseitig von Verfüllmaterial umgeben und kommt nicht in Kontakt mit dem Fahrbahn- oder Ausbaumaterial in der Sohle.

*Beispiel 4:*        *Wirtsgesteinsspezifische Abwägung der Art der Einlagerung für eine steile Salzformation*

### Abwägung der Art der Einlagerung für Steinsalz (steile Lagerung)

Gemäß der beschriebenen Abwägung wird in Steinsalz in steiler Lagerung für die rvSU ebenfalls Streckenlagerung als Art der Einlagerung gewählt. Das Flächenangebot in steilen Salzformationen kann ausreichend sein, um eine die Streckenlagerung auf einer Einlagerungssohle umzusetzen. Allerdings ist es auch möglich, dass das Flächenangebot im Wirtsgestein dafür zu klein ist. In diesem Fall wird die vertikale Bohrlochlagerung oder die Streckenlagerung auf zwei Einlagerungssohlen vorgesehen. Im GzME „Bahlburg“ (035\_00TG\_057\_00IG\_S\_s\_z) ist das Flächenangebot bspw. ausreichend für eine einsöhlige Streckenlagerung (Kapitel 4.2.10). Zur Lagestabilisierung des Behälters wird die Sohle aus Steinsalz der Form des Endlagergebindes leicht angepasst, sodass das Endlagergebäude ca. 5 cm in der Sohle versenkt wird. Nach der Einlagerung erfolgt die Verfüllung des Hohlraumes mit Salzgrus, damit der Behälter allseitig von Steinsalz umgeben ist.

## 4.2.6 Endlagerbergwerk

### 4.2.6.1 Allgemeiner Aufbau des Endlagerbergwerks

Auf Basis der regulatorischen Anforderungen, des Sicherheitskonzepts und der Art der Einlagerung wird im Folgenden beschrieben, wie Auslegungen von Endlagerbergwerken für die rvSU erarbeitet werden sollen. Der für die Endlagerung unter Tage verwendete Bereich des Endlagerbergwerks wird als Einlagerungsbereich bezeichnet. Um der Forderung aus § 18 Abs. 2 EndISiAnfV Rechnung zu tragen, den Einlagerungsbereich gegen das restliche Endlagerbergwerk zu verschließen, werden

## Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung



| Projekt | PSP-Element | Funktion/Thema | Komponente | Baugruppe | Aufgabe | UA | Lfd.-Nr. | Rev |
|---------|-------------|----------------|------------|-----------|---------|----|----------|-----|
| NAAN    | NNNNNNNNNN  | NNAAANN        | AANNNA     | AANN      | AAAA    | AA | NNNN     | NN  |
| SG      | 0330        |                |            |           | EA      | TF | 0002     | 00  |

Blatt: 127

alle anderen notwendigen Bereiche des Bergwerks räumlich vom Einlagerungsbereich getrennt und im Infrastrukturbereich zusammengefasst.

Das Endlagerbergwerk (Abbildung 17) unterteilt sich also in zwei wesentliche Funktionsbereiche: Den Infrastrukturbereich und den Einlagerungsbereich. Im Infrastrukturbereich kommen die Tageszugänge an. Hier befinden sich die notwendigen Werkstätten, Lagerräume und Arbeitsplätze des Betriebspersonals unter Tage. In Abbildung 17 wird die für die Infrastrukturräume vorgesehene Fläche entsprechend markiert. Tageszugänge können als Schächte oder Rampen ausgeführt werden. Im Rahmen der rvSU werden zwei Schächte für den Zugang zum Endlager angenommen. Davon dient einer den konventionellen, betrieblichen Transporten, die Personal, Baustoffe, Maschinen(-teile) oder Werkzeuge umfassen können. Eine solche Schachtförderanlage ist Stand der Technik und kann sicher und über einen langen Zeitraum hinweg betrieben werden. Für die rvSU besteht keine Veranlassung, für diese Aufgaben auf eine deutlich längere Rampe auszuweichen, deren Transportleistung geringer ist und für die ein größerer Aufwand für Auffahrung, Einrichtung sowie Instandhaltung einzuplanen wäre. Der zweite Schacht dient dem Transport der Endlagergebände. International werden hier verschiedene Ansätze verfolgt: einige Länder planen den Transport von hochradioaktiven Abfällen mit Schachtförderanlagen (z. B. Posiva Oy in Finnland, s. (Saanio et al. 2007)), andere mit Rampenfördertechnik (z. B. ANDRA in Frankreich, s. (Andra 2016a)). Beide Varianten wurden durch Auftragnehmer der NAGRA (Messmer & Berger 2014; Sindern & Borowski 2014; Wieser et al. 2014) als sicher für den Transport von hochradioaktiven Abfällen bewertet. Die Endlagerauslegung der rvSU geht auch hier zunächst von einem Schacht und damit von der technisch einfacheren Lösung aus.

Die Anzahl der Tageszugänge bleibt im Rahmen der rvSU auf zwei begrenzt. Mehr als zwei Schächte würden sicherlich aus rein betrieblicher Sicht Vorteile in der Wetterführung oder Steuerung der Betriebsprozesse bieten. Für die rvSU wird jedoch von zwei Schächten ausgegangen, um einerseits nach § 15 Abs. 1 ABergV zwei Zugänge zur Tagesoberfläche vorzuhalten, aber andererseits auch nach § 6 Abs. 4 EndlSiUntV die wesentliche Barriere nur möglichst wenig durch die Erstellung von Tageszugängen zu schädigen. Zusätzliche Tageszugänge sind demnach auch für weitere Phasen der Standortsuche nur zulässig, wenn erhebliche, insbesondere sicherheitsgerichtete Gründe dafürsprechen.

Der Einlagerungsbereich wird aus dem Infrastrukturbereich durch zwei Richtstrecken erschlossen. Von diesen dient eine primär dem Transport der Endlagergebände und von Verfüllmaterial. Die andere steht für weitere betriebliche und bergbauliche Tätigkeiten zur Verfügung. Diese strikte funktionale Trennung der beiden Richtstrecken dient dem betrieblichen Strahlenschutz und basiert auf der Einrichtung von Strahlenschutzbereichen nach § 52 Abs. 2 StrlSchV: einem Kontrollbereich in den Bereichen des Endlagerbergwerks, in denen mit Endlagergebänden umgegangen wird und einem Überwachungsbereich im übrigen Endlagerbergwerk. Darüber hinaus gibt es, wie bei den Schächten, weitere Gründe, zwei Richtstrecken vorzusehen, jedoch auch nicht mehr als zwei. Nach § 15 Abs. 2 ABergV muss jede Betriebsstätte auf mindestens zwei (Flucht-)wegen verlassen werden können. Nach § 18 Abs. 3 EndlSiAnfV sind die Handhabung von Endlagergebänden und bergmännische Arbeiten voneinander zu trennen. Beide Anforderungen können durch das genannte

# Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung



| Projekt | PSP-Element | Funktion/Thema | Komponente | Baugruppe | Aufgabe | UA | Lfd.-Nr. | Rev |
|---------|-------------|----------------|------------|-----------|---------|----|----------|-----|
| NAAN    | NNNNNNNNNN  | NNAAANN        | AANNNA     | AANN      | AAAA    | AA | NNNN     | NN  |
| SG      | 0330        |                |            |           | EA      | TF | 0002     | 00  |

Blatt: 128

Richtstreckensystem erfüllt werden. Darüber hinaus sind zwei Richtstrecken für die Einrichtung der Wetterführung notwendig, um den Einlagerungsbereich mit frischen Wettern (Frischluff) zu versorgen und Abwetter (verbrauchte Luft) abzuführen. Wie bei den Schächten wird auf weitere Richtstrecken zur Erleichterung betrieblicher Prozesse im Rahmen der vorläufigen Endlagerauslegung für die rvSU verzichtet, um nach § 6 Abs. 4 EndlSiUntV die wesentliche Barriere nicht durch die Erstellung von zusätzlichen Strecken mehr als nötig zu schädigen.

Beide Richtstrecken werden in regelmäßigen Abständen durch Querschläge verbunden. Die Querschläge dienen der Wetterführung, der Sicherstellung der Fluchtwege und Erschließung der Einlagerungsstrecken. Die Querschläge werden zunächst nach Erstellung dem Überwachungsbereich, ab Verwendung für die Einlagerung dem Kontrollbereich zugeordnet werden. Dieser Wechsel der Zuordnung zu den Strahlenschutzbereichen gilt auch für die Einlagerungsstrecken. Diese werden von den Querschlägen aus aufgefahren und enden im Gebirge ohne weiteren Anschluss an das Streckensystem. Ein Querschlag und die von ihm ausgehenden Einlagerungsstrecken werden als Einlagerungsfeld bezeichnet. Durch die Endlagerplanung ist eine ausreichende Anzahl und Größe der Einlagerungsfelder vorzusehen, um alle Endlagergebäude einlagern zu können. Die Aufteilung des Einlagerungsbereichs in Einlagerungsfelder ermöglicht eine feldweise Auffahrung und einen entsprechend nachfolgenden Einlagerungsbetrieb. Abbildung 17 zeigt den grundsätzlichen Aufbau des Endlagerbergwerks. Bei der Anwendung dieses Aufbaus auf einen Untersuchungsraum können Anpassungen durch die geologischen Gegebenheiten notwendig werden.

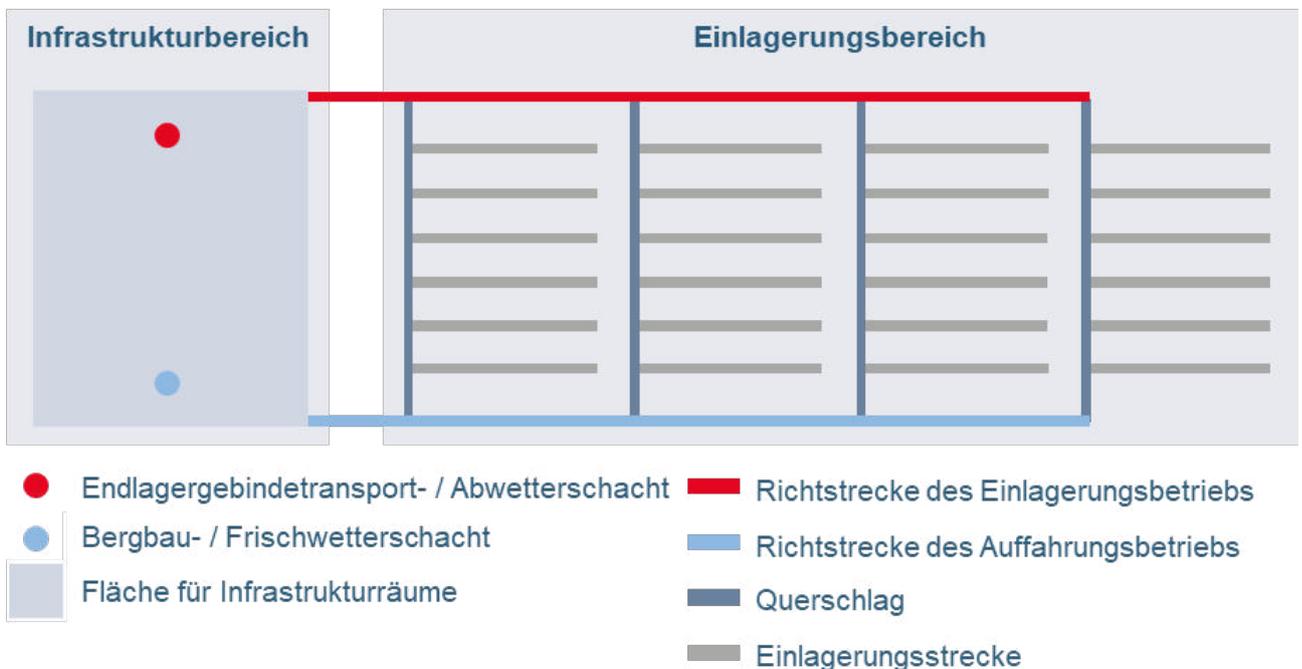


Abbildung 17: Schematische Darstellung des Endlagerbergwerks für Streckenlagerung

Eine konkrete Endlagerauslegung für einen Untersuchungsraum oder Teiluntersuchungsraum hat auf der Basis der geologischen Eigenschaften, des Endlagerkonzeptes und der sich daraus ergebenden notwendigen Aufgaben und verwendeten Technik folgendes festzulegen:

## Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung



| Projekt | PSP-Element | Funktion/Thema | Komponente | Baugruppe | Aufgabe | UA | Lfd.-Nr. | Rev |
|---------|-------------|----------------|------------|-----------|---------|----|----------|-----|
| NAAN    | NNNNNNNNNN  | NNAAANN        | AANNNA     | AANN      | AAAA    | AA | NNNN     | NN  |
| SG      | 0330        |                |            |           | EA      | TF | 0002     | 00  |

Blatt: 129

- Querschnittsgrößen und -formen der Strecken
- die Art der Ausbausysteme zur Stabilisierung
- die Abstände der Strecken zueinander bzw. der Behälter zueinander
- die Breite der Einlagerungsfelder und die ihnen zugehörige Anzahl von Einlagerungsstrecken
- die Länge der Einlagerungsstrecken
- die Anzahl der Einlagerungsfelder
- die Anpassung des Endlagerbergwerks an die Geologie unter Gewährleistung von Mindestentfernungen z. B. zu Störungen oder Schichtgrenzen

### 4.2.6.2 Endlagerbehälter und Annahmen

Derzeit existieren in Deutschland noch keine Behälterkonzepte, die anhand geltender Anforderungen, beispielsweise Rückholung und Bergung nach § 1 Abs. 4 StandAG sowie §§ 13 und 14 EndlSiAnfV, entwickelt wurden oder diese Anforderungen nachweislich erfüllen. Der BGE wurde im Herbst 2019 durch einen Erlass des BMU die Aufgabe der Endlagerbehälterentwicklung übertragen (BMU 2019). Die grundlegende Entwicklung des Behälters für das kristalline Wirtsgestein erfolgt aktuell durch Auftragnehmer, die Arbeiten für die Wirtsgesteine Tongestein und Steinsalz befinden sich in der Vorbereitung. Die aktuell gültigen regulatorischen Anforderungen an Endlagerbehälter für hochradioaktive Abfälle, die bei der Entwicklung zu berücksichtigen sind, wurden in einem Bericht beschrieben (BGE 2021b).

Für die Endlagerauslegung im Rahmen der rvSU besteht die Notwendigkeit, Annahmen zu Behältern zu treffen, auch wenn derzeit keine konkreten Behälterkonzepte vorliegen. Diese Annahmen sind insbesondere auf die verwendeten Materialien und die Behältergeometrien bezogen. Sie beeinflussen damit geometrische Aspekte des Endlagerbergwerks und fließen in die thermische Endlagerauslegung zur Einhaltung der Auslegungstemperatur ein, welche wesentlich ist für die Bestimmung des Endlagerflächenbedarfs. Für die notwendigen Behälterannahmen auf Basis des nationalen Abfallmengengerüsts stehen nur wenige sinnvolle Referenzen zur Verfügung. Eine wichtige Referenz ist das POLLUX® Behältersystem der Gesellschaft für Nuklear-Service mbH (GNS), das auch in Bollingerfehr et al. (2012) verwendet wurde. Dieses Konzept wurde für die Endlagerung von Brennstäben aus Leistungsreaktoren für Steinsalz in einem selbstabschirmenden Endlagerbehälter entwickelt. Neuere Anforderungen (z. B. Rückholung oder Bergung) wurden dabei nicht berücksichtigt, da es diese zum Entwicklungszeitpunkt noch nicht gab. Das POLLUX® Behältersystem wird im Rahmen der rvSU als Grundlage für die Annahme von geometrischen Größen und Materialparametern für Endlagerbehälter für das Endlagersystem Typ 1 verwendet. Voraussichtlich erfüllt es aber nicht alle aktuellen Anforderungen an einen Endlagerbehälter für hochradioaktive Abfälle (BGE 2021b).

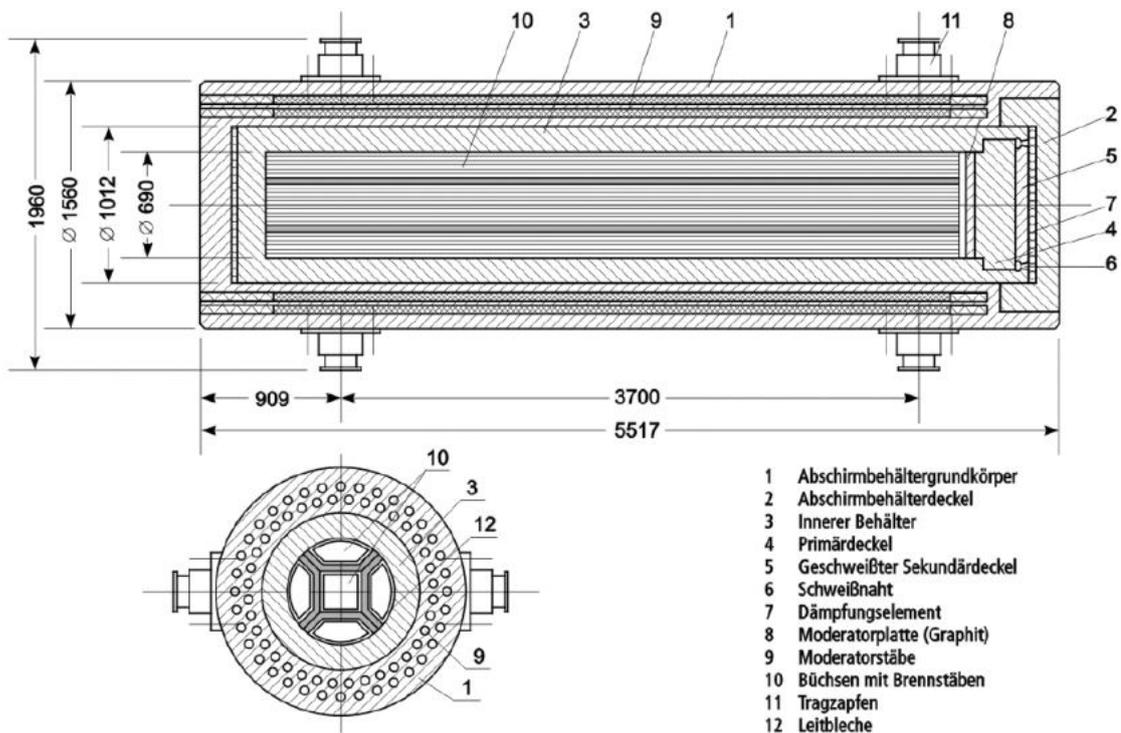
In (Bollingerfehr et al. 2008) wird ein sogenannter POLLUX®-10 Behälter wie folgt beschrieben und gemäß Abbildung 18 dargestellt:

## Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung

| Projekt | PSP-Element | Funktion/Thema | Komponente | Baugruppe | Aufgabe | UA | Lfd.-Nr. | Rev |
|---------|-------------|----------------|------------|-----------|---------|----|----------|-----|
| NAAN    | NNNNNNNNNN  | NNAAANN        | AANNNA     | AANN      | AAAA    | AA | NNNN     | NN  |
| SG      | 0330        |                |            |           | EA      | TF | 0002     | 00  |

Blatt: 130

„Der POLLUX-Behälter besteht aus einem Innen- und einem Außenbehälter. Der Innenbehälter besteht aus Feinkornbaustahl (Werkstoff 1.6210), hat eine Wandstärke von 160 mm und wird durch einen geschraubten Primärdeckel und einen geschweißten Sekundärdeckel dicht verschlossen. Der Innenraum ist in fünf Kammern unterteilt, in die je eine Brennstabbüchse mit Brennstäben von 2 DWR-BE [Brennelementen aus Druckwasserreaktoren] oder 6 SWR-BE [Brennelementen aus Siedewasserreaktoren] eingesetzt wird. Unter geometrischen Gesichtspunkten können die Brennstabbüchsen auch die gezogenen Brennstäbe von 5 WWER-BE [Brennelementen aus Wasser-Wasser-Energie-Reaktoren] aufnehmen. In der innen angeordneten, quadratischen Büchse können anstatt der Brennelementstäbe gepresste Strukturelemente eingebracht werden. In diesem Vorhaben wird von einer vollen Beladung mit Brennstäben von 10 DWR-BE, 30 SWR-BE oder 25 WWER-BE ausgegangen. Der Abschirmbehälter ist wie der Primär- und Sekundärdeckel aus Sphäroguss (Werkstoff 0.7040) hergestellt und hat eine Wandstärke von ca. 270 mm. Dieser Abschirmbehälter hat keine Dichtfunktion zu übernehmen und wird mit einem verschraubten Deckel verschlossen. Im Mantel sind in radial verteilten Bohrungen Stäbe aus Polyäthylen zur Verringerung der Neutronendosisleistung eingesetzt.“



**Abbildung 18:** Endlagerbehälter für Brennstäbe aus bis zu 10 DWR-, 30 SWR- oder 25 WWER- Brennelementen (Bollingerfehr et al. 2008)

Beispiel 5, Beispiel 6 und Beispiel 7 zeigen, welche konkreten Behälterannahmen für beispielhafte Auslegungen im Rahmen der rvSU werden können.

## Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung



| Projekt | PSP-Element | Funktion/Thema | Komponente | Baugruppe | Aufgabe | UA | Lfd.-Nr. | Rev |
|---------|-------------|----------------|------------|-----------|---------|----|----------|-----|
| NAAN    | NNNNNNNNNN  | NNAAANN        | AANNNA     | AANN      | AAAA    | AA | NNNN     | NN  |
| SG      | 0330        |                |            |           | EA      | TF | 0002     | 00  |

Blatt: 131

### Beispiel 5: Wirtsgesteinsspezifische Behälterannahmen für Opalinuston

#### Wirtsgesteinsspezifische Behälterannahmen für Opalinuston

In (Bertrams et al. 2021) wurden Abschirmberechnungen für POLLUX® Behälter mit geringeren Beladungen durchgeführt, da sich insbesondere bei Beladungen von weniger als 10 Brennelementen im Vergleich zum ursprünglichen POLLUX® System durch verlängerte Zwischenlagerzeiten verringerte Anforderungen an die Abschirmung ergaben. Für den Endlagerbehälter mit Brennstäben aus Leistungsreaktoren werden auf Basis dieser Ausführungen je nach Beladung Maße angenommen, wie sie beispielhaft in Abbildung 19 dargestellt werden. Dieses Behälterbeispiel kann mit Brennstäben von bis zu drei DWR, neun SWR oder 7,5 WWER Brennelementen beladen werden und ist damit nach (Jobmann & Lommerzheim 2015) voraussichtlich abdeckend bemessen für die Endlagerauslegung im Opalinuston. Der Endlagerbehälter besteht ebenfalls aus einem Außenbehälter aus Feinkornbaustahl (Werkstoff 1.6210), in dessen radialen Bohrungen eine Reihe aus Moderatorstäben aus Polyethylen eingesetzt ist. Der Innenbehälter sowie beide Deckel bestehen aus Sphäroguss (Werkstoff 0.7040).

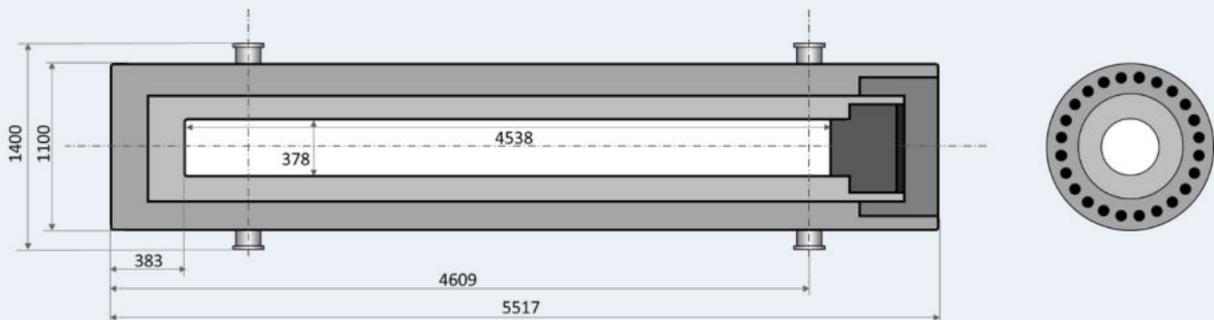


Abbildung 19: Annahme zum Endlagerbehälter für Brennstäbe aus 3 DWR-, 9 SWR- oder 7,5 WWER-Brennelementen, nach (Bertrams et al. 2021)

### Beispiel 6: Wirtsgesteinsspezifische Behälterannahmen für steile Salzformationen

#### Wirtsgesteinsspezifische Behälterannahmen für Steinsalz in steiler Lagerung

Im Rahmen der rvSU bietet der POLLUX®-10 Behälter für Steinsalz in steiler Lagerung geeignete Planungsannahmen an. Seine maximale Beladung ist auch abdeckend für höhere Auslegungstemperaturen.

# Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung

| Projekt | PSP-Element | Funktion/Thema | Komponente | Baugruppe | Aufgabe | UA | Lfd.-Nr. | Rev |
|---------|-------------|----------------|------------|-----------|---------|----|----------|-----|
| NAAN    | NNNNNNNNNN  | NNAAANN        | AANNNA     | AANN      | AAAA    | AA | NNNN     | NN  |
| SG      | 0330        |                |            |           | EA      | TF | 0002     | 00  |

Blatt: 132

## Beispiel 7: Weitere generische Behälterannahmen

### Weitere generische Behälterannahmen

Für die Endlagerung von Abfällen aus der Wiederaufarbeitung (CSD) sowie Brennstäben aus Forschungs- und Prototypreaktoren liegen keine vergleichbaren Grundlagen vor, um Planungsannahmen für Endlagerbehälter zu generieren. Für die Endlagerung von CSD werden deshalb auf der Basis des Endlagerbehälters für Brennstäbe aus Leistungsreaktoren Planungsannahmen abgeleitet. Abbildung 20 zeigt diese Annahmen für den Endlagerbehälter für CSD-V. Dieser Behälter kann mit maximal 3 CSD-V beladen werden.

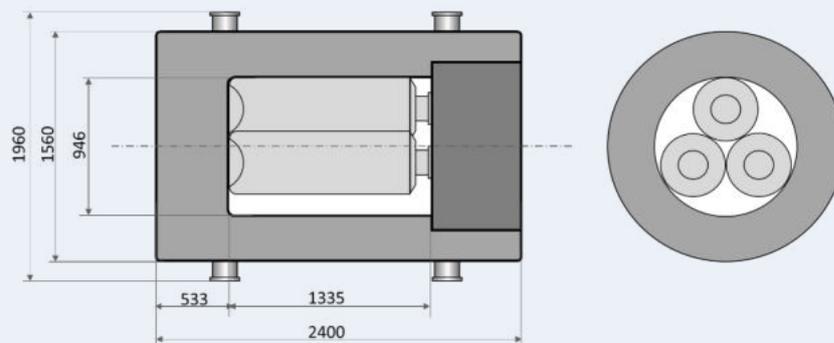


Abbildung 20: Annahme zum Endlagerbehälter für CSD-V, nach (Bertrams et al. 2021)

Für die Brennstäbe aus Forschungs- und Prototypreaktoren wurden in der Forschung und Entwicklung in der Regel die entsprechenden Transport- und Lagerbehälter selbst als Endlagerbehälter angenommen. Für dieses Vorgehen sprechen die verkehrsrechtliche Zulassung dieser Behälter sowie ihre Größe und Gewichte, die mit denen der o. g. Endlagerbehälter vergleichbar sind. Im Gegensatz zu Transport- und Lagerbehältern mit Brennelementen aus Leistungsreaktoren ist nur mit einer vernachlässigbaren Wärmeproduktion zu rechnen. Für die rvSU werden dementsprechend Behälterannahmen für diese Abfälle getroffen, die den jeweiligen Transport- und Lagerbehältern entsprechen (Abbildung 21). Ein neuer Behälter mit der Bezeichnung MTR3 weist fast identische Maße zum MTR2 auf, weshalb er nicht zusätzlich aufgeführt wird. Voraussichtlich erfüllen die Transport- und Lagerbehälter ebenfalls nicht alle aktuellen Anforderungen an einen Endlagerbehälter für hochradioaktive Abfälle (BGE 2021b).

# Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung

| Projekt | PSP-Element | Funktion/Thema | Komponente | Baugruppe | Aufgabe | UA | Lfd.-Nr. | Rev |
|---------|-------------|----------------|------------|-----------|---------|----|----------|-----|
| NAAN    | NNNNNNNNNN  | NNAAANN        | AANNNA     | AANN      | AAAA    | AA | NNNN     | NN  |
| SG      | 0330        |                |            |           | EA      | TF | 0002     | 00  |

Blatt: 133

## Weitere generische Behälterannahmen

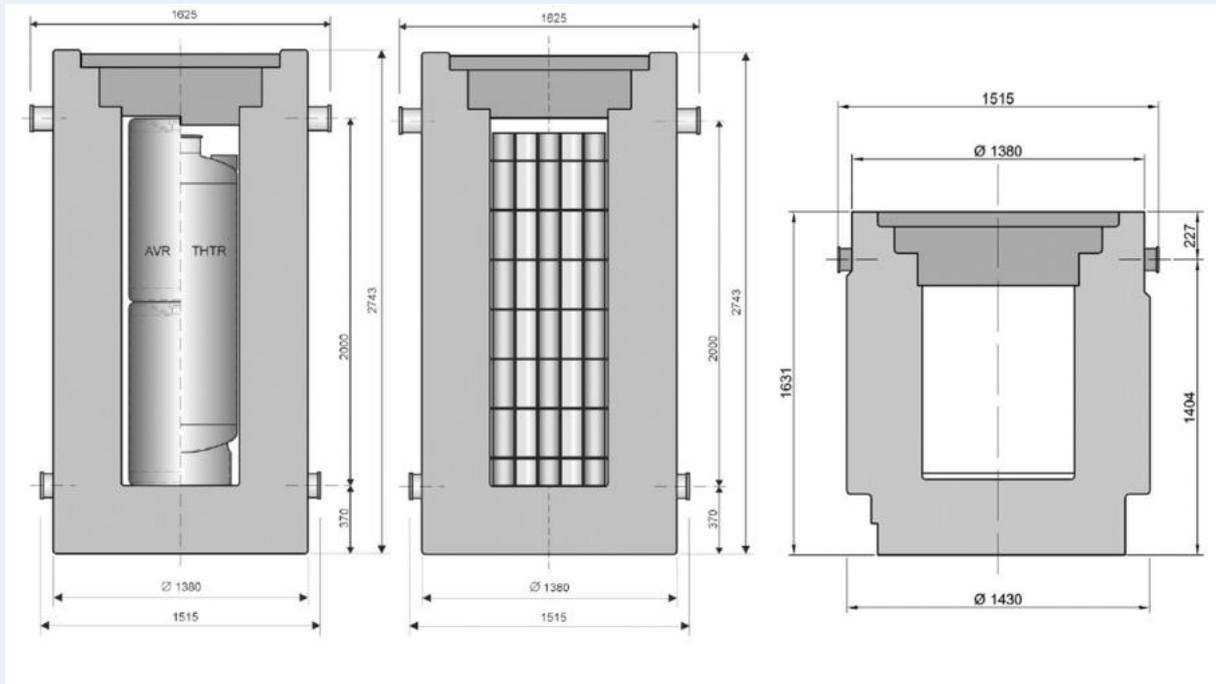


Abbildung 21: Annahme zum Endlagerbehälter für Abfälle aus Forschungs- und Prototypreaktoren entsprechend den Behältern CASTOR® AVR/THTR, KNK und MTR2 (Bollingerfehr et al. 2012)

### 4.2.6.3 Transport- und Einlagerungstechnik (Streckenlagerung)

Wie in Kapitel 4.2.5 ausgeführt, wird im Rahmen der rvSU für ein Endlagersystem Typ 1 grundsätzlich die Streckenlagerung als Einlagerungsvariante bevorzugt. Die Transport- und Einlagerungstechnik für abschirmende Endlagerbehälter vom Typ POLLUX® zur Einlagerung in horizontalen Strecken wurde in Deutschland in den 90er Jahren durch die DBE mbH entwickelt, gebaut und erprobt (Engelmann et al. 1995). In (Bertrams et al. 2021) wurde die Technik anhand des aktuellen Standes der Technik weiterentwickelt. Die dort vorgeschlagenen Vorrichtungen zum Transport und zur Einlagerung bilden die Grundlage für die Endlagerkonzepte der rvSU. Es wird einerseits der Transport vom Schacht bis zum Eingang der vorgesehenen Einlagerungsstrecke (Streckentransport), andererseits der Weitertransport zum Einlagerungsort in der Einlagerungsstrecke und die dort erfolgende Ablage des Endlagergebindes (Einlagerung) betrachtet.

Für den Streckentransport kommen grundsätzlich gleisloser oder gleisgebundener Transport in Frage. Der mögliche Automatisierungsgrad beider Varianten ist voraussichtlich ähnlich. Durch die hohe Regelmäßigkeit der Transportvorgänge, die Einfachheit des Transportweges mit wenigen Abzweigungen entlang der Richtstrecke und die langfristige Konstanz von Transportwegen bietet es sich jedoch an, den Streckentransport gleisgebunden durchzuführen und so Kollisionsrisiken mit den

## Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung



| Projekt | PSP-Element | Funktion/Thema | Komponente | Baugruppe | Aufgabe | UA | Lfd.-Nr. | Rev |
|---------|-------------|----------------|------------|-----------|---------|----|----------|-----|
| NAAN    | NNNNNNNNNN  | NNAAANN        | AANNNA     | AANN      | AAAA    | AA | NNNN     | NN  |
| SG      | 0330        |                |            |           | EA      | TF | 0002     | 00  |

Blatt: 134

Stößen oder Hindernissen außerhalb der Fahrspur gänzlich auszuschließen. Das Endlagergebäude liegt auf einem Transportwagen (siehe Abbildung 22), der durch ein elektrisch betriebenes Zugfahrzeug gezogen wird. Der Transportwagen weist eine Mulde auf, die den Endlagerbehältern entsprechend geformt ist. Darüber hinaus dienen Auflager an den Seitenkanten der Mulde der Aufnahme der Tragzapfen während des Transports.

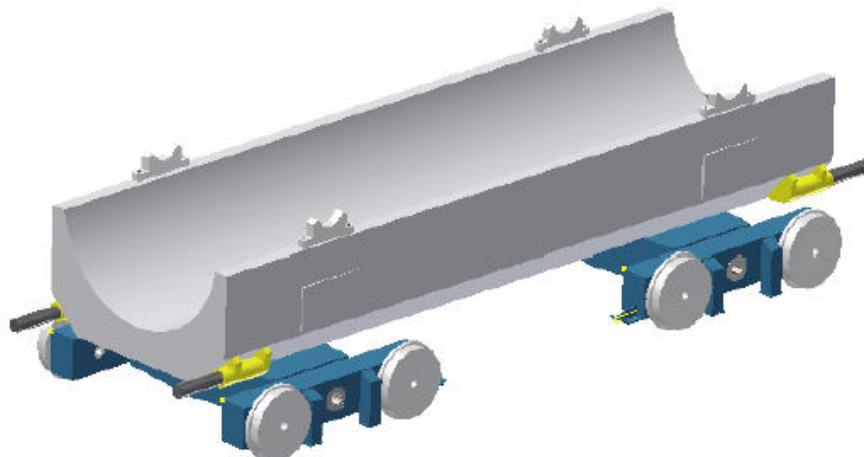


Abbildung 22: CAD-Modell für das Beispiel eines gleisgebundenen Transportwagens (Bertrams et al. 2021)

Der prinzipielle Aufbau der Einlagerungsvorrichtung entspricht dem eines frei verfahrbaren Portalkrans mit Batterieantrieb (siehe Abbildung 23). Die Einlagerungsvorrichtung nimmt das Endlagergebäude im Querschlag am Eingang zur Einlagerungsstrecke entgegen. Dafür überfährt sie den Transportwagen. Zwei Gewindespindeln steuern den Hub des Oberbaus, an dem die Tragbalken aufgehängt sind. Hydraulikzylinder stellen die Weite der Tragbalken ein, welche Aussparungen für die Aufnahme der Tragzapfen des Endlagerbehälters aufweisen. Zur Aufnahme des Endlagergebäudes wird der Oberbau abgesenkt, sodass die Tragbalken auf Höhe der Tragzapfen sind, um dann die Weite der Tragbalken bis zum Eingriff zu verringern. Schließlich wird der Oberbau, jetzt mit dem Endlagergebäude verbunden, wieder angehoben. Nach Aufnahme des Endlagergebäudes fährt die Einlagerungsvorrichtung in die Einlagerungsstrecke hinein. Durch Absenken wird das Endlagergebäude entweder auf einem Sockel oder direkt auf der Sohle abgelegt, sodass die Tragbalken lastfrei werden und nach außen bewegt werden können. Im Anschluss verlässt die Einlagerungsvorrichtung die Einlagerungsstrecke und wartet auf die Ankunft des nächsten Endlagergebäudes.

# Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung



| Projekt | PSP-Element | Funktion/Thema | Komponente | Baugruppe | Aufgabe | UA | Lfd.-Nr. | Rev |
|---------|-------------|----------------|------------|-----------|---------|----|----------|-----|
| NAAN    | NNNNNNNNNN  | NNAAANN        | AANNNA     | AANN      | AAAA    | AA | NNNN     | NN  |
| SG      | 0330        |                |            |           | EA      | TF | 0002     | 00  |

Blatt: 135

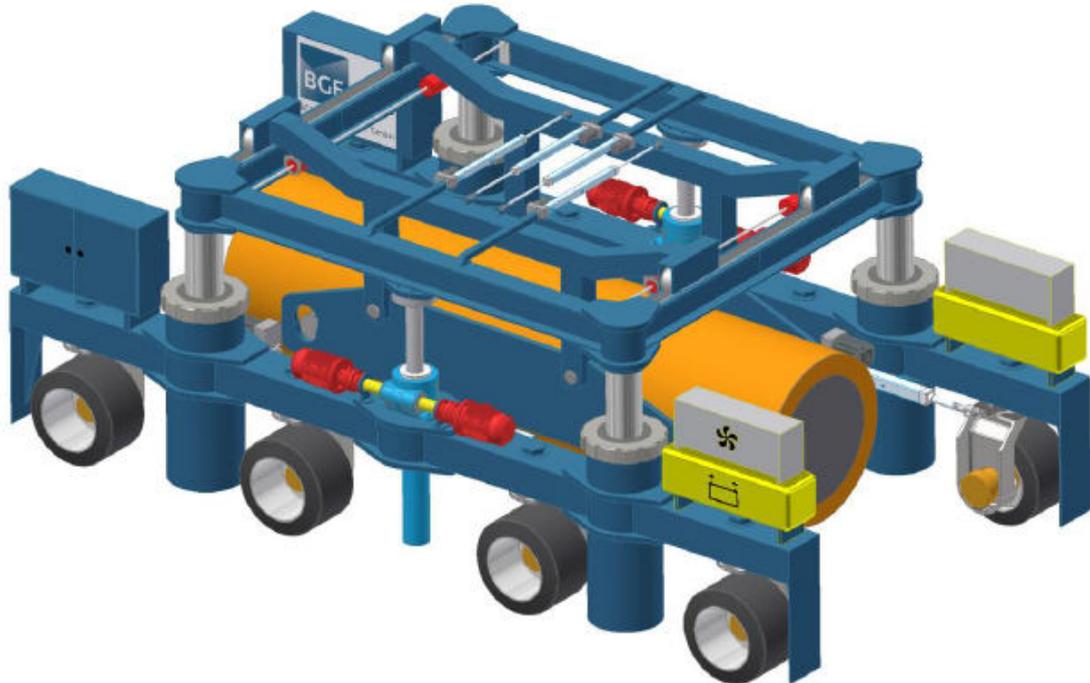


Abbildung 23: CAD Modell eines Beispiels für eine frei verfahrbare Einlagerungsvorrichtung mit angehobenem Endlagergebäude (Bertrams et al. 2021)

## 4.2.6.4 Grundlagen für Bau und Betrieb

### 4.2.6.4.1 Schächte und Infrastrukturbereich

In Kapitel 4.2.6.1 wird erläutert, dass der Zugang zum Endlagerbergwerk von der Erdoberfläche über zwei Schächte erfolgt. Der Bau der Schächte erfolgt überwiegend im Deckgebirge in wechselnden Gesteinsschichten und teilweise im Wirtsgestein selbst. Damit ist zu erwarten, dass der Schachtbau in Gebirge von begrenzter mechanischer Stabilität und durch mehrere Grundwasserleiter hindurch erfolgt, in denen mit Wasserzufluss und hydraulischem Druck zu rechnen ist. Um solche Bedingungen zu bewältigen, wird häufig das Gefrierverfahren angewendet, bei dem von der Oberfläche aus das Gebirge um die spätere Schachtröhre herum eingefroren wird. Dies erfolgt durch die Erstellung von Bohrungen rund um den Schacht herum, in denen eine Kühlflüssigkeit zirkuliert wird. Durch dieses Verfahren werden der Grundwasserzufluss in den Schacht minimiert und die Schachtwände beim Abteufen des Schachts stabilisiert. Bei günstigeren hydraulischen Verhältnissen könnte auch ein lokales Einfrieren oder Injektion von abdichtendem Material ausreichend sein. Bei entsprechend gesicherten Bedingungen kann der Ausbruch mit konventionellen Mitteln (Bohren und Sprengen) oder mit Schneidköpfen erfolgen. Die Werkzeuge für beide Verfahren werden üblicherweise an der untersten Ebene einer mehrtägigen Arbeitsbühne aufgehängt, von der aus alle Schachtbauprozesse mit einem hohen Grad an Fernsteuerung und Automatisierung durchgeführt werden können. Kurz nach dem Aushub muss abschnittsweise der vorläufige Ausbau für die temporäre Sicherung der Schachtkontur eingebracht werden. Kurze Zeit später wiederum erfolgt die Einbringung des endgültigen und dauerhaften Ausbaus. Beide müssen die Anforderungen an die mechanische Stabilität

## Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung



| Projekt | PSP-Element | Funktion/Thema | Komponente | Baugruppe | Aufgabe | UA | Lfd.-Nr. | Rev |
|---------|-------------|----------------|------------|-----------|---------|----|----------|-----|
| NAAN    | NNNNNNNNNN  | NNAAANN        | AANNNA     | AANN      | AAAA    | AA | NNNN     | NN  |
| SG      | 0330        |                |            |           | EA      | TF | 0002     | 00  |

Blatt: 136

und die evtl. die Wasserdichtheit über ihren jeweiligen Funktionszeitraum erfüllen. Bei der vorläufigen Sicherung endet dieser bei Einbringung des endgültigen Ausbaus. Dieser soll seine Funktion über mehrere Jahrzehnte beibehalten. Das Ausbausystem stützt sich voraussichtlich hauptsächlich auf (Stahl-)Beton für die strukturelle Stabilität. Andere Materialien können erforderlich sein, z. B. ein Metallblech zur Abdichtung oder eine bituminöse Schicht, um dem Ausbausystem eine gewisse Elastizität zu verleihen. Spezifische Schachtbau- und Ausbaumethoden werden zukünftig auf der Grundlage detaillierter geologischer Untersuchungen des jeweiligen Standorts gewählt. Gerade die Wirtsgesteine können sich erheblich im notwendigen Aufwand für die Sicherung der Schachtwand unterscheiden.

Die Schächte des Endlagers werden der Dreh- und Angelpunkt für alle Transporte zwischen der Erdoberfläche und dem Endlagerbergwerk. Die korrekte Auslegung der entsprechenden Transportsysteme ist daher von entscheidender Bedeutung für den kontinuierlichen und störungsfreien Endlagerbetrieb. Die folgenden Funktionen bei der Schachtplanung müssen berücksichtigt werden:

- Personaltransport
- Transport von Baustoffen, Maschinen, Fertigteilen (z. B. Ausbau, Gleisbau), Werkzeugen, Verbrauchsmaterialien, Versorgungseinrichtungen etc.
- Abtransport von Gestein
- Transport von Endlagergebinden
- Transport von Versatzmaterial
- Zuführung von frischen Wettern und Ableitung von Abwettern

Entsprechend der Unterteilung des Endlagers in Strahlenschutzbereiche nach § 52 Abs. 2 StrSchV (Kapitel 4.2.6.1) werden die Schächte dauerhaft jeweils einem der beiden Strahlenschutzbereiche zugeordnet. Der Schacht, in dem der Endlagergebindertransport stattfindet, gehört damit zum Kontrollbereich. Dieser Schacht dient auch als Abwetterschacht. Infolgedessen strömen alle Wetter, die unter Tage einem Endlagergebinde begegnen, auf direktem Wege durch den Kontrollbereich zu diesem Schacht. Eine Kontaminationsverschleppung über die Wetter aus dem Kontrollbereich heraus ist damit bei planmäßiger Wetterführung ausgeschlossen. Der Schacht ist über Tage mit Schleusensystemen, Filteranlagen und Messeinrichtungen auszustatten, um die Abwetter kontinuierlich auf Kontamination zu überprüfen und die Einhaltung von Emissionsschutzgrenzwerten sicherzustellen.

Der zweite Schacht ist damit dem Überwachungsbereich zuzuordnen. Um unnötige Freimessprozedere bei Verlassen des Kontrollbereichs zu vermeiden, ist es sinnvoll, diesem Schacht alle weiteren notwendigen Transporte zuzuordnen. Die vorläufige Endlagerauslegung der rvSU geht also von diesen zwei Schächten aus:

1. Transportschacht für Endlagergebinde und Abwetter (Endlagergebindertransportschacht)
2. Schacht für konventionelle Transporte und Frischwetter (Bergbauschacht)

Der Endlagergebindertransportschacht erfordert ein primäres Fördersystem mit ausreichender Nutzlast. Bei den zu erwartenden großen Nutzlasten ist aus Gründen der Sicherheit und Energieeffizienz

## Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung



| Projekt | PSP-Element | Funktion/Thema | Komponente | Baugruppe | Aufgabe | UA | Lfd.-Nr. | Rev |
|---------|-------------|----------------|------------|-----------|---------|----|----------|-----|
| NAAN    | NNNNNNNNNN  | NNAAANN        | AANNNA     | AANN      | AAAA    | AA | NNNN     | NN  |
| SG      | 0330        |                |            |           | EA      | TF | 0002     | 00  |

Blatt: 137

eine Förderanlage mit Treibscheibenantrieb empfehlenswert, in denen mehrere Seile verwendet werden können und die Betriebslast durch ein Gegengewicht teilweise ausgeglichen werden kann. Die Transportgeschwindigkeit kann gering sein, da eine hohe Transportfrequenz nicht erforderlich ist. Die Förderanlage verfügt über alle dem Stand der Technik entsprechenden Sicherheitseinrichtungen und kann mit zusätzlichen Vorrichtungen, z. B. an den Anschlägen (Haltestellen der Schachtförderanlage), ausgestattet werden, um die Sicherheit beim Be- und Entladen zu erhöhen. Das Fördersystem sollte als Turmförderanlage ausgeführt werden, um Seilablenkungen zu minimieren und zu vermeiden, dass insbesondere die Förderseile Wettereinflüssen ausgesetzt ist. Der lichte Durchmesser des Schachts wird voraussichtlich etwa 8 m bis 9 m betragen. Neben der Förderanlage für den Transport der Endlagergebinde ist mindestens eine Hilfsfahranlage vorzusehen, um Personal im Notfall aus dem Schacht retten zu können. Weiterhin sind Daten- und Stromkabel im Schacht anzunehmen.

Ein großer Anteil der Förderleistung des Bergbauschachts entfällt auf den Gesteintransport aus der Streckenauffahrung unter Tage. Eine Förderanlage mit Treibscheibenantrieb und zwei Fördergefäßen ist dafür voraussichtlich gut geeignet. Darüber hinaus ist eine Förderanlage mit Förderkorb für den Transport von Personal, Baustoffen, Werkzeugen usw. notwendig. Es ist ebenfalls mindestens eine Hilfsfahranlage vorzusehen, um Personal aus dem Schacht retten zu können. Der lichte Durchmesser des Schachts wird voraussichtlich etwa 8 m betragen. Der Bergbauschacht kann darüber hinaus mit mehreren Daten- und Stromkabeln sowie Rohren ausgestattet werden, um z. B. Verbrauchsmaterialien und Baustoffe nach unter Tage zu bringen. Auch die Förderanlagen des Bergbauschachts sollten in Turmaufstellung vorgesehen werden, um Seilablenkungen zu minimieren und Wettereinflüsse auf die Förderanlage auszuschließen.

Unter Tage treffen die Schächte auf den Infrastrukturbereich. Auch hier werden die Strecken und Kammern den beiden Strahlenschutzbereichen zugeordnet. Die Grubenräume, in denen Tätigkeiten mit Kontakt zu Endlagergebinden stattfinden oder in denen sich Personal und Gerät aufhält, das planmäßig Kontakt zu diesen hat, werden dem Kontrollbereich zugeordnet. Der Übergang von Personal oder Gerät vom Kontrollbereich in den Überwachungsbereich ist hier räumlich möglich, aber nur nach Freimessen zulässig und damit im Betrieb nicht die Regel. Grundsätzlich geht die Endlagerauslegung im Rahmen der rvSU im gesamten Endlagerbergwerk von einer strengen Trennung zwischen Kontrollbereich und Überwachungsbereich aus. Demnach sind diverse Funktionsräume des Infrastrukturbereichs für beide Bereiche getrennt auszuführen, z. B. Aufenthaltsräume und Arbeitsplätze für Personal, Werkstätten und Materiallager. Um das Wirtsgestein möglichst wenig zu schädigen, ist bei der Planung des Infrastrukturbereichs zu prüfen, welche Funktionen zwangsläufig unter Tage vorgehalten werden müssen und welche auch von über Tage erfüllt werden können. Für die rvSU wird davon ausgegangen, dass der Infrastrukturbereich im Wirtsgesteinsbereich mit Barrierefunktion liegt. Der Bau des Infrastrukturbereichs erfolgt dann unter vergleichbaren Randbedingungen und mit vergleichbaren Methoden wie die Streckenauffahrungen im Einlagerungsbereich. Die Prozesse zur Errichtung des Endlagerbergwerks unter Tage werden in Kapitel 4.2.6.4.2 beschrieben.

## Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung



| Projekt | PSP-Element | Funktion/Thema | Komponente | Baugruppe | Aufgabe | UA | Lfd.-Nr. | Rev |
|---------|-------------|----------------|------------|-----------|---------|----|----------|-----|
| NAAN    | NNNNNNNNNN  | NNAAANN        | AANNNA     | AANN      | AAAA    | AA | NNNN     | NN  |
| SG      | 0330        |                |            |           | EA      | TF | 0002     | 00  |

Blatt: 138

### 4.2.6.4.2 Der Einlagerungsbereich

Die Strecken des Einlagerungsbereichs gliedern sich in

- die Richtstrecke des Endlagergebindertransports,
- die Richtstrecke des Auffahrungsbetriebs,
- die Querschläge, die beide Richtstrecken miteinander verbinden und
- Einlagerungsstrecken.

Ab Beginn des Einlagerungsbetriebs wird die Richtstrecke des Endlagergebindertransport dem Kontrollbereich zugeordnet und verbleibt für die gesamte Betriebszeit des Endlagers darin. Die Richtstrecke des Auffahrungsbetriebs wird dagegen dem Überwachungsbereich zugeordnet. Querschläge und Einlagerungsstrecken gehören zunächst zum Überwachungsbereich und ab Nutzung für den Einlagerungsbetrieb zum Kontrollbereich. In Kapitel 4.2.6.4.3 wird dieses Vorgehen im Zusammenhang mit den betrieblichen Prozessen und der Bewetterung erläutert.

Für den Bau der Strecken kommen je nach Gebirgseigenschaften die Verfahren des Bohrens und Sprengens sowie das Auffahren im Teilschnitt in Frage. Bei beiden Varianten ist nach § 9 Abs. 2 EndlSiAnfV darauf zu achten, gebirgsschonend vorzugehen.

Der lichte Querschnitt aller Strecken muss ausreichende Breite wie Höhe aufweisen, um die Einrichtung der notwendigen Technik sowie die Durchfahrt aller Transportgüter zu erlauben. Für die verschiedenen Strecken ergeben sich deshalb unterschiedliche notwendige lichte Maße.

In der Richtstrecke des Endlagergebindertransports und in den Querschlägen findet der gleisgebundene Transport der Endlagergebände statt. Darüber hinaus sind die Befahrung der Strecke durch die Einlagerungsvorrichtung, Befahrungsfahrzeuge (PKW) und Baustoff- sowie Gerätetransporte für die Verfüll- und Verschlussarbeiten vorzusehen.

Die Richtstrecke des Auffahrungsbetriebs dient dem Transport von Vortriebsmaschinen zu den Einlagerungsstrecken, dem Gesteintransport von den Einlagerungsstrecken zum Bergbauschacht (z. B. mit Bandanlage) und der Durchfahrt von Befahrungsfahrzeugen und Bergbaumaschinen (z. B. Radlader, Muldenkipper).

Die Einlagerungsstrecken benötigen ausreichend Raum für die Befahrung mit der Einlagerungsvorrichtung. Auch hier sind das Einfahren von Gerät und Material für Verfüllarbeiten notwendig. Im Querschnitt muss außerdem die Möglichkeit bestehen, eine Wetterlutte und Lüfter für die Sonderbewetterung der Strecke unterzubringen. In Richtung der Einlagerungsstrecken ist ein Abstand der Endlagergebände von mindestens etwa einem Meter zu wählen, so dass eine vollständige Umhüllung mit Verfüllmaterial gewährleistet werden kann.

Beispiel 8 und Beispiel 9 zeigen exemplarisch die Annahmen zum Einlagerungsbereich für Opalinuston und Steinsalz in steiler Lagerung für die rvSU.

# Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung



| Projekt | PSP-Element | Funktion/Thema | Komponente | Baugruppe | Aufgabe | UA | Lfd.-Nr. | Rev |
|---------|-------------|----------------|------------|-----------|---------|----|----------|-----|
| NAAN    | NNNNNNNNNN  | NNAAANN        | AANNNA     | AANN      | AAAA    | AA | NNNN     | NN  |
| SG      | 0330        |                |            |           | EA      | TF | 0002     | 00  |

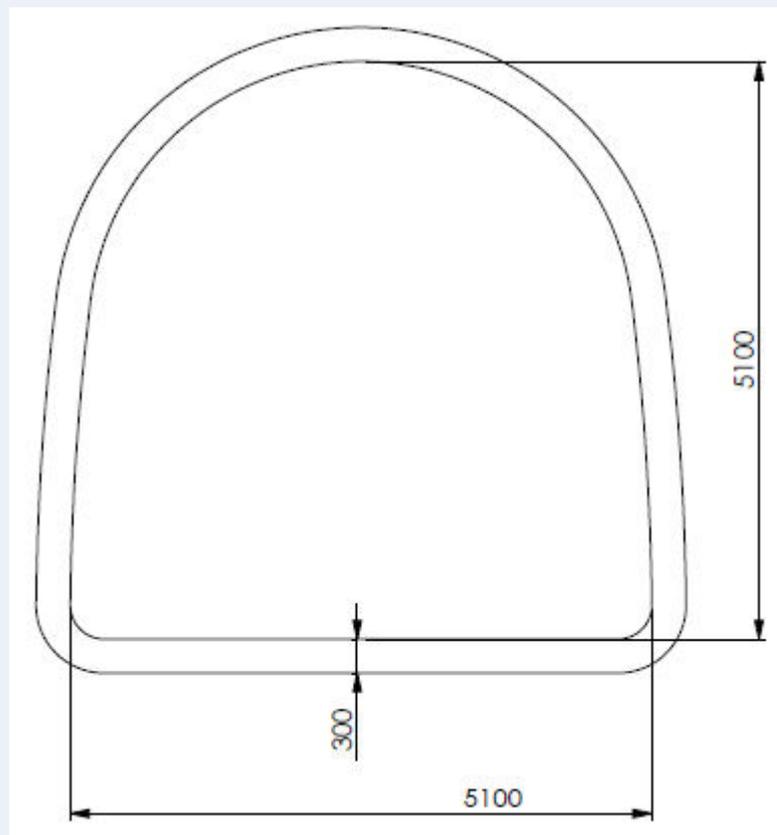
Blatt: 139

**Beispiel 8:** Wirtsgesteinsspezifische Festlegungen für den Einlagerungsbereich im Opalinuston

## Wirtsgesteinsspezifische Festlegungen für den Einlagerungsbereich im Opalinuston

Für die vorläufige Endlagerauslegung der rvSU findet keine detaillierte betriebliche Planung und Maschinen- oder Geräteauswahl statt. Aus diesem Grund werden die erforderlichen lichten Maße der Strecken auf Basis überschlägiger Schätzungen für Opalinuston wie folgt vorläufig festgelegt:

- Lichter Durchmesser der Richtstrecke für Endlagergebindertransport: 7,6 m
- Lichter Durchmesser der Querschläge: 7,6 m
- Lichter Durchmesser der Richtstrecke für bergbauliche Betriebsprozesse: 6,8 m
- Höhe x Breite der Einlagerungsstrecke: 5,1 m x 5,1 m (siehe Abbildung 24)



**Abbildung 24:** Skizze des Querschnitts der Einlagerungsstrecke für die Streckenlagerung im Opalinuston

Im Opalinuston ist davon auszugehen, dass in allen Strecken ein tragender Ausbau eingebracht werden muss, um die Strecken über ihre Betriebszeit offen zu halten. Nach Anhang 1 ist insbesondere in Bereichen mit einer langen Standzeit (Infrastrukturbereich, Richtstrecken,

# Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung

| Projekt | PSP-Element | Funktion/Thema | Komponente | Baugruppe | Aufgabe | UA | Lfd.-Nr. | Rev |
|---------|-------------|----------------|------------|-----------|---------|----|----------|-----|
| NAAN    | NNNNNNNNNN  | NNAAANN        | AANNNA     | AANN      | AAAA    | AA | NNNN     | NN  |
| SG      | 0330        |                |            |           | EA      | TF | 0002     | 00  |

Blatt: 140

## Wirtsgesteinsspezifische Festlegungen für den Einlagerungsbereich im Opalinuston

Querschlüge) mit einem betonbasierten Vollausbau zu rechnen. Eine abgerundete Querschnittsform der Strecken (rund oder elliptisch) ist dann vorteilhaft. Bei sehr schwierigen langfristigen Bedingungen kann der Ausbau mehrschalig und mit Nachgiebigkeitselementen ausgeführt werden. Geeignete Materialien für den Ausbau sind entsprechend den Gebirgsbedingungen im Bereich der Positionierung des Ausbaus auszuwählen und müssen dem erwarteten Gebirgs- und Fluiddruck mindestens für die Dauer der Betriebszeit standhalten und eine geringe chemische Reaktivität ausweisen. Die Einlagerungsstrecken müssen nur über vergleichsweise geringe Zeiträume offengehalten werden. Sie sind nach entsprechend § 18 Abs. 2 EndlSiAnfV „zügig aufzufahren, zu beladen und zu verfüllen“. Dementsprechend kann hier der Ausbau voraussichtlich starr und mit geringerer Dicke eingebaut werden, z. B. als Spritzbetonschicht von wenigen Dezimetern. Bei sehr günstigen Bedingungen ist möglicherweise ein Anker-Stahlnetzsystem zur Vermeidung von herabfallendem Gestein ausreichend. Zur Vermeidung von Hohlräumvolumen wird bei den Einlagerungsstrecken eine hufeisenförmige Querschnittsform der Strecken verfolgt, da eine vollständige Abrundung hin zum Kreis oder zur Ellipse aufgrund der kurzen Standzeit voraussichtlich nicht notwendig ist. Die Abhängigkeiten der Querschnittsformen und der Ausbausysteme von den gebirgsmechanischen Bedingungen (und der Endlagerteufe) werden in Kapitel 4.2.7 weiter erläutert.

Im Opalinuston wird ein Sockel für die Ablage der Endlagergebäude vorgesehen, um den direkten Kontakt vom Endlagergebäude zum Betonausbau zu vermeiden. In Abbildung 25 sind die vorläufigen Maße für die beiden Endlagergebäude mit wärmeentwickelnden Abfällen auf einem solchen Sockel dargestellt. Der Sockel wird aus Formsteinen mit hohem Tonmineralanteil gemauert. Seine Länge entspricht dem Endlagerbehälter. Er liegt in der Mitte der Einlagerungsstrecke.

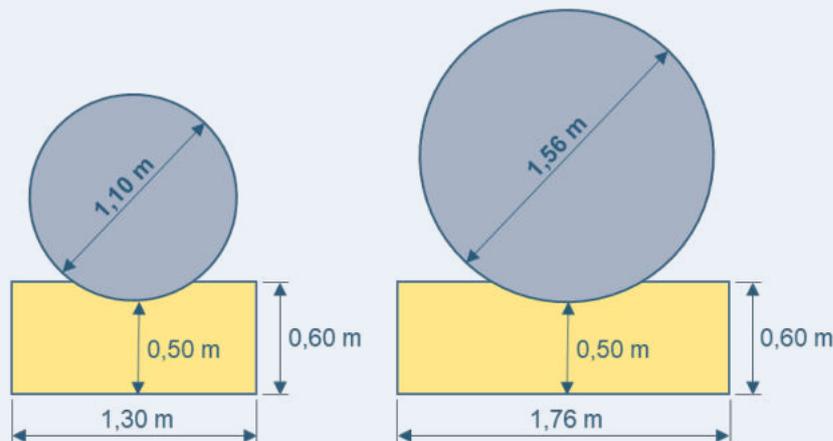


Abbildung 25: Skizze des Sockels mit Endlagergebäude (links: Endlagergebäude mit Brennstäben aus Leistungsreaktoren, rechts: Endlagergebäude mit CSD-V)

# Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung

| Projekt | PSP-Element | Funktion/Thema | Komponente | Baugruppe | Aufgabe | UA | Lfd.-Nr. | Rev |
|---------|-------------|----------------|------------|-----------|---------|----|----------|-----|
| NAAN    | NNNNNNNNNN  | NNAAANN        | AANNNA     | AANN      | AAAA    | AA | NNNN     | NN  |
| SG      | 0330        |                |            |           | EA      | TF | 0002     | 00  |

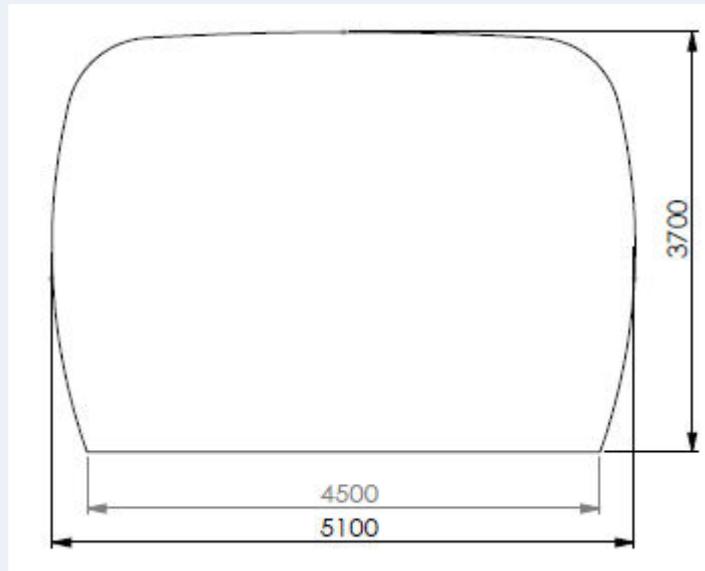
Blatt: 141

**Beispiel 9:** Wirtsgesteinsspezifische Festlegungen für den Einlagerungsbereich im steilen Steinsalz

## Wirtsgesteinsspezifische Festlegungen für den Einlagerungsbereich in Steinsalz in steiler Lagerung

Für die vorläufige Endlagerauslegung der rvSU findet keine detaillierte betriebliche Planung und Maschinen- oder Geräteauswahl statt. Aus diesem Grund werden die erforderlichen lichten Maße der Strecken auf Basis von (Bollingerfehr et al. 2012) für Steinsalz in steiler Lagerung wie folgt vorläufig festgelegt:

- Höhe x Breite der Richtstrecke für Einlagerungsbetrieb: 3,5 m x 7,6 m
- Höhe x Breite der Querschläge: 3,5 m x 7,6 m
- Höhe x Breite der Richtstrecke für Auffahrungsbetrieb: 3,8 m x 6,8 m
- Höhe x Breite der Einlagerungsstrecke: 3,7 m x 5,1 m (siehe Abbildung 26)



**Abbildung 26:** Skizze des Querschnitts der Einlagerungsstrecke für die Streckenlagerung im steilen Steinsalz

Im Steinsalz wird von grundsätzlich günstigen gebirgsmechanischen Bedingungen ausgegangen. Ein tragender Ausbau wird deshalb nicht vorgesehen, allenfalls lokale Systemankerung mit Netzen zur Vermeidung von Steinfall. Streckenquerschnitte werden mit gebirgsmechanisch ausreichenden Abrundungen aufgeföhren, um Spannungsspitzen in Ecken zu vermeiden.

In der Einlagerungsstrecke wird der Behälter zentral auf der Sohle abgelegt. Zur Verbesserung seiner Lagestabilität wird die Sohle seiner runden Form leicht nachempfunden, sodass das Endlagergebände ca. 5 cm unterhalb des Sohlniveaus zum Liegen kommt.

## Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung



| Projekt | PSP-Element | Funktion/Thema | Komponente | Baugruppe | Aufgabe | UA | Lfd.-Nr. | Rev |
|---------|-------------|----------------|------------|-----------|---------|----|----------|-----|
| NAAN    | NNNNNNNNNN  | NNAAANN        | AANNNA     | AANN      | AAAA    | AA | NNNN     | NN  |
| SG      | 0330        |                |            |           | EA      | TF | 0002     | 00  |

Blatt: 142

### 4.2.6.4.3 Betrieb und Bewetterung des Endlagers

In Vorbereitung auf die Betriebsphase erfolgt die Errichtung großer Teile des Endlagers (siehe § 15 EndlSiAnfV). Vor der Anlieferung des ersten Endlagergebindes unter Tage ist mindestens die Auffahrung der Richtstrecken, aller Querschläge und der Einlagerungsstrecken im schachtfernsten Einlagerungsfeld notwendig. Hier kann dann der Probetrieb des Endlagers nach § 16 EndlSiAnfV stattfinden. Der Betrieb des Endlagers selbst beginnt mit der ersten Anlieferung radioaktiver Abfälle. Im Wesentlichen bestehen die untertägigen Tätigkeiten im Betrieb aus der Auffahrung von Einlagerungsstrecken, der Einlagerung von Endlagergebinden und der anschließenden Verfüllung von Einlagerungsstrecken, Querschlägen und nicht weiter genutzten Teilen der Richtstrecken. Es ist immer sicherzustellen, dass das Endlagerbergwerk ausreichend bewettert wird und von allen Arbeitsstätten aus Fluchtwege vorhanden sind.

Der Betrieb beginnt im schachtfernsten Einlagerungsfeld. Die Auffahrung der Einlagerungsstrecken, die Einlagerung und die Verfüllung schreiten von dort aus in Richtung der Schächte fort. So wird das nach § 18 Abs. 2 EndlSiAnfV geforderte zügige Verfüllen nach der Einlagerung ermöglicht. Zwischen jedem Querschlag und der Richtstrecke des Einlagerungsbetriebs werden Wetter- und Zugangsbauwerke errichtet. Nach vollständiger Errichtung eines Einlagerungsfeldes mit Einlagerungsstrecken wird für dieses Feld das Wetterbauwerk zum Übergang vom Querschlag zur Richtstrecke des Auffahrungsbetriebs verschoben. Diese Bauwerke dienen der Trennung des Endlagerbergwerks in Kontrollbereich und Überwachungsbereich sowie der Regulierung der Wetterströme. Abbildung 27 zeigt schematisch und beispielhaft einen Betriebszustand des Endlagerbergwerks.

# Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung

| Projekt | PSP-Element | Funktion/Thema | Komponente | Baugruppe | Aufgabe | UA | Lfd.-Nr. | Rev |
|---------|-------------|----------------|------------|-----------|---------|----|----------|-----|
| NAAN    | NNNNNNNNNN  | NNAAANN        | AANNNA     | AANN      | AAAA    | AA | NNNN     | NN  |
| SG      | 0330        |                |            |           | EA      | TF | 0002     | 00  |

Blatt: 143



Abbildung 27: Schematische Darstellung des Endlagerbergwerks im Betrieb

Nach der Übergabe des ersten Einlagerungsfeldes an den Einlagerungsbetrieb beginnt die Auffahrung des nächsten Feldes vom benachbarten Querschlag aus. Der Auffahrungsbetrieb, bestehend aus dem Bergbauschacht, der Richtstrecke des Auffahrungsbetriebs und den in Auffahrung befindlichen Einlagerungsfeldern, wird aufgrund der bergbaulichen Tätigkeiten dem Überwachungsbereich zugeordnet. Sämtliche damit in Zusammenhang stehenden Transporte von Gestein, Ausbau, Material und Personen erfolgen daher im Regelfall über diese Verbindung. Auf dem gleichen Weg strömen frische Wetter in das Endlager. Vom Hauptwetterstrom im Querschlag aus werden die Einlagerungsstrecken über Wetterlütten und Lüfter sonderbewettert. Die Abwetter strömen in den Querschlag zurück, wo sie vom Hauptwetterstrom erfasst, verdünnt und in Richtung Kontrollbereich abtransportiert werden. Am Übergang zur Richtstrecke des Einlagerungsbetriebs gehen sie über ein entsprechendes Wetter- und Zugangsbauwerk in den Kontrollbereich über und werden durch den Endlagergebündeltransporterschacht aus dem Endlager geleitet.

Der Einlagerungsbetrieb transportiert die Endlagergebünde über den Endlagergebündeltransporterschacht in das Endlager und dann, gleisgebunden, über die Richtstrecke des Einlagerungsbetriebs in das jeweilige Einlagerungsfeld. Im Querschlag vor der jeweiligen Einlagerungsstrecke nimmt die Einlagerungsvorrichtung den Behälter auf und transportiert ihn in die Einlagerungsstrecke. Hier legt sie ihn, zentral in der Strecke, ab und verlässt die Einlagerungsstrecke. Das Verfüllmaterial der Einlagerungsstrecke wird über den gleichen Weg von über Tage in das Einlagerungsfeld transportiert.

# Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung

| Projekt | PSP-Element | Funktion/Thema | Komponente | Baugruppe | Aufgabe | UA | Lfd.-Nr. | Rev |
|---------|-------------|----------------|------------|-----------|---------|----|----------|-----|
| NAAN    | NNNNNNNNNN  | NNAAANN        | AANNNA     | AANN      | AAAA    | AA | NNNN     | NN  |
| SG      | 0330        |                |            |           | EA      | TF | 0002     | 00  |

Blatt: 144

Der Streckenabschnitt um ein Endlagergebäude herum wird direkt nach dessen Einlagerung vollständig verfüllt. Im Anschluss kann der nächste Einlagerungsvorgang beginnen. Wie bei der Auffahrung beginnt auch die Einlagerung angrenzend zur Richtstrecke des Einlagerungsbetriebs und setzt sich dann bis zur Richtstrecke des Auffahrungsbetriebs fort. Die Wetter gelangen dann aus dieser Richtstrecke über ein Wetter- und Zugangsbauwerk in den Kontrollbereich im Querschlag. Wie im Auffahrungsbetrieb wird dem durchgehenden Hauptwetterstrom für die Sonderbewetterung der Einlagerungsstrecke ein Teil entnommen. Das Bewetterungsschema wird in Abbildung 28 schematisch dargestellt.

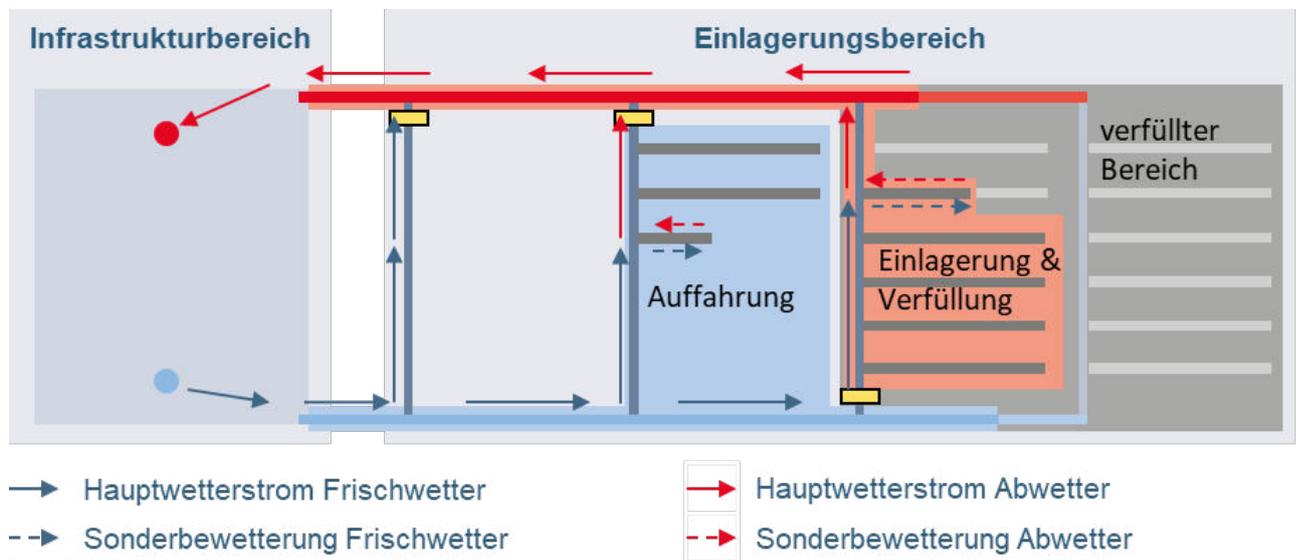


Abbildung 28: Schematische Darstellung der Bewetterung bei Streckenlagerung

Sind alle Einlagerungsstrecken eines Einlagerungsfeldes mit Endlagergebäuden beladen und verfüllt, folgt schließlich auch die Verfüllung des zugehörigen Querschlages und der Richtstrecken bis etwa zum nächsten Querschlag. Der Querschlag und die Richtstrecke des Einlagerungsbetriebs, die vollständig dem Kontrollbereich zugeordnet sind, werden durch den Einlagerungsbetrieb gefüllt. Die Verfüllung beginnt am Wetterbauwerk des Einlagerungsfeldes zur Bergbaustrecke und setzt sich im Rückbau fort. Hierfür ist eine starke Sonderbewetterung einzusetzen. Die Verfüllung des Abschnitts der Richtstrecke des Auffahrungsbetriebs kann mit Gestein aus dem aktuellen Auffahrungsbetrieb oder auch über den Bergbauschacht erfolgen. Auf diese Weise muss der Kontrollbereich nicht erweitert werden und Gestein aus der Auffahrung kann mit geringem Aufwand genutzt werden.

#### 4.2.6.4.4 Fluchtwege

Auch wenn davon ausgegangen wird, dass die Regeln zur Unfallvermeidung im geplanten Endlager angewandt werden und dass das Verhalten jedes einzelnen Mitarbeiters diesbezüglich angemessen ist, besteht das Restrisiko eines Unfalls. Insbesondere Brände sind untertage ausgesprochen bedrohlich für die Gesundheit des Personals. Deshalb müssen jederzeit geeignete Fluchtwege vorhanden sein, um Bränden und den entstehenden Rauchgasen entkommen zu können. Eine schematische Darstellung einer exemplarischen Fluchtwegsituation ist in Abbildung 29 zu sehen.

## Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung



| Projekt | PSP-Element | Funktion/Thema | Komponente | Baugruppe | Aufgabe | UA | Lfd.-Nr. | Rev |
|---------|-------------|----------------|------------|-----------|---------|----|----------|-----|
| NAAN    | NNNNNNNNNN  | NNAAANN        | AANNNA     | AANN      | AAAA    | AA | NNNN     | NN  |
| SG      | 0330        |                |            |           | EA      | TF | 0002     | 00  |

Blatt: 145

Befindet sich der Brand auf der Frischwetterseite einer Person, führen Rauchgase, Asche und Hitze schnell zu einer Verschlechterung der Atemluft und der Sicht. Für diesen Gefahrenfall muss nach § 11 Abs. 1 Satz 2 ABergV gewährleistet sein, dass „geeignete Fluchtwege und Notausgänge sowie Flucht- und Rettungsmittel für ein sicheres Verlassen der Arbeitsstätten für alle Beschäftigten vorhanden sind“. Aufgrund der geringen Wahrscheinlichkeit eines Brandes wird ein einzelner Brand im Endlager betrachtet. Darauf aufbauend ist die Flucht aus einem Gefahrenbereich immer möglich, wenn, wie in § 15 ABergV gefordert, eine Arbeitsstätte zwei Fluchtwege besitzt. Für das Endlager insgesamt ist dies durch die beiden Schächte gegeben. In den meisten Bereichen des Endlagers ermöglicht außerdem die Kombination aus Richtstrecken und Querschlägen die Flucht in Richtung beider Schächte. Insofern sich Strecken jedoch in der Auffahrung oder Verfüllung befinden, müssen besondere Maßnahmen ergriffen werden. Während für sehr kurze Strecken angenommen werden kann, dass niemand durch einen Brand eingeschlossen wird, steigt die Gefahr mit zunehmender Länge an. Bei Längen über 400 m müssen daher, in Übereinstimmung mit § 49 Abs. 3 ABVO, Rettungskammern vorgesehen werden, die einen wirksamen Schutz vor Bränden bieten. Einlagerungsstrecken gelten in diesem Sinne ebenfalls als Strecken, die sich in Auffahrung oder Verfüllung befinden. Ihre Länge wird deshalb auf 400 m begrenzt. Um trotz der schadstoffbelasteten und sauerstoffarmen Wetter sicher flüchten zu können, ist gemäß § 15 Abs. 10 ABergV, jede Person im Endlager mit einem Sauerstoffselbstretter auszustatten. Die Flucht vor einer Gefahrenquelle, die sich auf der Frischwetterseite einer Person befindet, führt mit der Wetterrichtung bis zum nächsten unbelasteten Wetterstrom. Mit Übertritt in diesen Frischwetterstrom wird der Gefahrenbereich verlassen. Dabei ist zu beachten, dass es aufgrund starker Hitzeentwicklung beim Brand auch zu einer lokalen Umkehr der Wetter kommen kann. Aus diesem Grund sind daher solche Frischwetterbereiche zu bevorzugen, die nicht leicht durch den Brand beeinflusst werden können bzw. die sich näher am Frischweterschacht befinden.

Befindet sich ein Brand auf der Abwetterseite einer Person, besteht in der Regel nur eine geringe Gefahr. In diesem Fall begibt sich die Person auf kürzestem Weg und den frischen Wetterern entgegen zum Frischweterschacht, von wo aus die Tagesoberfläche erreicht werden kann.

Um die Flucht auch über Distanzen durchführen zu können, die die Haltedauer der persönlich mitgeführten Sauerstoffselbstretter übersteigen, können im Bereich der Wetterbauwerke Fluchtkammern eingerichtet werden, in denen die Flucht sicher unterbrochen werden kann, um sie anschließend gestärkt, mit neuer Ausrüstung und mit aktuellen Informationen fortzusetzen oder auf eine Rettung zu warten.

Um im Gefahrenfall die Ausbreitung von Rauchgasen bei gleichzeitiger Bewetterung großer Teile des Endlagers einzudämmen, bieten sich Wetterbauwerke auf beiden Seiten der Querschläge an. Damit ließen sich Wetterströme in den jeweiligen Querschlägen kurzfristig stark reduzieren und so eine Kontamination anderer Bereiche abwenden. Im Normalbetrieb stehen diese Bauwerke offen und dürfen den Einlagerungsbetrieb und Auffahrungsbetrieb nicht behindern.

# Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung

| Projekt | PSP-Element | Funktion/Thema | Komponente | Baugruppe | Aufgabe | UA | Lfd.-Nr. | Rev |
|---------|-------------|----------------|------------|-----------|---------|----|----------|-----|
| NAAN    | NNNNNNNNNN  | NNAAANN        | AANNNA     | AANN      | AAAA    | AA | NNNN     | NN  |
| SG      | 0330        |                |            |           | EA      | TF | 0002     | 00  |

Blatt: 146

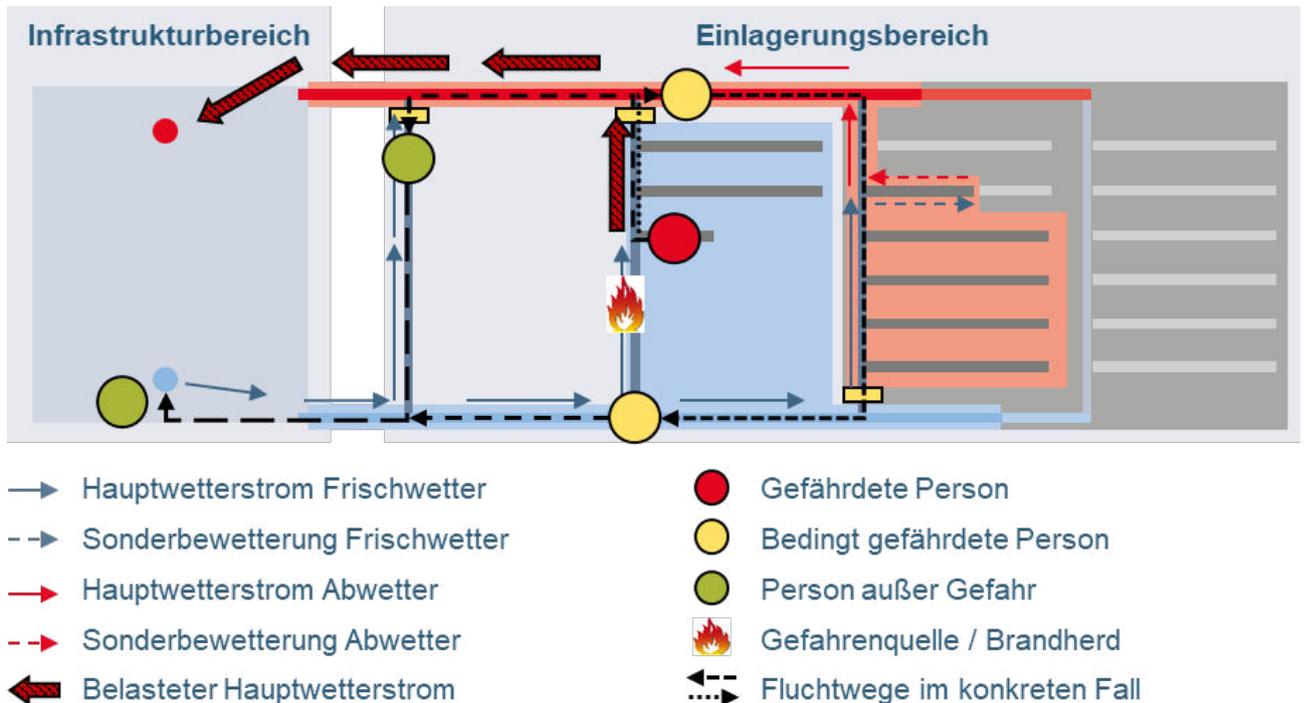


Abbildung 29: Schematische Darstellung des Endlagerbergwerks für Streckenlagerung mit Bewetterungsströmen und exemplarischer Fluchtsituation

## 4.2.6.5 Mögliche Maßnahmen zur Rückholbarkeit

Der Begriff der Endlagerung beschreibt per Definition die Einlagerung radioaktiver Abfälle ohne die Absicht einer Rückholung (§ 2 Nr. 3 StandAG). Um die Reversibilität von Entscheidungen und ihre nachträgliche Korrektur zu ermöglichen, ist nach § 13 EndlSiAnfV dennoch die Rückholbarkeit der eingelagerten Abfälle bis zum Beginn der Stilllegung des Endlagers sicherzustellen. Bei der Rückholbarkeit handelt es sich gemäß § 2 Nr. 3 StandAG um „die geplante technische Möglichkeit zum Entfernen der eingelagerten Abfallbehälter mit radioaktiven Abfällen während der Betriebsphase“. Demzufolge endet der Zeitraum, für den die Rückholbarkeit nachzuweisen ist, mit dem Beginn der Stilllegung des Endlagers; daran anschließend wird von einer Bergung der eingelagerten Abfälle gesprochen. Bei der Bergung handelt es sich um ein „ungeplantes Herausholen von radioaktiven Abfällen aus einem Endlager“ (§ 2 Nr. 4 StandAG); sie soll während der Stilllegung und für einen Zeitraum von 500 Jahren nach dem vorgesehenen Verschluss des Endlagers möglich sein (§ 14 Abs. 1 EndlSiAnfV). Die Berücksichtigung einer möglichen Bergung bei der vorläufigen Endlagerauslegung im Rahmen der rvSU wird in § 6 Abs. 4 EndlSiUntV nicht gefordert. Sie ist damit nicht Bestandteil der vorläufigen Endlagerauslegung der rvSU, wird aber im Rahmen der Endlagerbehälterentwicklung berücksichtigt, siehe (BGE 2021b). Für die Endlagerauslegung ab Phase II des Standortauswahlverfahrens, die auf der vorläufigen Endlagerauslegung der rvSU aufbaut, muss die Bergung dann entsprechend § 14 EndlSiAnfV berücksichtigt werden. In § 13 EndlSiAnfV werden die Anforderungen an die Rückholung genauer spezifiziert. „Die Rückholung ist so zu planen, dass der dafür voraussichtlich erforderliche technische und zeitliche Aufwand den für die Einlagerung erforderlichen“

## Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung



| Projekt | PSP-Element | Funktion/Thema | Komponente | Baugruppe | Aufgabe | UA | Lfd.-Nr. | Rev |
|---------|-------------|----------------|------------|-----------|---------|----|----------|-----|
| NAAN    | NNNNNNNNNN  | NNAAANN        | AANNNA     | AANN      | AAAA    | AA | NNNN     | NN  |
| SG      | 0330        |                |            |           | EA      | TF | 0002     | 00  |

Blatt: 147

derlichen Aufwand nicht unverhältnismäßig übersteigt. Die für eine Rückholung erforderlichen technischen Einrichtungen sind während des Betriebs vorzuhalten“ (§ 13 Abs. 2 EndlSiAnfV). „Maßnahmen, die der Gewährleistung der Rückholbarkeit dienen, dürfen die Langzeitsicherheit des Endlagers nicht gefährden.“ (§ 13 Abs. 3 EndlSiAnfV).

Bei der Rückholung handelt es sich um eine „Rückfalloption für noch weniger plausible Entwicklungen“ (BT-Drs. 19/19291) mit dementsprechend geringer Eintrittswahrscheinlichkeit. Daher wird der Fokus der vorläufigen Endlagerauslegung auf den sicheren Betrieb des Endlagers und die Gewährleistung der Langzeitsicherheit gelegt. Zur Erleichterung der Rückholung sollen möglichst wenige Anpassungen an der Auslegung vorgenommen werden. Trotzdem muss die Endlagerauslegung so erfolgen, dass eine Rückholung möglich ist.

Die Berücksichtigung der Rückholung beginnt bereits mit der Planung des Grubengebäudes, insbesondere der Strecken bzw. der Dimensionierung der Sicherheitspfeiler (vgl. Kapitel 4.2.6.1 und 4.2.7). Diese sollten je nach Rückholungsstrategie entweder breit genug für eine Neuauffahrung einer oder mehrerer Strecken parallel zu einer alten Strecke sein oder ausreichend breit dimensioniert, um trotz Ausbildung einer Auflockerungszone vor der Stilllegung des Endlagerbergwerks ihre Standfestigkeit nicht maßgeblich zu verlieren. Das Grubengebäude wird auf das Mindestmaß an betriebs- und sicherheitstechnisch erforderlichen Strecken, Arbeitsbereichen sowie Tageszugängen begrenzt. Dies minimiert zum einen die Schädigung des Wirtsgesteines und zum anderen die Menge des einzubringenden Versatzes bzw. die Anzahl der Verschlussbauwerke. Die Anbindung der Einlagerungsbereiche an die Tageszugänge über den kürzesten Weg reduziert die Transportstrecken der Endlagergebäude bei der Einlagerung, aber auch bei der Rückholung. Ein weiterer Vorteil kurzer Transportwege ist der verringerte Zeitaufwand zur Wiederauffahrung der einzelnen Strecken bei einer möglichen Rückholung. Die Planung des Grubengebäudes im Rahmen der Einlagerung entspricht also bereits den Anforderungen an das Grubengebäude mit Blick auf eine mögliche Rückholung.

Die Rückholung ist zu jedem Zeitpunkt der Betriebsphase und für eine beliebige Anzahl von Gebinden dann einfach möglich, wenn jeder Teilschritt der Einlagerung umkehrbar ist. Mögliche Maßnahmen zur Gewährleistung der Rückholbarkeit ergeben sich also aus der zusätzlichen Anforderung der Reversibilität in jedem Teilschritt. Nachfolgend sind die Teilschritte aufgeführt und mögliche Maßnahmen zur Umsetzung am Beispiel der Endlagerauslegung für ein Endlager in Tongestein, auf Grundlage des im Rahmen des Forschungs- und Entwicklungsvorhabens ERNESTA (Herold et al. 2018b) erstellten Konzepts zur Rückholung von Endlagergebänden aus Endlagern in Tongestein, beschrieben.

- **Entfernung oder Umfahrung etwaiger Streckenverschlüsse:** Sofern in der jeweiligen Auslegung Streckenverschlüsse oder Migrationssperren vorgesehen sind, müssen diese für die Rückholung entfernt oder umfahren werden. Mögliche Maßnahmen zur Umsetzung für ein Endlager in Tongestein werden in Beispiel 10 aufgeführt.

## Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung



| Projekt | PSP-Element | Funktion/Thema | Komponente | Baugruppe | Aufgabe | UA | Lfd.-Nr. | Rev |
|---------|-------------|----------------|------------|-----------|---------|----|----------|-----|
| NAAN    | NNNNNNNNNN  | NNAAANN        | AANNNA     | AANN      | AAAA    | AA | NNNN     | NN  |
| SG      | 0330        |                |            |           | EA      | TF | 0002     | 00  |

Blatt: 148

*Beispiel 10: Mögliche Maßnahmen zur Entfernung oder Umfahrung etwaiger Streckenverschlüsse bei der Rückholung aus einem Endlager in Tongestein*

### Mögliche Maßnahmen zur Entfernung oder Umfahrung etwaiger Streckenverschlüsse bei der Rückholung aus einem Endlager in Tongestein

In bisherigen Planungen für Tongestein (Herold et al. 2018a) ist eine Umfahrung der massiven Streckenverschlüsse (bestehend aus Betonwiderlagern, Bentonit-Dichtelementen und Asphalt-Dichtelementen) im Übergang vom Infrastrukturbereich zum Einlagerungsbereich bei der Neuauffahrung der Hauptstrecken vorgesehen. Hierfür sollen bei der Planung des Grubengebäudes ausreichend breite Sicherheitspfeiler vorgesehen werden. Dies soll den Prozess der Wiederauffahrung beschleunigen und den Einsatz einer Teilschnittmaschine (TSM) ermöglichen. Im weiteren Verlauf könnte eine Umfahrung aufgrund des begrenzten Platzangebotes im Einlagerungsbereich ggf. nicht möglich sein; dies beträfe auch die dort verbauten Streckenverschlüsse. In einem solchen Fall wäre z. B. der Rückbau der Streckenverschlüsse oder eine Durchörterung mit entsprechend abgestimmter Vortriebtechnologie möglich.

- **Freilegen der Querschläge, Richtstrecken und Einlagerungsstrecken<sup>14</sup>:** Um an die eingelagerten Gebinde zu gelangen, müssten die verfüllten Querschläge, Richtstrecken und Einlagerungsstrecken wieder freigelegt werden. Mögliche Maßnahmen zur Umsetzung für ein Endlager in Tongestein werden in Beispiel 11 aufgeführt.

*Beispiel 11: Mögliche Maßnahmen zum Freilegen der Querschläge, Richtstrecken und Einlagerungsstrecken bei der Rückholung aus einem Endlager in Tongestein*

### Mögliche Maßnahmen zum Freilegen der Querschläge, Richtstrecken und Einlagerungsstrecken bei der Rückholung aus einem Endlager in Tongestein

Eine Wiederauffahrung der verfüllten Strecken in Tongestein würde eine von der Auffahrung selber abweichende Technik erfordern. Die Auffahrung der Strecken bei Errichtung erfolgt im erarbeiteten Konzept bergschonend über TSM. Diese könnten dann bei einer Auffahrung neuer Strecken im Rahmen der Rückholung ebenfalls eingesetzt werden. Für die Wiederauffahrung versetzter Strecken eignet sich der Einsatz einer TSM nicht, da der Zeitaufwand und Verschleiß durch wechselnde Versatzmaterialien zu groß wäre. Außerdem führt die anzunehmende Beschaffenheit des Versatzes möglicherweise durch ein Verkleben des Schneidwerkes zu hohen Stillstandzeiten der TSM. Daher wäre für die Rückholung von Gebinden aus versetzten Strecken der Einsatz von Tunnelbaggern von Vorteil, die weniger anfällig gegen-

<sup>14</sup> In den vorläufigen Auslegungen des Endlagers im Tongestein sowie im Steinsalz wird das Konzept der Streckenlagerung zugrunde gelegt, siehe Kapitel 4.2.5.

## Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung



| Projekt | PSP-Element | Funktion/Thema | Komponente | Baugruppe | Aufgabe | UA | Lfd.-Nr. | Rev |
|---------|-------------|----------------|------------|-----------|---------|----|----------|-----|
| NAAN    | NNNNNNNNNN  | NNAAANN        | AANNNA     | AANN      | AAAA    | AA | NNNN     | NN  |
| SG      | 0330        |                |            |           | EA      | TF | 0002     | 00  |

Blatt: 149

### Mögliche Maßnahmen zum Freilegen der Querschläge, Richtstrecken und Einlagerungsstrecken bei der Rückholung aus einem Endlager in Tongestein

über wechselnden und sehr weichen Versatzmaterialien sind. In die Planung des Streckenausbaus muss der mögliche Rückholungszeitraum einbezogen werden, um eine Einschätzung über den erwarteten Zustand des Ausbaus zum Zeitpunkt der Rückholung treffen zu können. Es ist nicht davon auszugehen, dass der Ausbau zum spätesten Rückholungszeitraum noch intakt ist. In diesem Fall müssten die gelösten Teile des Ausbaus analog zum Versatz geräumt werden. Eine erneute Ertüchtigung des Ausbaus oder ein Neueinbau würde dann zwingend erforderlich sein, um die Betriebssicherheit während der Rückholung zu gewährleisten.

In einigen Einlagerungskonzepten kann aufgrund zu hoher Temperaturen in den verfüllten Einlagerungsstrecken ggf. eine Neuauffahrung von parallelen Strecken und ein anschließender Rückbau des verbleibenden Pfeilers sinnvoll sein, um die Strecken freizulegen (Herold et al. 2018b). Hierbei wäre jedoch zu berücksichtigen, dass dies durch die notwendigerweise breiteren Pfeiler den Flächenbedarf des Endlagers erhöht und sich so negativ auf die Langzeitsicherheit auswirken kann. Falls dies der Fall sein sollte, sind nach Möglichkeit andere Maßnahmen zur Rückholung zu wählen, auch wenn sie mit einem höheren Aufwand verbunden sind.

- Transport des rückgewonnenen Haufwerks:** Ein untertägiger Verbleib des Haufwerks kann die anzupassende Prozesskette verkürzen. Gegebenenfalls sind zusätzlich Räume und Flächen für die Lagerung des Materials vorzuhalten bzw. ist zu überlegen dieses freizumessen. Es muss sichergestellt werden, dass der Massenstrom an gewonnenem Haufwerk vom Gewinnungsort z. B. in eine andere Strecke oder nach Übertage transportiert werden kann. Dazu gehören gegebenenfalls Fahrzeuge, Wagons aber auch Transportkapazitäten in den Schächten, die je nach Strahlenschutzbereich zu unterscheiden sind.
- Freilegen des Gebindes:** Dokumentierte Positionen von Abfallgebinden erleichtern das Auffinden und Freilegen konkreter Abfallgebinde. Zusätzlich können geophysikalische Verfahren zur genauen Lokalisierung verwendet werden. Die Aufteilung unterschiedlicher Abfälle auf verschiedene Strecken hilft ebenfalls bei der selektiven Rückholung bzw. beim Identifizieren des rückzuholenden Abfalls und der erforderlichen Schutzmaßnahmen. Auch der Verzicht auf Tragzapfen am Behälter kann das Freilegen erleichtern. Die Rückgewinnung des Versatzes führt zu einer Mischung der bergbaulichen Tätigkeiten, die üblicherweise im Überwachungsbereich erfolgen, mit denen der Rückholung, die im Kontrollbereich erfolgen. Während der Annäherung an das Gebinde sind die Wetter zu überwachen und regelmäßige Messungen der Aktivität des Haufwerks vorzunehmen (Herold et al. 2018a). Mögliche Schritte zum Freilegen des Gebindes für ein Endlager in Tongestein werden in Beispiel 12 aufgeführt.

## Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung



| Projekt | PSP-Element | Funktion/Thema | Komponente | Baugruppe | Aufgabe | UA | Lfd.-Nr. | Rev |
|---------|-------------|----------------|------------|-----------|---------|----|----------|-----|
| NAAN    | NNNNNNNNNN  | NNAAANN        | AANNNA     | AANN      | AAAA    | AA | NNNN     | NN  |
| SG      | 0330        |                |            |           | EA      | TF | 0002     | 00  |

Blatt: 150

*Beispiel 12: Mögliche Maßnahmen zum Freilegen des Gebindes bei der Rückholung aus einem Endlager in Tongestein*

### Mögliche Maßnahmen zum Freilegen des Gebindes bei der Rückholung aus einem Endlager in Tongestein

Im Rahmen eines möglichen Rückholungskonzepts in Tongestein (Herold et al. 2018a) wurde geplant, die Endlagergebände vollständig freizulegen, um sie anschließend mit entsprechendem Gerät aus der Strecke entnehmen und abtransportieren zu können. Dieser Vorgang wurde grundsätzlich in 4 Schritten geplant:

1. Entfernung des Buffers<sup>15</sup> mit Hilfe eines Hydraulikbaggers
2. Aufschütten eines temporären Arbeitsplanums neben dem Sockel, auf dem das Gebinde liegt
3. Entfernen des übrigen Buffers durch den Hydraulikbagger
4. Entfernen des temporären Schotterplanums

- **Wiederaufnahme des Gebindes:** Eine Maschine muss die Endlagergebäude erreichen, unabhängig von eventuell vorhandenen Tragzapfen greifen, anheben und bis zu einem Transportwagen transportieren und ihn auf diesen verladen können. In Beispiel 13 wird eine entsprechende Vorrichtung skizziert. Handhabbarkeit und Identifizierbarkeit der Gebäude können durch entsprechend ausgelegte Kennzeichnungen an den Gebäuden und eine lückenlose Dokumentation des Einlagerungsbetriebes unterstützt werden. Dementsprechend ergeben sich aus der Rückholbarkeit Anforderungen an den Behälter, die bei dessen Entwicklung zu berücksichtigen sind (siehe hierzu auch BGE (2021b, Kapitel 4.3)).

*Beispiel 13: Mögliche Maßnahmen zur Wiederaufnahme des Gebindes bei der Rückholung aus einem Endlager in Tongestein*

### Mögliche Maßnahmen zur Wiederaufnahme des Gebindes bei der Rückholung aus einem Endlager in Tongestein

Für die Entnahme des Gebindes aus der Strecke wurde im Rahmen des Forschungs- und Entwicklungsvorhabens ERNESTA (Herold et al. 2018b) eine „modifizierte Einlagerungsvorrichtung in Strecken“ (mELVIS, siehe Abbildung 30) skizziert. Diese Vorrichtung wurde in Anlehnung an eine mögliche gleislose Einlagerungsvorrichtung konzipiert und soll das Endlagergebäude analog zum Prozess des Ablegens beim Versatz bei einer möglichen Rückholung aus der freigelegten Strecke wiederaufnehmen.

<sup>15</sup> Als Buffer wird das Versatzmaterial der Einlagerungsstrecken bezeichnet.

# Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung

| Projekt | PSP-Element | Funktion/Thema | Komponente | Baugruppe | Aufgabe | UA | Lfd.-Nr. | Rev |
|---------|-------------|----------------|------------|-----------|---------|----|----------|-----|
| NAAN    | NNNNNNNNNN  | NNAAANN        | AANNNA     | AANN      | AAAA    | AA | NNNN     | NN  |
| SG      | 0330        |                |            |           | EA      | TF | 0002     | 00  |

Blatt: 151

## Mögliche Maßnahmen zur Wiederaufnahme des Gebinde bei der Rückholung aus einem Endlager in Tongestein

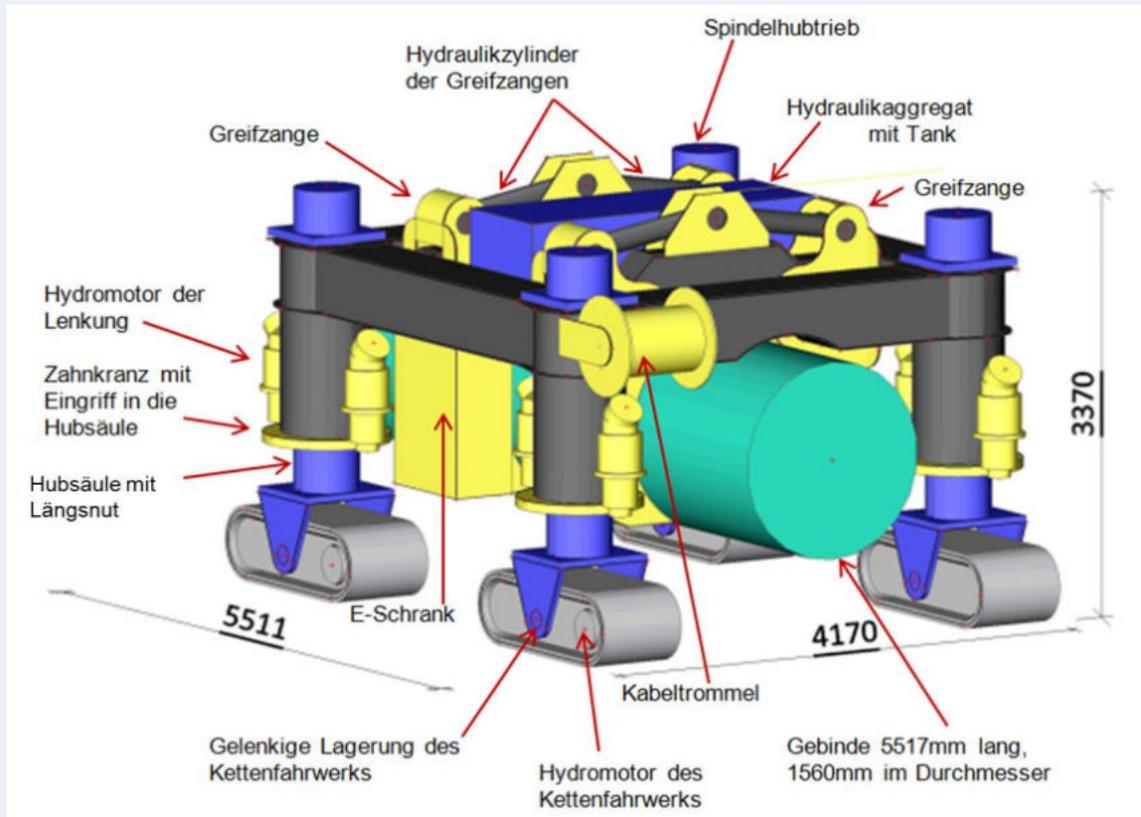


Abbildung 30: Darstellung der mELVIS im angehobenen Zustand mit Endlagerbehälter (Herold et al. 2018b)

- **Transport zum Schacht<sup>16</sup>:** Abhängig von der noch vorhandenen Gleistechnik können gleisgeführte oder gleislose Wagen verwendet werden, um die Gebinde zum Schacht zu transportieren. Diese können bei entsprechender Auslegung auch im Schacht und Übertage verwendet werden. Nachfolgend ist exemplarisch die im Forschungs- und Entwicklungsvorhaben ERNESTA (Herold et al. 2018b) skizzierte Variante des Transports beschrieben:

Die mELVIS würde demzufolge das jeweilige Gebinde von der Einlagerungsstrecke bis zum zentralen Übergabepunkt des gesamten Einlagerungsfeldes im Querschlag transportieren und ihn dort an einen gleisgebundenen Plateauwagen übergeben. Der Plateauwagen mit dem Gebinde würde dann von einer batteriebetriebenen Lok bis zum Schacht transportiert.

<sup>16</sup> Gemäß der Annahme in Kapitel 4.2.6.1 wird von einem Schacht als Tageszugang ausgegangen.

## Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung



| Projekt | PSP-Element | Funktion/Thema | Komponente | Baugruppe | Aufgabe | UA | Lfd.-Nr. | Rev |
|---------|-------------|----------------|------------|-----------|---------|----|----------|-----|
| NAAN    | NNNNNNNNNN  | NNAAANN        | AANNNA     | AANN      | AAAA    | AA | NNNN     | NN  |
| SG      | 0330        |                |            |           | EA      | TF | 0002     | 00  |

Blatt: 152

- Transport des Gebindes an die Tagesoberfläche:** Die Schachtförderung muss den Transport der Gebinde nach Übertage sicherstellen. Am Schacht können z. B. Plateauwagen mit Gebinden auf Schienen in den Förderkorb verfahren werden und nach Übertage transportiert werden.

Durch die Einlagerung von wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen kommt es zu einer Erwärmung des umliegenden Gebirges. Die resultierenden Temperaturen sind insbesondere abhängig von den Eigenschaften des Gesteins, dem Endlagerkonzept inklusive der räumlichen Konfiguration der Einlagerungsbereiche und der Auslegungstemperatur an der Behälteroberfläche. Die hierdurch veränderten Umgebungsbedingungen sind in allen Teilschritten einer möglichen Rückholung zu beachten. Für den sicheren Betrieb sind die Umgebungstemperaturen zu begrenzen. Für das Personal sind die maximalen Arbeitstemperaturen gemäß der KlimaBergV einzuhalten. Daher ist eine entsprechende Kühlung zwingend notwendig. Als erste Kühlungsmaßnahme ist eine Bewetterung vorzusehen. Hierfür kann je nach Platzangebot eine zusätzliche Zugangsstrecke zur Vergrößerung der Wettermenge sinnvoll sein. Zur Einhaltung der aus den Anforderungen an einen sicheren Betrieb resultierenden Temperaturgrenzwerte kann zudem eine zusätzliche technische Kühlung der Wetter notwendig werden.

### 4.2.6.6 Mögliche Verschluss- und Versatzmaßnahmen

Entsprechend des Endlagersystems Typ 1 wird der langzeitsichere Einschluss des radioaktiven Abfalls von einem oder mehreren einschlusswirksamen Gebirgsbereichen im Zusammenwirken mit den technischen und geotechnischen Barrieren des Endlagersystems sichergestellt. Durch die Erstellung des Endlagerbergwerks werden im Wirtsgesteinsbereich mit Barrierefunktion jedoch Hohlräume erstellt, die über die Tageszugänge mit dem Deck- und Nebengebirge und schließlich mit der Biosphäre verbunden sind. Damit besteht ein direkter Transportweg für Grundwasser in das Endlager hinein sowie für in Grundwasser gelöste oder gasförmige Radionuklide aus dem Endlager heraus. Dieser Transportweg muss abgedichtet werden, um die Abfälle im einschlusswirksamen Gebirgsbereich in der Nachverschlussphase so gut wie möglich einzuschließen. Zu diesem Zweck werden die Hohlräume nach § 18 Abs. 2 EndlSiAnfV möglichst zügig und möglichst vollständig (§ 19 Abs. 2 EndlSiAnfV) nach Ende ihrer betrieblichen Funktion verfüllt („versetzt“) und verschlossen. Durch die Verschluss- und Versatzmaßnahmen werden also geotechnische Barrieren errichtet, um den Einschluss der radioaktiven Abfälle im Zusammenwirken mit dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich für den gesamten Untersuchungszeitraum sicherzustellen. Für das geotechnische Barriersystem gilt § 4 Abs. 2 EndlSiAnfV, nach dem ein „*robustes, gestaffeltes System verschiedener Barrieren mit unterschiedlichen Sicherheitsfunktionen*“ vorzusehen ist. Es sind also entlang des Transportwegs zwischen den radioaktiven Abfällen und der Biosphäre mehrere verschiedene Barrieren erforderlich (vgl. Kapitel 4.1).

Im Rahmen des geotechnischen Barriersystems wird zwischen Verschluss- und Versatzmaßnahmen unterschieden. Als Verschlussbauwerke werden räumlich begrenzte Bauwerke verstanden, die an ausgewählten Stellen im Endlagerbergwerk aus verschiedenen Materialien und Funktionselementen errichtet werden. Ein Verschlussbauwerk soll seine abdichtende Funktion möglichst zügig

## Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung



| Projekt | PSP-Element | Funktion/Thema | Komponente | Baugruppe | Aufgabe | UA | Lfd.-Nr. | Rev |
|---------|-------------|----------------|------------|-----------|---------|----|----------|-----|
| NAAN    | NNNNNNNNNN  | NNAAANN        | AANNNA     | AANN      | AAAA    | AA | NNNN     | NN  |
| SG      | 0330        |                |            |           | EA      | TF | 0002     | 00  |

Blatt: 153

nach Einbau erfüllen. Der Versatz dient der Verfüllung aller weiteren Hohlräume. Seine Abdichtfunktion ist vor allem langfristig vorgesehen und basiert auf der zunehmenden Verbindung mit dem Wirtsgestein in der Nachverschlussphase (z. B. durch Gebirgskonvergenz und Kompaktion des Versatzmaterials oder durch Quellen bei Tonmineralen durch Kontakt mit Grundwasser). Die Abdichtwirkung des Versatzes im Verbund mit dem Wirtsgestein soll seine volle Funktionsfähigkeit erreichen, bevor die Gültigkeit der bautechnischen Nachweise der Verschlussbauwerke aufgrund ihrer langen Lebensdauer eingeschränkt ist. Neben der Abdichtfunktion können Versatzmaßnahmen auch weiteren oder anderen Zwecken dienen wie der mechanischen Stützung des Gebirges zur Verringerung von Gebirgsbewegungen und Rissbildung oder der Bereitstellung von Porenvolumen zur Speicherung von Fluiden. Weitere Verschluss- und Versatzmaßnahmen betreffen Erkundungsbohrungen. Diese können Transportwege durch das Wirtsgestein eröffnen und müssen deshalb langzeitsicher verfüllt und verschlossen werden. Die Sicherheitsfunktionen der Verschluss- und Versatzmaßnahmen sind in Kapitel 4.1.3.3 dargestellt.

Nach § 18 Abs. 2 EndlSiAnfV ist der für die Endlagerung genutzte Bereich des Endlagerbergwerks gegen das restliche Endlagerbergwerk zu verschließen. Diese Anforderung wird erfüllt, indem jeweils ein Verschlussbauwerk in den beiden Richtstrecken zwischen Einlagerungsbereich und Infrastrukturbereich platziert wird. Diese Verschlussbauwerke können baugleich sein und bestehen jeweils aus mehreren abdichtenden Elementen. Innerhalb des Einlagerungsbereichs ist auch das abschnittsweise Verschließen im Zuge des Einlagerungs- und Verfüllfortschritts eine mögliche Maßnahme. Einzelne Einlagerungsfelder können z. B. an beiden Enden des Querschlags mit einem Verschlussbauwerk versehen werden (Jobmann & Lommerzheim 2015). Alternativ können auch Verschlussbauwerke in den Richtstrecken im Einlagerungsbereich platziert werden. Selbst der Verschluss der einzelnen Einlagerungstrecken ist denkbar, um die eingelagerten Endlagergebände schon in der Betriebsphase vom restlichen Endlagerbergwerk abzuschließen und Wechselwirkungen zum Einlagerungsbetrieb (z. B. über den luftgefüllten Porenraum des Versatzes) zu minimieren.

Die Anzahl und Platzierung von Verschlussbauwerken über die mindestens notwendigen Streckenverschlüsse zum Infrastrukturbereich hinaus wird im Anschluss an die rvSU mit Blick auf die Langzeitsicherheitsuntersuchungen und die Betriebssicherheitsuntersuchungen für die jeweiligen Untersuchungsräume erarbeitet. Im Rahmen der rvSU beschränkt sich die vorläufige Endlagerauslegung auf die unbedingt notwendigen Streckenverschlüsse. Deren Lage und die Lage weiterer denkbarer Streckenverschlüsse mit dem Ziel des Einschlusses der Abfälle in der Nachverschlussphase wird in Abbildung 31 dargestellt.

# Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung

| Projekt | PSP-Element | Funktion/Thema | Komponente | Baugruppe | Aufgabe | UA | Lfd.-Nr. | Rev |
|---------|-------------|----------------|------------|-----------|---------|----|----------|-----|
| NAAN    | NNNNNNNNNN  | NNAAAANN       | AANNNA     | AANN      | AAAA    | AA | NNNN     | NN  |
| SG      | 0330        |                |            |           | EA      | TF | 0002     | 00  |

Blatt: 154



Abbildung 31: Darstellung von Positionen von Streckenverschlüssen im Endlager

Für den Einschluss der radioaktiven Abfälle sind die Verschlussbauwerke innerhalb der Grenzen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs maßgeblich. Diese schließen mindestens den Einlagerungsbereich ein. In diesem Fall schneidet die Grenze des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs die Richtstrecken bei den vorgesehenen Streckenverschlüssen. Die für die Langzeitsicherheit relevanten Verschlussbauwerke sind dann ausschließlich die genannten Streckenverschlüsse. Umfasst der einschlusswirksame Gebirgsbereich außerdem den Infrastrukturbereich, schneiden seine Grenzen die Schächte. Dann sind auch die Schachtverschlüsse als Teil des Barrierensystems vorzusehen. Die Funktion der Schachtverschlüsse besteht vor allem in der Abdichtung des Endlagers gegenüber wasserführenden Schichten im Deckgebirge. Der Schachtverschluss weist hierfür ebenfalls mehrere Dichtelemente auf. Weitere Funktionselemente stellen die Stabilität und dauerhafte Funktion der Dichtelemente sicher. Im Deckgebirge ist der Schacht weiterhin so zu verfüllen, dass wasserführende Schichten des Deckgebirges in unterschiedlichen Teufen voneinander getrennt bleiben.

Im Rahmen der rvSU kann nach § 7 Abs. 6 EndlSiUntV davon ausgegangen werden, dass die geotechnischen Barrieren ihre Funktion im vorgesehenen Funktionszeitraum erfüllen. Eine genaue Planung und Bemessung der Verschlussbauwerke oder eine Festlegung der Zusammensetzung von Versatzmaterial findet deshalb im Rahmen der rvSU nicht statt.

Beispiel 14 und Beispiel 15 zeigen mögliche Verschluss- und Versatzmaßnahmen für die Endlagerung im Opalinuston und in steil lagerndem Steinsalz.

# Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung



| Projekt | PSP-Element | Funktion/Thema | Komponente | Baugruppe | Aufgabe | UA | Lfd.-Nr. | Rev |
|---------|-------------|----------------|------------|-----------|---------|----|----------|-----|
| NAAN    | NNNNNNNNNN  | NNAAANN        | AANNNA     | AANN      | AAAA    | AA | NNNN     | NN  |
| SG      | 0330        |                |            |           | EA      | TF | 0002     | 00  |

Blatt: 155

Beispiel 14: Wirtsgesteinsspezifische Verschluss- und Versatzmaßnahmen im Opalinuston

## Wirtsgesteinsspezifische Verschluss- und Versatzmaßnahmen im Opalinuston

Im laufenden FuE Projekt „Aktualisierung der Sicherheits- und Nachweismethodik für die HAW-Endlagerung im Tongestein in Deutschland“ (PTKA 2021) wurde zusammengetragen und näher erläutert, welche Elemente und Materialien für die Verschluss- und Verfüllmaßnahmen eines Endlagers im Tongestein in Frage kommen. Diese Liste umfasst:

An Versatzmaßnahmen:

- Versatz in den Einlagerungsstrecken (Buffermaterial)
- Ausbruchsmaterial angereichert mit quellfähigen Tonmineralen
- Verfüllsäulen und Widerlager aus Schotter, evtl. mit Sand vermischt

An Verschlussmaßnahmen:

- Dichtelemente aus Bentonit
- Dichtelemente aus Bentonit mit Äquipotenzialsegmenten
- Dichtelemente aus Asphalt und Bitumen
- Dichtelemente aus Beton
- Widerlager aus Beton
- Filterschichten

Die folgenden Ausführungen, sofern nicht anders referenziert, wurden diesen Arbeiten sinngemäß mit leichten Anpassungen für die Anforderungen der rvSU entnommen.

### Buffermaterial

Das Versatzmaterial der Einlagerungsstrecken wird als Buffer bezeichnet. Es umschließt die Endlagergebäude am Einlagerungsort. Der Buffer kann bei Freisetzung von Radionukliden schon eine erste rückhaltende Wirkung entfalten. Um das Endlagergebäude vollständig zu umschließen, wird der Behälter auf einem Sockel aus Formsteinen aus quellfähigem Tonmaterial abgelegt und mit Granulat und/oder Formsteinen aus dem gleichen Material umschlossen, das den Resthohlraum möglichst vollständig ausfüllen soll. Die gesamte Einlagerungsstrecke wird so verfüllt. Durch den hohen Tonmineralanteil des Materials quillt es bei Lösungszutritt auf. Dadurch werden verbleibende Lücken im Laufe der Zeit geschlossen bis der angestrebte Stützdruck vollständig aufgebaut ist. Dieser Stützdruck muss spätestens dann aufgebaut sein, wenn durch Korrosionsprozesse der verbliebene Ausbau nachgibt. Der Buffer verhindert in diesem Fall durch den aufgebrachten Stützdruck die Ausbildung einer neuen Auflockerungszone im umliegenden Gebirge. Während der frühen Nachverschlussphase, in der mit Gasbildung durch Korrosionsprozessen zu rechnen ist, soll der Buffer außerdem eine ausreichende Durchlässigkeit zur Aufnahme dieser aufweisen. Diese austretenden Gase sollen sich nach

# Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung



| Projekt | PSP-Element | Funktion/Thema | Komponente | Baugruppe | Aufgabe | UA | Lfd.-Nr. | Rev |
|---------|-------------|----------------|------------|-----------|---------|----|----------|-----|
| NAAN    | NNNNNNNNNN  | NNAAANN        | AANNNA     | AANN      | AAAA    | AA | NNNN     | NN  |
| SG      | 0330        |                |            |           | EA      | TF | 0002     | 00  |

Blatt: 156

## Wirtsgesteinsspezifische Verschluss- und Versatzmaßnahmen im Opalinuston

dem Prinzip des geringsten Widerstandes den Weg zur Ausbreitung durch den Buffer suchen und nicht durch den Ausbau und die umliegende Auflockerungszone ins Gebirge gelangen. Der Buffer übernimmt zusammenfassend also folgende Aufgaben (Jobmann & Lommerzheim 2015):

- Aufbau eines Stützdrucks gegenüber dem auflaufenden Gebirge
- Erhöhte Aufnahmefähigkeit für Gase in der frühen Nachverschlussphase
- Rückhaltung von Radionukliden

Denkbar wäre der Einsatz von arteigenem Ausbruchsmaterial das bei Bedarf zusätzlich mit quellfähigen Tonmineralen versetzt wird (Jobmann & Lommerzheim 2015). Von dem Einsatz von reinem Bentonit wird in (Jobmann & Lommerzheim 2015) abgesehen, da die Beschaffung des Bentonits auf Grund der Menge aus verschiedenen Gewinnungsgebieten erforderlich wäre und somit eine Homogenisierung des eingesetzten Buffermaterials schwierig wäre.

### Ausbruchsmaterial als Streckenversatz

Für den Streckenversatz im Grubengebäude wird arteigenes Ausbruchsmaterial vorgesehen, dass bei Bedarf mit Bentonit oder weiteren Tonmineralen versetzt werden kann. Das Tonmaterial weist sehr gute Quelleigenschaften auf und kann somit eine Dichtwirkung durch das Verschließen der offenen Poren erzeugen sowie dem Gebirge gegenüber einen Stützdruck entfalten. Zugemischtes Bentonit weist gute Eigenschaften bezogen auf die Rückhaltung von Radionukliden auf. Ein entscheidender weiterer Vorteil bei der Verwendung arteigner Ausbruchsmaterialien ist die gute Verfügbarkeit am Standort in weitestgehend homogener Qualität.

### Verfüllsäulen und Widerlager aus Schotter

Der Einsatz von Hartgesteinsschotter, bei dem eine geringe Setzung nachgewiesen werden kann (z. B. Basalt), eignet sich gut für das Verfüllen von Schachtsäulen. Dabei muss die Festigkeit ausreichend groß sein, um den Belastungen durch die gesamte Verschluss säule standzuhalten. Sollte eine chemische Beständigkeit der Schachtverfüllung gefordert sein, kann chemisch reaktionsträger Quarz als Schottermaterial eingesetzt werden. Eine Beimischung von Sand kann dazu beitragen, die Kapillarspannung gegenüber Gasen zu verringern.

### Dichtelemente aus Bentonit

Unter Bentonit wird ein quellfähiges Gemisch verschiedener Tonminerale verstanden, das einen Montmorillonitgehalt von größer 50 % beinhaltet. Bei Wasserzutritt reagiert der Bentonit mit Volumenvergrößerung (er quillt), verspannt sich gegen die Streckenkontur und dichtet den Streckenquerschnitt ab. Der Einsatz von Bentonit zur Abdichtung von Tageszugängen und untertägigen Bereichen im konventionellen Bergbau ist Stand der Technik und seit Jahren erfolgreich im Einsatz. Besonders bezogen auf den Einsatz von Calcium-Bentonit (Ca-Ben-

# Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung



| Projekt | PSP-Element | Funktion/Thema | Komponente | Baugruppe | Aufgabe | UA | Lfd.-Nr. | Rev |
|---------|-------------|----------------|------------|-----------|---------|----|----------|-----|
| NAAN    | NNNNNNNNNN  | NNAAANN        | AANNNA     | AANN      | AAAA    | AA | NNNN     | NN  |
| SG      | 0330        |                |            |           | EA      | TF | 0002     | 00  |

Blatt: 157

## Wirtsgesteinsspezifische Verschluss- und Versatzmaßnahmen im Opalinuston

tonit) gibt eine Vielzahl von Forschungsprojekten, die die günstigen Eigenschaften als Verschlussmaterial belegen. (z. B. (Bredung 2002)). Eine weitere wichtige Eigenschaft des Bentonits als Verschlussmaterial ist die Sorptionsfähigkeit gegenüber vielen Radionukliden.

### Dichtelemente aus Bentonit mit Äquipotenzialsegmenten

Bei diesem Dichtelement wechseln sich Bentonitelemente und Sandelemente ab. Bei Zufluss von Grundwasser kann die resultierende Aufsättigung und Quellung des Bentonits ungleichmäßig erfolgen. Durch die Sandelemente werden diese Ungleichmäßigkeiten auf ein Betonitelement beschränkt und damit in ihrer Ausbreitung unterbrochen. In Schachtverschlüssen wird lokal zutretendes Grundwasser über den Porenraum der Sandelemente gleichmäßig über die Querschnittsfläche des Schachts verteilt. Damit wird Kanalisierungen im Schachtverschluss vorgebeugt. Der Aufsättigungsprozess der Bentonitelemente wird damit vergleichmäßigt.

### Dichtelemente aus Asphalt und Bitumen

Bei Bitumen handelt es sich um ein Gemisch aus verschiedensten Kohlenwasserstoffen. Bei Zimmertemperatur ist Bitumen im Allgemeinen fest. Mit zunehmender Temperatur sinkt die Viskosität und das Material wird zähflüssiger. Bitumen ist wasserunlöslich und gleichzeitig von Wasser undurchdringlich sowie gegenüber Salzen, aggressiven Wässern, Säuren und Laugen weitgehend beständig. Im zähflüssigen Zustand eignet es sich sehr gut, um Risse und Klüfte zu verschließen und weist eine hohe Haftung an anderen Materialien auf.

Werden dem Bitumen Gesteinskörnungen zugemischt, spricht man von Asphalt. Durch ein frei wählbares Verhältnis von Bitumen und Gesteinszusätzen können die Materialeigenschaften an das Einsatzgebiet angepasst werden. Bitumen/Asphalt wird seit Jahren zur sofortigen Abdichtung von wasserführenden Gebirgsbereichen im Bergbau eingesetzt.

Der Einfluss der Alterungsprozesse (physikalische und chemische Alterungsprozesse sowie mikrobieller Abbau) bezogen auf die Langzeitbeständigkeit und die damit zeitlich begrenzt mögliche Nachweisführung für den Einsatz in einem Endlager für radioaktive Abfälle wird aktuell fortlaufend weiter untersucht. Bitumen wird als Material mit sofortiger Dichtwirkung im Verschlussystem berücksichtigt.

### Dichtelemente aus Beton

Beton besteht im Wesentlichen aus Zement, Gesteinskörnung, Zusatzstoffen und Wasser. International wurde die Machbarkeit von Dichtelementen aus Beton im Tongestein und im Kristallingestein in verschiedenen Experimenten untersucht: z. B. im DOPAS Projekt (Hansen et al. 2016) mit den Experimenten DOMPLU und POPLU und im Experiment TSX (Chandler et al. 1998).

# Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung



| Projekt | PSP-Element | Funktion/Thema | Komponente | Baugruppe | Aufgabe | UA | Lfd.-Nr. | Rev |
|---------|-------------|----------------|------------|-----------|---------|----|----------|-----|
| NAAN    | NNNNNNNNNN  | NNAAANN        | AANNNA     | AANN      | AAAA    | AA | NNNN     | NN  |
| SG      | 0330        |                |            |           | EA      | TF | 0002     | 00  |

Blatt: 158

## Wirtsgesteinsspezifische Verschluss- und Versatzmaßnahmen im Opalinuston

### Widerlager aus Beton

Widerlager werden im Rahmen des Verschlusskonzeptes vorgesehen um quellfähige Materialien wie z. B. Bentonit an einer Ausbreitung längs des Streckenquerschnitts zu hindern und somit den Aufbau des notwendigen Stützdruckes an die Gebirgskontur sicher zu stellen. Widerlager müssen durch ihre Geometrie fest im Gebirge verankert sein. Zur Vermeidung von Wechselwirkungen und vorzeitigen Alterungserscheinungen durch eintretende Porenwässer wird der Einsatz von low-pH Beton empfohlen. Dieser besteht nach aktuellem Stand aus rissarmen, alkalifreien Zementphasen frei von Portlandit.

### Filterschichten

Filterschichten dienen dem Erosions- und Suffosionsschutz, sowie einer gleichmäßigen Verteilung des hydraulischen Druckes durch zutretende Lösungen. Die mineralische Zusammensetzung und Dicke der Filterschicht ist anforderungsgerecht an den Einsatzort anzupassen.

### Beispiel Streckenverschluss Richtstrecken

In den Richtstrecken zwischen dem Einlagerungsbereich und dem Infrastrukturbereich werden Streckenverschlüsse positioniert. Diese sollen den Zutritt von Grundwasser aus dem Schacht in den Einlagerungsbereich verzögern. Diese Funktion soll der Verschluss möglichst lange aufrechterhalten. Hierzu ist ein Asphalt-dichtelement für eine instantane Abdichtung nach Einbau schachtseitig vorgesehen. Es werden zwei Bentonitdichtelemente vorgesehen. Durch Schlitze in das umliegende Gebirge soll die Auflockerungszone durchbrochen und effizienter abgedichtet werden. Der Verschluss wird von Betonwiderlagern eingespannt und am Platz gehalten. Zwischen den Bentonitelementen befindet sich ein zusätzliches Widerlager. Der Streckenverschluss hat zu einem späteren Zeitpunkt auch eine rückhaltende Wirkung gegenüber migrierenden Lösungen aus dem Einlagerungsbereich heraus. Eine beispielhafte Skizze für den Streckenverschluss zeigt Abbildung 32. Folgende Anforderungen werden an den Streckenverschluss gestellt:

- Verzögerung des Schachtseitigen Lösungszutrittes (auch instantan nach Einbau)
- Verzögerung der Fluidbewegung aus den Einlagerungsbereichen
- Mechanische Stabilität gegenüber dem Gebirgsdruck
- Chemische Stabilität über den Funktionszeitraum

Die Materialauswahl kann entsprechend der Umgebungsbedingungen vor Ort variiert werden. Mögliche Zusammensetzungen und geeignete Materialkennwerte wie z. B. die Permeabilität werden in (Jobmann & Lommerzheim 2015) diskutiert.

# Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung

| Projekt | PSP-Element | Funktion/Thema | Komponente | Baugruppe | Aufgabe | UA | Lfd.-Nr. | Rev |
|---------|-------------|----------------|------------|-----------|---------|----|----------|-----|
| NAAN    | NNNNNNNNNN  | NNAAANN        | AANNNA     | AANN      | AAAA    | AA | NNNN     | NN  |
| SG      | 0330        |                |            |           | EA      | TF | 0002     | 00  |

Blatt: 159

## Wirtgesteinsspezifische Verschluss- und Versatzmaßnahmen im Opalinuston

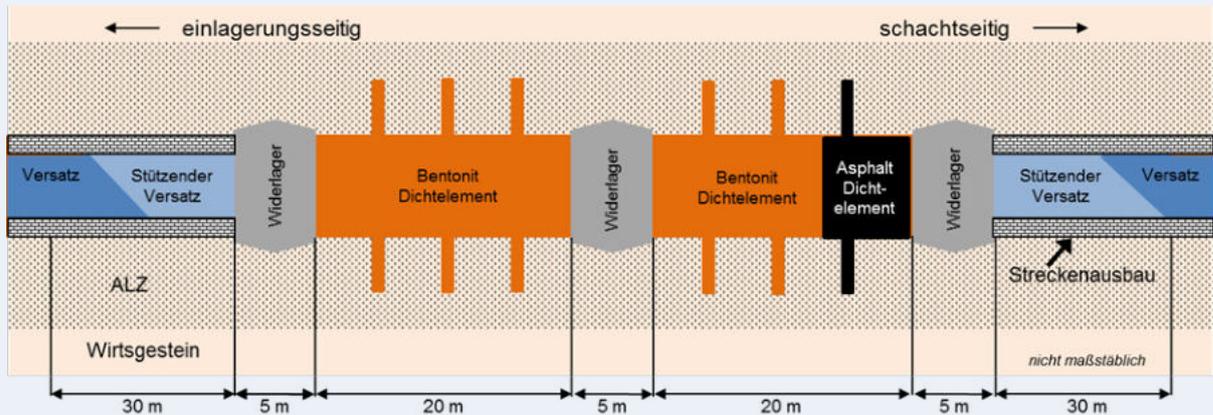


Abbildung 32: Beispiel für ein Konzept für einen Streckenverschluss im Opalinuston (Jobmann & Lommerzheim 2015)

Werden weitere Streckenverschlüsse im Einlagerungsbereich vorgesehen, können diese prinzipiell identisch oder mit nur einem Bentonitdichtelement vorgesehen werden. Das Asphalt-dichtelement ist dann vorzugsweise in der Richtung des Einlagerungsbereichs zu platzieren, um in der frühen Nachverschlussphase evtl. radionuklidbelastete Lösungen in ihrer Migration aus dem Einlagerungsbereich heraus zu verzögern.

### Beispiel Schachtverschluss

Für das Endlagerkonzept in einer geringmächtigen Tonformation wird in (Jobmann & Lommerzheim 2015) das geologische Profil aus (Reinhold et al. 2016) zu Grunde gelegt. Als Wirtsgestein wird ein Opalinuston angenommen und das generische Endlager in einer Teufe von 680 m errichtet. Ein mögliches Konzept für einen Schachtverschluss mit den erläuterten Funktionselementen kann Abbildung 33 entnommen werden.

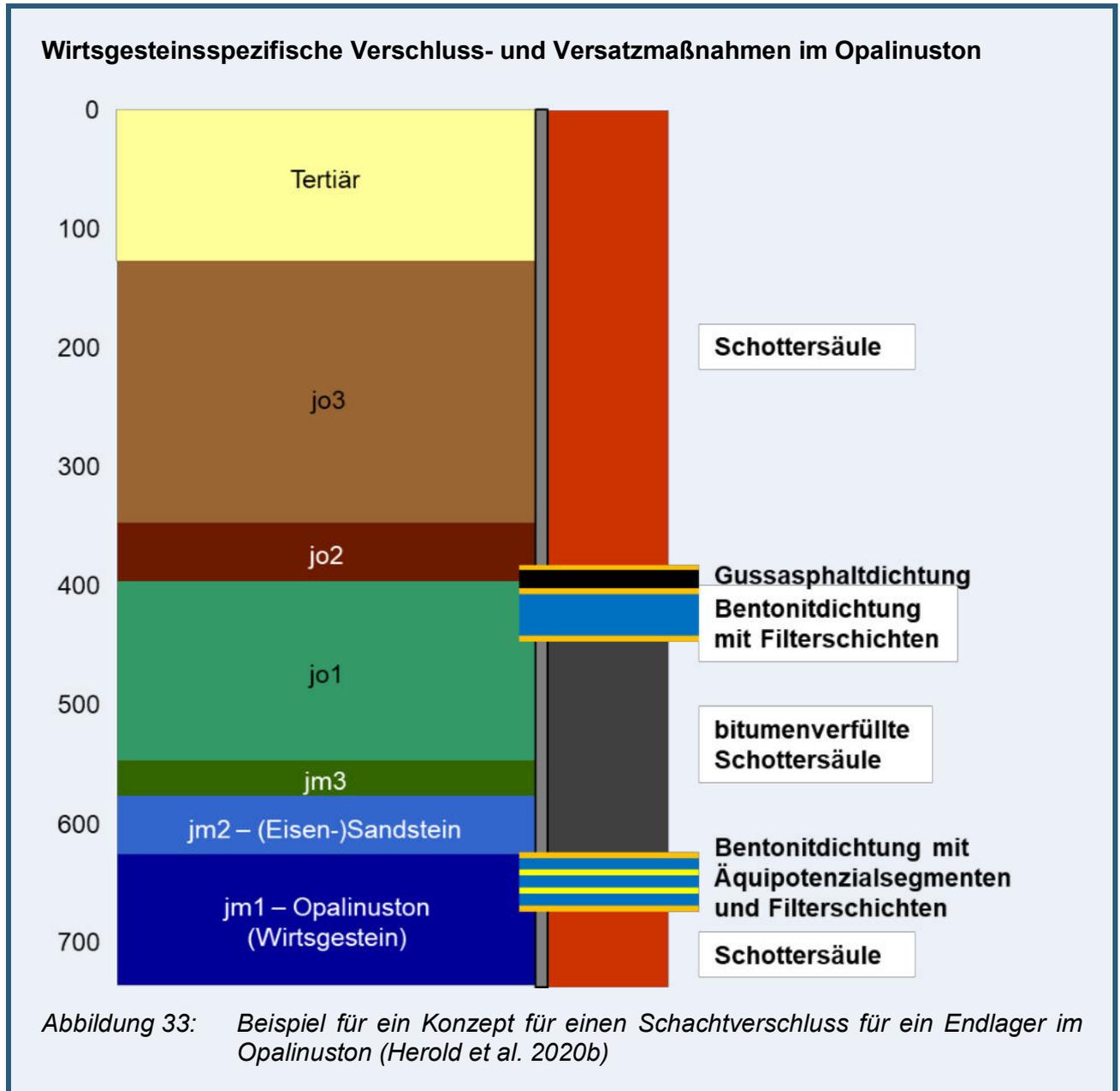
Folgende Anforderungen werden im Sicherheitskonzept (Kapitel 4.1.3.3) an den Schachtverschluss gestellt:

- Verzögerung von Lösungsbewegungen längs der Schachtachse
- Mechanische Langzeitstabilität der Widerlager gegen litho- und hydrostatische Drücke und gegenüber dem Quelldruck der Tonelemente
- Chemische Stabilität über den Funktionszeitraum

# Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung

| Projekt | PSP-Element | Funktion/Thema | Komponente | Baugruppe | Aufgabe | UA | Lfd.-Nr. | Rev |
|---------|-------------|----------------|------------|-----------|---------|----|----------|-----|
| NAAN    | NNNNNNNNNN  | NNAAANN        | AANNNA     | AANN      | AAAA    | AA | NNNN     | NN  |
| SG      | 0330        |                |            |           | EA      | TF | 0002     | 00  |

Blatt: 160



## Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung



| Projekt | PSP-Element | Funktion/Thema | Komponente | Baugruppe | Aufgabe | UA | Lfd.-Nr. | Rev |
|---------|-------------|----------------|------------|-----------|---------|----|----------|-----|
| NAAN    | NNNNNNNNNN  | NNAAANN        | AANNNA     | AANN      | AAAA    | AA | NNNN     | NN  |
| SG      | 0330        |                |            |           | EA      | TF | 0002     | 00  |

Blatt: 161

*Beispiel 15: Wirtsgesteinsspezifische Verschluss- und Versatzmaßnahmen in steil lagerndem Steinsalz*

### **Wirtsgesteinsspezifische Verschluss- und Versatzmaßnahmen in Steinsalz in steiler Lagerung**

In steil lagernden Salzformationen wurden die Maßnahmen zum Verschluss- und Versatz des Endlagers insbesondere im Rahmen der Vorläufigen Sicherheitsanalyse Gorleben (VSG) detailliert untersucht und insbesondere in (Bollingerfehr et al. 2012) sowie in (Müller-Hoeppe et al. 2012) detailliert dargestellt. In (Bertrams et al. 2020a) wurde zuletzt ein aktualisierter Stand zusammengefasst. Diese Dokumente stellen die Basis für die folgenden Ausführungen dar, sofern nicht anders referenziert.

Im Rahmen der rvSU werden folgende Verschluss- und Versatzmaßnahmen für ein Endlager in steil lagerndem Steinsalz vorgesehen:

Der Einlagerungsbereich wird vollständig mit naturtrockenem Salzgrus versetzt. Der Versatz erfolgt sukzessive: innerhalb der Einlagerungsstrecken wird der Hohlraum um ein Endlagergebäude herum direkt nach dessen Einlagerung verfüllt. Querschläge und Abschnitte der Richtstrecken werden verfüllt, sobald sie für den Betrieb des Endlagers nicht mehr notwendig sind. Auch in den Richtstrecken wird nach (Bollingerfehr et al. 2018) naturtrockener Salzgrus verwendet, um keine Feuchtigkeit in den Einlagerungsbereich einzutragen. Das Salzgrus kann per Schleuderversatz mit Fahrzeugen eingebracht werden.

Die Abdichtung des Einlagerungsbereiches gegen den Infrastrukturbereich erfolgt nach Bollingerfehr et al. (2018) über kombinierte Sorelbeton-Salzgrus-Verschlüsse, die einen Austritt von Gasen und Zustrom von Grundwasser kurzfristig und langfristig verhindern. Innerhalb der beiden Richtstrecken zwischen Infrastrukturbereich und Einlagerungsbereich werden jeweils baugleiche Verschlussysteme errichtet. Die primären Dichtelemente bestehen aus Sorelbeton. Sorelbeton ist bei zufließenden Lösungen mit hohem Magnesiumchlorid ( $MgCl_2$ ) Anteil dauerhaft. Solche Lösungen werden als Zufluss durch die Schächte bei Endlagerung in steil lagerndem Steinsalz durch Aufsättigung von Grundwasser an angrenzenden Carnallit-Flözen erwartet. Je Richtstrecke werden zwei dieser Dichtelemente vorgesehen. Der Streckenabschnitt zwischen diesen Dichtelementen wird mit angefeuchtetem Salzgrus verfüllt. Einerseits kompaktiert dieser schneller als trockener Salzgrus, andererseits wird der Einlagerungsbereich durch die Sorelbetonelemente von dieser eingebrachten Feuchte abgedichtet. Nach der vollständigen Kompaktion erreicht Salzgrus eine ähnlich geringe Permeabilität wie das anstehende Steinsalz und ist aufgrund des arteigenen Materials chemisch stabil im einschlusswirksamen Gebirgsbereich.

Für die Pufferung von Lösungen, die über die Schächte dem Endlager zutreten können, wird der Infrastrukturbereich mit einem porösen Material, z. B. Schotter, verfüllt. Das dadurch entstehende Speichervolumen dient als verzögerndes Element für den Zutritt von Lösungen im Gesamtsystem der Barrieren. In (Bollingerfehr et al. 2018) hat sich dieses Speichervolumen

## Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung



| Projekt | PSP-Element | Funktion/Thema | Komponente | Baugruppe | Aufgabe | UA | Lfd.-Nr. | Rev |
|---------|-------------|----------------|------------|-----------|---------|----|----------|-----|
| NAAN    | NNNNNNNNNN  | NNAAANN        | AANNNA     | AANN      | AAAA    | AA | NNNN     | NN  |
| SG      | 0330        |                |            |           | EA      | TF | 0002     | 00  |

Blatt: 162

### Wirtsgesteinsspezifische Verschluss- und Versatzmaßnahmen in Steinsalz in steiler Lagerung

als sensitiv für die Ergebnisse der Sicherheitsuntersuchungen herausgestellt. Je größer dieses Speichervolumen ausfällt, desto später erreicht einströmendes Grundwasser die Endlagergebäude. Dies verzögert letztendlich auch den Radionuklidaustrag aus dem Einlagerungsbereich.

Ein Schachtverschluss in steil lagerndem Steinsalz besteht im Wesentlichen aus den Funktionselementen

- Dichtelemente
- Widerlager
- Filterschichten

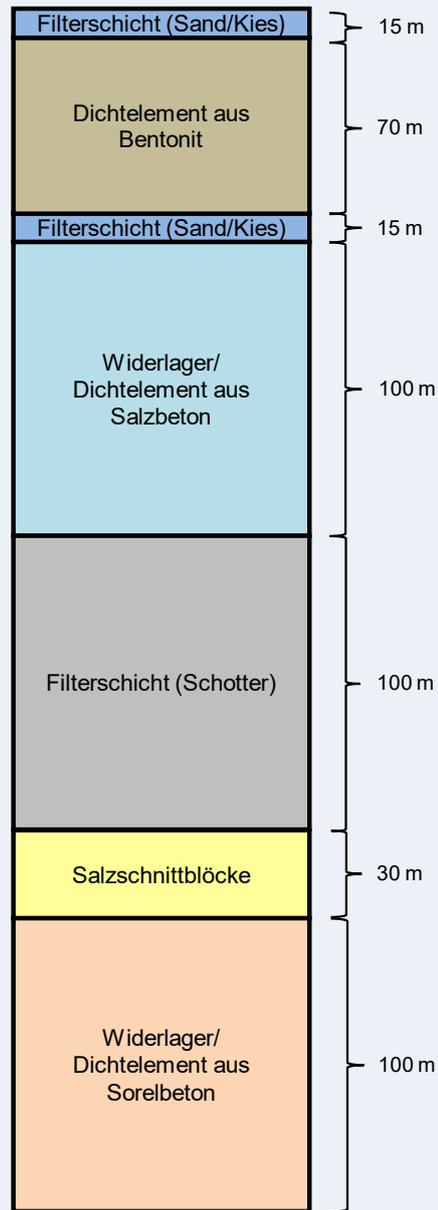
Verschiedene Materialien können dabei mehrfache Funktionen übernehmen. Abbildung 34 zeigt beispielhaft einen Schachtverschluss für ein Endlager in Steinsalz in steiler Lagerung aus (Bertrams et al. 2020a):

**Methodenbeschreibung zur Durchführung  
der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen  
gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung**

| Projekt | PSP-Element | Funktion/Thema | Komponente | Baugruppe | Aufgabe | UA | Lfd.-Nr. | Rev |
|---------|-------------|----------------|------------|-----------|---------|----|----------|-----|
| NAAN    | NNNNNNNNNN  | NNAAANN        | AANNNA     | AANN      | AAAA    | AA | NNNN     | NN  |
| SG      | 0330        |                |            |           | EA      | TF | 0002     | 00  |

Blatt: 163

**Wirtsgesteinsspezifische Verschluss- und Versatzmaßnahmen in Steinsalz in steiler Lagerung**



**Abbildung 34:** Beispiel eines Schachtverschlusses für ein Endlager in Steinsalz in steiler Lagerung (Bertrams et al. 2020a)

## Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung



| Projekt | PSP-Element | Funktion/Thema | Komponente | Baugruppe | Aufgabe | UA | Lfd.-Nr. | Rev |
|---------|-------------|----------------|------------|-----------|---------|----|----------|-----|
| NAAN    | NNNNNNNNNN  | NNAAANN        | AANNNA     | AANN      | AAAA    | AA | NNNN     | NN  |
| SG      | 0330        |                |            |           | EA      | TF | 0002     | 00  |

Blatt: 164

### 4.2.6.7 Mögliche Maßnahmen zur Geringhaltung der Schädigung der wesentlichen Barrieren

Die vorläufige Endlagerauslegung hat nach § 6 Abs. 4 Nr. 6 EndlSiUntV unter anderem „*mögliche Maßnahmen zur Geringhaltung der Schädigung der wesentlichen Barrieren während der Erkundung, der Errichtung, dem Betrieb und der Stilllegung des Endlagers*“ zu enthalten. Die Bearbeitung folgt der Definition der wesentlichen Barrieren gemäß Kapitel 4.1. Da der Einschluss innerhalb der wesentlichen Barrieren so erfolgen soll, dass die Radionuklide aus den radioaktiven Abfällen weitestgehend am Ort ihrer ursprünglichen Einlagerung verbleiben (§ 4 Abs. 4 EndlSiAnfV), ist der Schutz der wesentlichen Barriere vor einer Schädigung im Rahmen einer der genannten Betrachtungszeiträume (Erkundung, Errichtung, Betrieb und Stilllegung) eine wichtige Vorgabe. Die Funktion als wesentliche Barrieren für den sicheren Einschluss kann nach § 4 Abs. 3 EndlSiAnfV entweder von einem oder mehreren einschlusswirksamen Gebirgsbereichen bzw. von einem Wirtsgesteinsbereich mit Barrierefunktion (Endlagersystem Typ 1), oder aber für den Fall des Wirtsgesteins Kristallingestein, sofern kein einschlusswirksamer Gebirgsbereich ausgewiesen werden kann, von technischen und geotechnischen Barrieren (Endlagersystem Typ 2) erfüllt werden.

Die Betrachtungszeiträume, für die die Maßnahmen zur Geringhaltung der Schädigung der wesentlichen Barriere ermittelt werden sollen, werden im Folgenden näher beschrieben. Nach § 9 Abs. 1 EndlSiAnfV ist das Ziel der Erkundung, die Erhebung von sicherheitsrelevanten Daten über die Eigenschaften des Standortes. Nach § 15 Abs. 1 EndlSiAnfV umfasst die Errichtung eines Endlagers „*alle Auffahrungen sowie die weiteren über- und untertägigen baulichen und technischen Maßnahmen, durch die das Endlager so vorbereitet wird, dass anschließend die Einlagerung von radioaktiven Abfällen erfolgen kann*“. Es folgt der Probetrieb nach § 16 EndlSiAnfV und anschließend der Einlagerungsbetrieb. Während des Betriebs werden weitere Hohlräume im Einlagerungsbereich aufgeföhren, Endlagergebände eingelagert und bereits gefüllte Bereiche des Einlagerungsbereichs verfüllt und gegebenenfalls gegenüber dem Endlagerbergwerk verschlossen. Der Probe- und Einlagerungsbetrieb werden für die Betrachtung möglicher Maßnahmen als Betrieb zusammengefasst. Ist die Einlagerung der Abfallgebände abgeschlossen, erfolgt die Stilllegung des Endlagers mit dem Ziel, „*dass das Endlagersystem den sicheren Einschluss der radioaktiven Abfälle nach § 4 während des Bewertungszeitraumes passiv und wartungsfrei gewährleistet*“ (§ 19 Abs. 1 EndlSiAnfV).

Die im Folgenden erläuterte Methodik gibt eine Übersicht, wie die möglichen Maßnahmen für die genannten Betrachtungszeiträume in einer ortsunabhängigen Sammlung für alle Wirtsgesteinstypen zusammengetragen werden. Ziel ist es dabei – unter Berücksichtigung des eingeschränkten Kenntnisstandes in einer solch frühen Phase des Standortauswahlverfahrens – eine möglichst umfassende Abdeckung der Maßnahmen zu erzielen.

In einem ersten Schritt werden Maßnahmengruppen zur Geringhaltung der Schädigung der wesentlichen Barrieren aus den Anforderungen der EndlSiAnfV abgeleitet. Eine Maßnahmengruppe beschreibt einen wesentlichen Schutzmechanismus, mit dem die Geringhaltung der Schädigung der wesentlichen Barrieren gewährleistet werden soll. Die Maßnahmengruppen enthalten Maßnahmen, die auf Grundlage dieser Schutzziele die Schädigung der wesentlichen Barrieren geringhalten sollen. In Tabelle 15 werden die Maßnahmengruppen entsprechend ihrer Relevanz den in § 6 Abs. 4

## Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung



| Projekt | PSP-Element | Funktion/Thema | Komponente | Baugruppe | Aufgabe | UA | Lfd.-Nr. | Rev |
|---------|-------------|----------------|------------|-----------|---------|----|----------|-----|
| NAAN    | NNNNNNNNNN  | NNAAANN        | AANNNA     | AANN      | AAAA    | AA | NNNN     | NN  |
| SG      | 0330        |                |            |           | EA      | TF | 0002     | 00  |

Blatt: 165

Nr. 6 EndlSiUntV genannten Betrachtungszeiträumen (Erkundung, Errichtung, Betrieb und Stilllegung) zugeordnet. Dabei wird der Zeitraum der Erkundung in die übertägige Erkundung der Phase II der Standortauswahl nach § 16 StandAG und in die untertägige Erkundung der Phase III nach § 18 StandAG untergliedert, da sich durch die unterschiedlichen Erkundungsmethoden der beiden Phasen unterschiedliche Anforderungen bzw. Maßnahmen zur Geringhaltung der Schädigung der wesentlichen Barrieren ergeben. Für die wesentlichen Barrieren der beiden Endlagersysteme (Typ 1 und 2) werden unterschiedliche Maßnahmengruppen formuliert. Außerdem werden die Maßnahmengruppen „Hohlraumvermeidung, Hohlraumminimierung, Minimierung der Offenhaltungsdauer, gebirgsschonendes Auffahren und gebirgsschonender Betrieb sowie Hohlraumverfüllung und Hohlraumverschluss“ noch einmal zu der übergeordneten Maßnahmengruppe „Geringhaltung der mechanischen Schädigung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs bzw. Wirtsgesteinsbereich mit Barrierefunktion“ zusammengefasst. Eine umfassende Beschreibung der Maßnahmengruppen folgt in Beispiel 16. Die Bewertung der Relevanz einer Maßnahmengruppe in einer der genannten Betrachtungszeiträume erfolgt in drei Stufen. Ist eine Maßnahmengruppe für den entsprechenden Zeitraum nicht relevant, wird dies durch das Symbol „-“ gekennzeichnet. Sind eine oder mehrere Maßnahmen der Maßnahmengruppen für den Betrachtungszeitraum relevant, wird dies mit einem „x“ dargestellt. Sind die Maßnahmen einer Maßnahmengruppe nur in bestimmten Fällen oder bei bestimmten Konfigurationen des Endlagersystems im Betrachtungszeitraum relevant, wird dies als bedingt relevant bezeichnet und mit einem „(x)“ gekennzeichnet.

Anschließend werden für jede Maßnahmengruppe die Maßnahmen und ihre Relevanz während der Betrachtungszeiträume aufgeführt (siehe Beispiel 16). Externe Prozesse, wie der Transport der leeren Endlagerbehälter zum Endlagerstandort, oder qualitätssichernde Prozesse, wie der Verschluss von Endlagergebänden, werden hier nicht betrachtet.

Für die Erhebung möglicher Maßnahmen zur Geringhaltung der Schädigungen der wesentlichen Barrieren für einen spezifischen Untersuchungsraum bzw. Teiluntersuchungsraum werden in Abhängigkeit von Wirtsgestein und Endlagerkonzept einzelne Maßnahmen aus der Sammlung extrahiert und für den konkreten Fall präzisiert. Die Maßnahmen werden dabei entsprechend ihrer Relevanz nach den Betrachtungszeiträumen gegliedert.



## Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung



| Projekt | PSP-Element | Funktion/Thema | Komponente | Baugruppe | Aufgabe | UA | Lfd.-Nr. | Rev |
|---------|-------------|----------------|------------|-----------|---------|----|----------|-----|
| NAAN    | NNNNNNNNNN  | NNAAANN        | AANNNA     | AANN      | AAAA    | AA | NNNN     | NN  |
| SG      | 0330        |                |            |           | EA      | TF | 0002     | 00  |

Blatt: 167

**Beispiel 16:** Ortsübergreifende Sammlung - Maßnahmen zur Geringhaltung der Schädigungen der wesentlichen Barrieren

### Ortsübergreifende Sammlung – Maßnahmen zur Geringhaltung der Schädigung der wesentlichen Barrieren

In diesem Beispiel werden die Maßnahmengruppen aus Tabelle 15 erläutert und den Gruppen in Form einer ortsübergreifenden Sammlung entsprechend der beschriebenen Methodik einzelnen Maßnahmen zugeordnet.

#### Hohlraumvermeidung

Die Maßnahmengruppe der Hohlraumvermeidung leitet sich aus den Vorgaben aus § 11 Abs. 4 EndlSiAnfV ab:

*„Die Verletzung des Gebirges im Endlagerbereich, und im Fall des § 4 Absatz 3 Nummer 1 insbesondere des vorgesehenen einschlusswirksamen Gebirgsbereichs, mit Schächten, Auffahrungen oder Bohrungen ist auf das für die sichere Errichtung, den sicheren Betrieb und die sichere Stilllegung des Endlagers unvermeidliche Ausmaß zu beschränken.“*

Die Maßnahmengruppe beinhaltet Maßnahmen, die die Schädigung der wesentlichen Barrieren des Endlagersystems Typ 1 reduzieren, indem das Auffahren von Hohlräumen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich bzw. im Wirtsgesteinsbereich mit Barrierefunktion auf das minimal notwendige Maß reduziert wird. Hohlräume bilden potenzielle Wegsamkeiten im Bereich des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs bzw. des potenziellen Einlagerungsbereichs. Außerdem kommt es beim Auffahren der Hohlräume zur Ausbildung von Auflockerungszonen im Gebirge, die die Einschlusswirksamkeit des Wirtsgesteins herabsetzen können. Das Auffahren und Offenhalten von Hohlräumen stellt eine Störung des hydraulischen und geomechanischen Gleichgewichts im Gebirge dar. Hohlräume im Bereich des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs bzw. im Einlagerungsbereich sind daher nach Möglichkeit zu vermeiden. Im Folgenden werden die Maßnahmen genannt, erläutert und die Bewertungszeiträume erläutert, in denen die Maßnahme eine Relevanz besitzt.

Um eine ausreichende Kenntnis über die lokale Geologie und das Wirtsgestein im Besonderen im Rahmen der Erkundung zu erlangen, sind zerstörungsfreie Erkundungsmethoden vorzuziehen. Dies gilt im Besonderen, wenn ein einschlusswirksamer Gebirgsbereich als wesentliche Barriere herangezogen wird. Dies ist für den Erkenntnisgewinn jedoch nicht immer ausreichend, weshalb auch zerstörende Erkundungsmethoden verwendet werden müssen. Vor jedem Einsatz einer solchen gebirgszerstörenden Erkundungsmethode ist abzuwägen, ob der Erkenntnisgewinn durch diese Maßnahme die verursachte Schädigung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs rechtfertigt. Eine Relevanz besitzen diese Maßnahmen während der Erkundungen in Phase II und III sowie während der Errichtung und dem Betrieb des Endlagers.

## Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung



| Projekt | PSP-Element | Funktion/Thema | Komponente | Baugruppe | Aufgabe | UA | Lfd.-Nr. | Rev |
|---------|-------------|----------------|------------|-----------|---------|----|----------|-----|
| NAAN    | NNNNNNNNNN  | NNAAANN        | AANNNA     | AANN      | AAAA    | AA | NNNN     | NN  |
| SG      | 0330        |                |            |           | EA      | TF | 0002     | 00  |

Blatt: 168

### Ortsübergreifende Sammlung – Maßnahmen zur Geringhaltung der Schädigung der wesentlichen Barrieren

Erkundungsbohrungen in das Wirtsgestein sollten nach Möglichkeit nicht bzw. im minimal möglichen Umfang in den potenziellen Bereich des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs abgeteuft werden, um die Schädigung der wesentlichen Barriere und die Schaffung von primären Fließwegen zu vermeiden. Eine Relevanz besitzt diese Maßnahme besonders in der Phase der Standorterkundung, wenn eine übertägige Erkundung stattfindet, ist jedoch auch zu späteren Zeitpunkten bei der Abteufung bzw. Erstellen jeder Bohrung zu beachten.

Eine Erkundung des potenziellen einschlusswirksamen Gebirgsbereichs kann in der Phase II untertägig ausgehend von einem Tageszugang erfolgen oder mit Hilfe abgelenkter Horizontalbohrungen aus Vertikalbohrungen, die im Bereich potenzieller Lokationen von zukünftigen Tageszugängen abgeteuft werden. Dies reduziert die Anzahl der Hohlräume im einschlusswirksamen Gebirgsbereich und die Anzahl von potenziellen Wegsamkeiten in den einschlusswirksamen Gebirgsbereich bzw. Wirtsgesteinsbereich mit Barrierefunktion. Hierbei sind die minimal möglichen Kurvenradien der abgelenkten Bohrungen anzustreben, um eine zusätzliche Schädigung der wesentlichen Barriere zu verringern. Werden die Bohrungen nicht im Bereich potenzieller Tageszugänge abgeteuft, kann durch das Abteufen mehrerer horizontaler Bohrungen aus einer vertikalen Bohrung zwar die Anzahl der Bohrungen verringert werden, es ist jedoch zu berücksichtigen, dass es zur Ausbildung vernetzter Wegsamkeiten im Wirtsgestein kommen kann, die anschließend qualitätsgerecht zu verschließen sind. Die Horizontalbohrungen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich bzw. Wirtsgesteinsbereich mit Barrierefunktion sollten dabei möglichst entlang potenzieller Strecken gestoßen werden, da so eine zusätzliche Schaffung von Hohlräumen vermieden wird. Diese Maßnahme besitzt eine Relevanz während der beiden Erkundungsphasen und während der Errichtung des Endlagers.

Die vorgenannten Maßnahmen erfordern eine möglichst detaillierte Kenntnis der Größe und der Raumlage des zukünftigen einschlusswirksamen Gebirgsbereichs bzw. des Wirtsgesteinsbereichs mit Barrierefunktion und der möglichen Tageszugänge. Aus diesem Grund sind die Erkenntnisse der vorläufigen Endlagerauslegungen, der rvSU der Phase I und der weiterführenden vorläufigen Sicherheitsuntersuchung der Phase II des Standortauswahlverfahrens in den jeweils folgenden Erkundungsphasen zu berücksichtigen. In Abhängigkeit vom Fortschritt der Erkundung kann so eine Abschätzung über die Lage des Bereichs getroffen werden, in dem nach Möglichkeit keine Schädigung erfolgen soll, während außerhalb dieses Bereiches Informationen über das Wirtsgestein durch Bohrungen gesammelt werden können. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die vorläufige Endlagerauslegung aufgrund des geringen Kenntnisstandes zum Standort die spätere Größe und Lage des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs speziell in Phase I nur eingeschränkt prognostizieren kann. Eine Relevanz besitzt diese Maßnahme während beider Erkundungsphasen und der Errichtung des Endlagers.

Um die Wirksamkeit von Streckenverschlüssen zu erhalten, sollte es nach Möglichkeit vermieden werden, in Bereiche potenzieller Verschlusslokationen Bohrungen von Übertage in den

# Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung



| Projekt | PSP-Element | Funktion/Thema | Komponente | Baugruppe | Aufgabe | UA | Lfd.-Nr. | Rev |
|---------|-------------|----------------|------------|-----------|---------|----|----------|-----|
| NAAN    | NNNNNNNNNN  | NNAAANN        | AANNNA     | AANN      | AAAA    | AA | NNNN     | NN  |
| SG      | 0330        |                |            |           | EA      | TF | 0002     | 00  |

Blatt: 169

## Ortsübergreifende Sammlung – Maßnahmen zur Geringhaltung der Schädigung der wesentlichen Barrieren

einschlusswirksamen Gebirgsbereich abzuteufen, die nicht dem Verlauf der potenziellen zukünftigen Strecke folgen, sondern diese in einem anderen Winkel durchhörtern. Generell sollten auch untertägig erstellte Bohrungen ausgehend von Strecken im Bereich potenzieller Verschlusslokalisationen vermieden werden. Eine Relevanz besitzt diese Maßnahme während beider Erkundungsphasen.

Um die Anzahl an Bohrungen zu reduzieren, können bohrlochgeophysikalische Methoden, wie die Bohrlochseismik, herangezogen werden, die eine genauere Erkundung des Wirtsgesteins um das Bohrloch ermöglichen und so eventuell weitere Bohrungen nicht notwendig sind. Eine Relevanz besitzt diese Maßnahme während beider Erkundungsphasen sowie bei der Errichtung und dem Betrieb des Endlagers.

Auch bei der Anwendung von Monitoringmaßnahmen ist immer die Schädigung der wesentlichen Barrieren (einschlusswirksamer Gebirgsbereich und geotechnische Barrieren) gegen den Erkenntnisgewinn durch die Monitoringmaßnahme abzuwägen. Hier ist zu klären, ob für ein Monitoring Hohlräume innerhalb des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs aufgefahren werden sollten und ob diese Bohrungen auch nach der Stilllegung des Endlagers weitergenutzt werden können. Da nach der Begründung zu § 9 Abs. 3 EndlSiUntV

*„[...] spätestens bei der Stilllegung des Endlagers alle tatsächlich vorhandenen Hohlräume sachgerecht verschlossen [...]“*

sein sollen, ist zu klären, ob ein Verschluss der Bohrungen, die Technik zur Informationsübermittlung und somit potenzielle Wegsamkeiten enthalten, als qualitätsgerechter Hohlraumverschluss betrachtet werden kann.

Zusammenfassend werden die möglichen Maßnahmen der Maßnahmengruppe Hohlraumvermeidung aufgezählt:

- Zerstörungsfreie Erkundungsverfahren
- Abwägung des möglichen Erkenntnisgewinns gebirgszerstörender Erkundungsmaßnahmen gegenüber einer möglichen Beeinträchtigung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs bei Erkundung
- Erkundungsbohrungen möglichst außerhalb des potenziellen einschlusswirksamen Gebirgsbereichs
- Erkundung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs mit Horizontalbohrungen ausgehend von Schächten oder mit abgelenkten Bohrungen im Bereich potenzieller Schächte

# Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung



| Projekt | PSP-Element | Funktion/Thema | Komponente | Baugruppe | Aufgabe | UA | Lfd.-Nr. | Rev |
|---------|-------------|----------------|------------|-----------|---------|----|----------|-----|
| NAAN    | NNNNNNNNNN  | NNAAANN        | AANNNA     | AANN      | AAAA    | AA | NNNN     | NN  |
| SG      | 0330        |                |            |           | EA      | TF | 0002     | 00  |

Blatt: 170

## Ortsübergreifende Sammlung – Maßnahmen zur Geringhaltung der Schädigung der wesentlichen Barrieren

- Erstellen von Horizontalbohrungen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich entlang potenzieller Strecken
- Bohrlochgeophysikalische Erkundungsmethoden
- Berücksichtigung der Erkenntnisse aus der vorläufigen Endlagerauslegung zur potenziellen Raumlage und Größe des Endlagers bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs im Wirtsgestein
- Erkundungsbohrungen möglichst außerhalb von potenziellen Standorten von Streckenverschlüssen
- Abwägung des möglichen Erkenntnisgewinns von Monitoringmaßnahmen gegenüber einer möglichen Beeinträchtigung der wesentlichen Barrieren

## Hohlraumminimierung

Ist eine Vermeidung der Hohlräume nicht möglich, sollte das aufgefahrene Hohlraumvolumen möglichst minimiert werden, um die Schädigung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs als wesentliche Barriere möglichst gering zu halten. Als Begründung für die Maßnahmengruppe wird erneut § 11 Abs. 4 EndlSiAnfV herangezogen. Zusätzlich besagt § 18 Abs. 2 EndlSiAnfV, dass „*der für die Einlagerung von radioaktiven Abfällen genutzte Bereich des Endlagerbergwerkes [...] auf das notwendige Maß zu beschränken*“ ist.

Die Maßnahmen dieser Maßnahmengruppe werden im Folgenden genannt, erläutert und die Bewertungszeiträume genannt, in denen die Maßnahme eine Relevanz besitzt.

Die Durchmesser von Erkundungsbohrungen sind auf das Minimum zu begrenzen. Dabei sind die Realisierung eines Bohrlochausbaus, der Durchmesser von eventuell verwendeter Bohrlochmesstechnik und der Mindestdurchmesser von Kernbohrproben für die laborative Bestimmung von Gesteinsparametern zu berücksichtigen. Eine Relevanz besitzt diese Maßnahme während beider Erkundungsphasen und der Errichtung des Endlagers.

Die untertägige Erkundung in Phase III des Standortauswahlverfahrens sollte in gleicher Tiefenlage wie die spätere Endlagerung erfolgen. So können zusätzliche Hohlräume im einschlusswirksamen Gebirgsbereich bzw. im Wirtsgesteinsbereich mit Barrierefunktion oberhalb oder unterhalb des Einlagerungsbereichs vermieden werden. Zudem ist eine Weiternutzung dieser Hohlräume beispielsweise in Form von Infrastrukturbereichen und Richtstrecken denkbar.

Sowohl bei der Erkundung in Phase II und III als auch bei Auffahrung von Strecken bei der Errichtung und beim Betrieb des Endlagers ist unter Berücksichtigung weiterer Faktoren, wie beispielsweise dem Ausbau der Hohlräume und der Einlagerungstechnik, der Streckenquer-

## Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung



| Projekt | PSP-Element | Funktion/Thema | Komponente | Baugruppe | Aufgabe | UA | Lfd.-Nr. | Rev |
|---------|-------------|----------------|------------|-----------|---------|----|----------|-----|
| NAAN    | NNNNNNNNNN  | NNAAANN        | AANNNA     | AANN      | AAAA    | AA | NNNN     | NN  |
| SG      | 0330        |                |            |           | EA      | TF | 0002     | 00  |

Blatt: 171

### Ortsübergreifende Sammlung – Maßnahmen zur Geringhaltung der Schädigung der wesentlichen Barrieren

schnitt möglichst gering zu halten, um eine Schädigung der wesentlichen Barriere zu minimieren. Aus diesem Grund sind auch gebirgsschonende und platzsparende Querschnittsformen zu wählen. Für den Opalinuston wählt z. B. die Nagra (2009) daher einen kreisrunden bzw. annähernd kreisrunden Hohlraumquerschnitt.

Nach § 15 Abs. 5 EndlSiAnfV sind mit Beginn des Endlagerbetriebs technische Lösungen für die mögliche Rückholung von Endlagergebinden vorzuhalten. Gleiches gilt nach § 18 Abs. 4 EndlSiAnfV für den kurzfristigen Verschluss des Endlagers. Es ist zu prüfen, in wie weit diese Vorhaltung Übertage erfolgen kann, um das Hohlraumvolumen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich bzw. Wirtsgesteinsbereich mit Barrierefunktion geringzuhalten. Alternativ sind Einlagerungstechniken zu entwickeln, die auch für die Rückholung der Gebinde verwendet werden können. Grundsätzlich ist bei der Auslegung des Infrastrukturbereichs eine Minimierung des Flächenbedarfs anzustreben. Diese Maßnahmen besitzen während des Betriebs und der Stilllegung des Endlagers Relevanz.

Aus dem Ziel der Langzeitsicherheit des Endlagers ergeben sich eine Reihe von Anforderungen, die Einfluss auf die Teufe des Endlagers haben können und nicht Teil dieser Betrachtung sind. Aus der Forderung zur Geringhaltung der Schädigung der wesentlichen Barriere ergeben sich zusätzliche Empfehlungen an die Teufe des Endlagers. Durch die Wahl einer geringeren Endlagerteufe kann beispielsweise der Flächenbedarf des Endlagers je nach Wirtsgestein und damit die Durchörterung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs deutlich verringert werden (siehe Kapitel 4.2.6.9). Der mit zunehmender Teufe steigende Gebirgsdruck macht z. B. in Tongestein wie Opalinuston zusätzliche Ausbausysteme notwendig, um eine Schädigung des Gebirges zu reduzieren. Dies gilt es während der Endlagerauslegung und damit bei der Errichtung zu berücksichtigen. Mit einer zunehmenden Teufe steigt auch die Komplexität einer Grubenbewetterung an. Durch die Wahl einer geringeren Einlagerungsteufe und durch weitere Maßnahmen zur Optimierung der Wetterführung kann möglicherweise die Anzahl der Tageszugänge reduziert werden. Diese Maßnahmen gilt es während der Endlagerauslegung und damit bei der Errichtung des Endlagers zu berücksichtigen.

Neben der Teufe beeinflusst eine weitere Größe wesentlich den Flächenbedarf und somit das aufzufahrende Hohlraumvolumen. Durch eine Erhöhung der zulässigen Grenztemperatur an der Oberfläche des Endlagergebindes ist eine Verringerung des Flächenbedarfs möglich. Die Höhe der zu wählenden Grenztemperatur ist abhängig vom Wirtsgestein und dem verwendeten Material der geotechnischen Barrieren. Da eine Festlegung der zulässigen Grenztemperatur erst zum Ende des zweiten Schritts der Phase I erfolgen soll, findet eine solche Maßnahme keine Anwendung im Rahmen der rvSU.

## Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung



| Projekt | PSP-Element | Funktion/Thema | Komponente | Baugruppe | Aufgabe | UA | Lfd.-Nr. | Rev |
|---------|-------------|----------------|------------|-----------|---------|----|----------|-----|
| NAAN    | NNNNNNNNNN  | NNAAANN        | AANNNA     | AANN      | AAAA    | AA | NNNN     | NN  |
| SG      | 0330        |                |            |           | EA      | TF | 0002     | 00  |

Blatt: 172

### Ortsübergreifende Sammlung – Maßnahmen zur Geringhaltung der Schädigung der wesentlichen Barrieren

Zusammenfassend werden die möglichen Maßnahmen der Maßnahmengruppe Hohlraumminimierung aufgezählt:

- Minimierung des Durchmessers von Erkundungsbohrungen
- Erkundung in gleicher Tiefenlage wie Endlagerung
- Minimierung Hohlraumquerschnitt und Verwendung günstiger Querschnittsformen für Strecken
- Rückhol- und Verschlusstechnik möglichst Übertage vorhalten
- Minimierung des Flächenbedarfs der Infrastrukturräume
- Wahl möglichst geringer Endlagerteufen
- Optimierung der Wetterführung

### Minimierung Offenhaltungsdauer

Die Maßnahmengruppe der Minimierung der Offenhaltungsdauer leitet sich aus den Vorgaben der EndlSiAnfV ab:

*„Die Arbeiten sind so zügig durchzuführen, wie dies unter Gewährleistung der erforderlichen Sicherheit möglich ist.“* (§ 9 Abs. 4 EndlSiAnfV)

und

*„Der für die Einlagerung von radioaktiven Abfällen genutzte Bereich des Endlagerbergwerkes ist auf das notwendige Maß zu beschränken. Dieser Bereich ist jeweils zügig aufzufahren, zu beladen, zu verfüllen und gemäß dem Verschlusskonzept gegen das restliche Endlagerbergwerk zu verschließen.“* (§ 18 Abs. 2 EndlSiAnfV)

Ähnliche Vorgaben werden von Nagra (2009) formuliert. Ziel muss es sein, aufgefahrne Hohlräume möglichst kurz offenzuhalten. Dabei ist bei Richtstrecken eine Offenhaltung bis zur Stilllegung des Endlagers zwecks einer möglichen Rückholung von Endlagergebinden nach § 1 Abs. 4 StandAG vorzusehen. Durch das Auffahren der Hohlräume im Gestein kommt es zu einer Veränderung des Gebirgsspannungszustands, was zu einer Spannungserhöhung im Gebirge führt. Die daraus evtl. resultierenden Schädigungen und Verformungsprozesse sind zeitabhängige Prozesse. Eine Verkürzung der Offenhaltungsdauer führt daher zu einer Begrenzung des Zeitraums, in dem Schädigungsprozesse erfolgen können. Die Maßnahmen dieser Maßnahmengruppe werden im Folgenden genannt, erläutert und die Bewertungszeiträume genannt, in denen die Maßnahme eine Relevanz besitzt.

Die Auffahrung der Einlagerungsstrecke und die Einlagerung der Endlagergebände sollten möglichst in parallelen Arbeitsschritten erfolgen, damit die Strecken so kurz wie möglich aber

# Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung



| Projekt | PSP-Element | Funktion/Thema | Komponente | Baugruppe | Aufgabe | UA | Lfd.-Nr. | Rev |
|---------|-------------|----------------|------------|-----------|---------|----|----------|-----|
| NAAN    | NNNNNNNNNN  | NNAAANN        | AANNNA     | AANN      | AAAA    | AA | NNNN     | NN  |
| SG      | 0330        |                |            |           | EA      | TF | 0002     | 00  |

Blatt: 173

## Ortsübergreifende Sammlung – Maßnahmen zur Geringhaltung der Schädigung der wesentlichen Barrieren

so lang wie nötig offengehalten werden. Dabei sind jedoch die Vorgaben von § 18 Abs. 3 EndlSiAnfV zu berücksichtigen, dass „Die Handhabung von Endlagergebinden [...] von den bergmännischen Arbeiten im Endlagerbergwerk [...] zu trennen.“ ist. Um diese Trennung zu gewährleisten, sind mehrere Möglichkeiten denkbar. Das in Kapitel 4.2.6.1 dargestellte grundsätzliche Layout des Endlagers für das Endlagersystem Typ 1 sieht hierzu eine Trennung des Endlagers in einen Überwachungsbereich und einen Kontrollbereich nach § 52 StrlSchV vor. Während von der Richtstrecke des Überwachungsbereichs bereits ein neues Endlagerfeld aufgefahren wird, werden von der Richtstrecke des Kontrollbereichs aus Gebinde in ein kurz zuvor fertiggestelltes Endlagerfeld eingelagert. Die Arbeiten erfolgen dabei vom Punkt, der am weitesten von den Tageszugängen entfernt ist, hin zu den Tageszugängen. Alternativ können mobile Strahlenschutzwände zur Trennung der beiden Bereiche verwendet werden. Die Verwendung eines abgeschirmten Behälters würde die Trennung der Strahlenschutzbereiche grundsätzlich erleichtern. Zu diskutieren ist zudem die Nutzung von ferngesteuerter bzw. automatisierter Auffahr- und Einlagerungstechnik, da so der räumliche Abstand und somit auch die zeitliche Differenz zwischen den Prozessen des Hohlraumauffahrens und des Einlagerns der Abfälle verringert werden könnte. Diese Maßnahmen sind während des Endlagerbetriebs relevant.

Durch die zeitgerechte Bereitstellung der Abfallgebinde kann die Offenhaltungsdauer von Einlagerungsstrecke zusätzlich verringert werden. Hierzu sind entsprechende interne (z. B. Transport der Gebinde und Pufferlagerung) und externe (z. B. Anlieferung der Transport- und (Zwischen-)Lagerbehälter (TLB) und der Endlagergebinde zum Standort) Prozesse zu optimieren und Betriebsstörungen zu vermeiden.

Einlagerungsstrecken und Querschläge sind unmittelbar nach der Einlagerung qualitätsgerecht zu verfüllen und zu verschließen. Gleiches gilt für Hohlräume zur untertägigen Erkundung, die im späteren Endlager keine Weiternutzung erfahren und für Bohrungen in den einschlusswirksamen Gebirgsbereich.

Zusammenfassend werden die möglichen Maßnahmen der Maßnahmengruppe Minimierung Offenhaltungsdauer aufgezählt:

- Auffahrung und Einlagerung möglichst parallel
- Unmittelbare qualitätsgerechte Verfüllung und Verschluss von befüllten Einlagerungsstrecken und zugehörigen Querschlägen
- Zeitnah qualitätsgerechtes Verfüllen und Verschließen von Hohlräumen zur untertägigen Erkundung
- Zeitnah qualitätsgerechter Verschluss von Bohrungen

## Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung



| Projekt | PSP-Element | Funktion/Thema | Komponente | Baugruppe | Aufgabe | UA | Lfd.-Nr. | Rev |
|---------|-------------|----------------|------------|-----------|---------|----|----------|-----|
| NAAN    | NNNNNNNNNN  | NNAAANN        | AANNNA     | AANN      | AAAA    | AA | NNNN     | NN  |
| SG      | 0330        |                |            |           | EA      | TF | 0002     | 00  |

Blatt: 174

### Ortsübergreifende Sammlung – Maßnahmen zur Geringhaltung der Schädigung der wesentlichen Barrieren

- Zeitgerechte Bereitstellung der Abfallgebinde zur Einlagerung

#### Gebirgsschonendes Auffahren und Betrieb

Die Maßnahmengruppe des gebirgsschonenden Auffahrens leitet sich aus § 9 Abs. 2 EndlSi-AnfV ab:

*„Alle untertägigen Hohlräume sind gebirgsschonend aufzufahren und nach Gebrauch so zu verschließen, dass die für den sicheren Einschluss der radioaktiven Abfälle relevanten Eigenschaften des Gebirges im Endlagerbereich, insbesondere des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs im Fall des § 4 Absatz 3 Nummer 1, erhalten bleiben.“*

Die Maßnahmen dieser Maßnahmengruppe werden im Folgenden genannt, erläutert und die Bewertungszeiträume genannt, in denen die Maßnahme eine Relevanz besitzt.

Beim Abteufen der Bohrungen soll die Ausbildung ausgeprägter Auflockerungszonen (ALZ) in der wesentlichen Barriere minimiert werden. Zu diesem Zweck sollen gebirgsschonende Bohrvorgänge zum Einsatz kommen. Die Maßnahme ist während beider Erkundungsphasen und während der Errichtung des Endlagers relevant. Um die Ausbildung der ALZ im einschlusswirksamen Gebirgsbereich bzw. Wirtsgesteinsbereich mit Barrierefunktion auf den Konturbereich der Strecke bzw. der Tageszugänge zu beschränken, sollen gebirgsschonende Auffahrmethoden zum Einsatz kommen. Die Methoden sind entsprechend des Wirtsgesteins und der Art des aufgefahrenen Hohlraums zu wählen. So werden im Salz und in Tongesteinen meist Teilschnittmaschinen verwendet, während für das Kristallingestein nach Bertrams et al. (2017) das Kontursprengen zu nennen ist. Eine weitere Möglichkeit bieten im Kristallingestein nach Bertrams et al. (2017) Vollschnittmaschinen (Tunnelbohrer), die jedoch aufgrund weiter Kurvenradien nur für das Auffahren von Rampen und Richtstrecken geeignet sind. Diese Maßnahme ist relevant bei der Errichtung und dem Betrieb des Endlagers. Außerdem kann die Maßnahme im Fall einer untertägigen Erkundung in Form eines Bergwerkes bei der Erkundung in der Phase III eine Relevanz besitzen. Werden im Rahmen der Stilllegung Hohlräume für mögliche Verschlussbauwerke erweitert, kann die Maßnahme auch hier relevant sein.

Durch die Wahl geeigneter Ausbaumethoden und des günstigen Einbauzeitpunkts kann bei Bedarf die Ausbildung von Auflockerungszonen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich bzw. Gebirgsbereich mit Barrierefunktion verringert werden. Im Tongestein sollte ein stützender Ausbau in möglichst kurzen Abständen der Auffahrung folgen, um einer Entfestigung vorzubeugen. Gegebenenfalls sind sogar vorauseilende Vorpfändungsmaßnahmen vorzusehen. Diese Maßnahme hat während der Erkundung der Phase III des Standortauswahlverfahrens, der Errichtung und dem Betrieb des Endlagers eine Relevanz. Durch die Wahl einer geringeren Endlagerteufe wird die Machbarkeit eines starren, tragenden Ausbaus wahrscheinlicher.

# Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung



| Projekt | PSP-Element | Funktion/Thema | Komponente | Baugruppe | Aufgabe | UA | Lfd.-Nr. | Rev |
|---------|-------------|----------------|------------|-----------|---------|----|----------|-----|
| NAAN    | NNNNNNNNNN  | NNAAANN        | AANNNA     | AANN      | AAAA    | AA | NNNN     | NN  |
| SG      | 0330        |                |            |           | EA      | TF | 0002     | 00  |

Blatt: 175

## Ortsübergreifende Sammlung – Maßnahmen zur Geringhaltung der Schädigung der wesentlichen Barrieren

Dies ist abhängig vom Wirtsgestein und während der Errichtung, dem Betrieb und möglicherweise auch der untertägigen Erkundung in Phase III relevant.

Nach Nagra (2009) sollten Einlagerungsstollen im Opalinuston so angeordnet werden, dass ihre gegenseitige geomechanische Beeinflussung gering ist und sie normal zu möglichen Störungssystemen sowie in Richtung der maximalen horizontalen Hauptspannung ausgerichtet sind. Diese Maßnahme ist während der Endlagerauslegung, der Errichtung und dem Betrieb des Endlagers relevant.

Nach § 16 Abs. 2 Nr. 3 EndlSiAnfV ist beim Probebetrieb des Endlagers die Funktionsfähigkeit aller technischen Einrichtungen, die für eine mögliche Rückholung von eingelagerten Endlagergebänden erforderlich sind, darzustellen. Nach BT-Drs. 19/19291 kann dabei auf eine Erprobung des Rückhohlvorgangs vor Ort verzichtet werden, um eine Schädigung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs zu verhindern.

Um die Ausbildung und Ausweitung der ALZ zu minimieren sollte die Förder- und Transporttechnik so ausgelegt werden, dass eine möglichst geringe Erschütterung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs bzw. Gebirgsbereichs mit Barrierefunktion erfolgt.

Zusammenfassend werden die möglichen Maßnahmen der Maßnahmengruppe gebirgsschonendes Auffahren und Betrieb aufgezählt:

- Gebirgsschonende Bohrverfahren
- Gebirgsschonendes Auffahren von Hohlräumen:
- Wahl von Ausbaumethoden, die die Ausbildung von Auflockerungszonen geringhalten
- Berücksichtigung der Wirkung der Endlagerteufe auf Spannungszustände im Gebirge und Entfestigungsprozesse bei/nach Auffahrung
- Günstige Anordnung und Ausrichtung der Einlagerungsstollen
- Gebirgsschonender Probebetrieb
- Erschütterungsarme Förder- und Transporttechnik
- Vorbeugungs- und Abwehrmaßnahmen für Schadensfälle im Endlager

## Hohlraumverfüllung und -verschluss

Die Maßnahmengruppen Hohlraumverfüllung und Hohlraumverschluss werden in diesem Dokument gemeinsam betrachtet, da die Maßnahmen häufig äquivalent sind oder sich gegenseitig bedingen. Zu einem späteren Zeitpunkt im Verfahren wird jedoch eine getrennte Detailbetrachtung empfohlen. Beide Maßnahmengruppen leiten sich aus den Vorgaben der EndlSiAnfV ab:

## Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung



| Projekt | PSP-Element | Funktion/Thema | Komponente | Baugruppe | Aufgabe | UA | Lfd.-Nr. | Rev |
|---------|-------------|----------------|------------|-----------|---------|----|----------|-----|
| NAAN    | NNNNNNNNNN  | NNAAANN        | AANNNA     | AANN      | AAAA    | AA | NNNN     | NN  |
| SG      | 0330        |                |            |           | EA      | TF | 0002     | 00  |

Blatt: 176

### Ortsübergreifende Sammlung – Maßnahmen zur Geringhaltung der Schädigung der wesentlichen Barrieren

„Die Stilllegung des Endlagers umfasst insbesondere die möglichst vollständige Verfüllung aller untertägigen Hohlräume und ihren Verschluss sowie den Rückbau der die Langzeitsicherheit beeinträchtigenden technischen Einrichtungen.“ (§ 19 Abs. 2 EndlSiAnfV)

„Der für die Einlagerung von radioaktiven Abfällen genutzte Bereich des Endlagerbergwerkes ist auf das notwendige Maß zu beschränken. Dieser Bereich ist jeweils zügig aufzufahren, zu beladen, zu verfüllen und gemäß dem Verschlusskonzept gegen das restliche Endlagerbergwerk zu verschließen.“ (§ 18 Abs. 2 EndlSiAnfV)

und

„Alle untertägigen Hohlräume sind gebirgsschonend aufzufahren und nach Gebrauch so zu verschließen, dass die für den sicheren Einschluss der radioaktiven Abfälle relevanten Eigenschaften des Gebirges im Endlagerbereich, insbesondere des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs im Fall des § 4 Absatz 3 Nummer 1, erhalten bleiben.“ (§ 9 Abs. 2 EndlSiAnfV)

Die Maßnahmen dieser Maßnahmengruppe werden im Folgenden genannt, erläutert und die Bewertungszeiträume genannt, in denen die Maßnahme eine Relevanz besitzt. Mögliche Verschluss- und Versatzmaßnahmen werden umfassend in Kapitel 4.2.6.6 betrachtet. Dort erfolgt auch eine beispielhafte wirtsgesteins- und (teil-)untersuchungsraumspezifische Betrachtung der Maßnahmen.

Um eine weitere Schädigung des Gebirges in Folge offener Hohlräume zu vermeiden und die Entstehung von Fließwegen zu reduzieren, sind die erstellten Hohlräume und Bohrungen zeitnah qualitätsgerecht zu verfüllen und zu verschließen. Ziel der geotechnischen Barrieren ist es nach § 9 Abs. 2 EndlSiAnfV mit Hilfe dieser Maßnahmen die für den sicheren Einschluss relevanten Eigenschaft des Gebirges im einschlusswirksamen Gebirgsbereich zu erhalten. Sie sind damit die einzige Möglichkeit erfolgte Schädigungen der wesentlichen Barriere zu reduzieren. Die Verfüllung und der Verschluss erfolgt je nach Funktion und Erstellungszeitpunkt des Hohlräume oder der Bohrung im Zeitraum zwischen der Erkundung und der Stilllegung, spätestens jedoch während der Stilllegung des Endlagers. Die Verfüll- und Verschlussmaßnahmen orientieren sich am Endlagerkonzept und dem Wirtsgestein. Wie bereits zuvor erläutert, sollten die Verfüllung und der Verschluss befüllter Einlagerungsstrecken dabei unmittelbar nach der Einlagerung im jeweiligen Grubengebäudeteil erfolgen. Die Möglichkeit des qualitätsgerechten Verschlusses von Bohrungen ist zu prüfen. Dabei sind auch mögliche Monitoringmaßnahmen zu prüfen. Zum Verfüllen von Hohlräumen bietet sich die Verwendung von stützendem Versatz an.

Insofern eine negative Wirkung des Streckenausbaus auf die Langzeitsicherheit nicht auszuschließen ist, sollte das Rauben (Rückbau) des Ausbaus und das Entfernen technischer Einrichtungen vor dem Verfüllen der Hohlräume geprüft werden. Generell ist das Ausmaß des

# Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung



| Projekt | PSP-Element | Funktion/Thema | Komponente | Baugruppe | Aufgabe | UA | Lfd.-Nr. | Rev |
|---------|-------------|----------------|------------|-----------|---------|----|----------|-----|
| NAAN    | NNNNNNNNNN  | NNAAANN        | AANNNA     | AANN      | AAAA    | AA | NNNN     | NN  |
| SG      | 0330        |                |            |           | EA      | TF | 0002     | 00  |

Blatt: 177

## Ortsübergreifende Sammlung – Maßnahmen zur Geringhaltung der Schädigung der wesentlichen Barrieren

vorgesehenen Ausbaus unter Berücksichtigung der Anforderungen der Betriebssicherheit auf das erforderliche Maß zu beschränken. Der Rückbau des Streckenausbaus erfolgt im Zuge der Endlagerstilllegung bzw. im Rahmen der Verfüllung der Einlagerungsstrecken während des Endlagerbetriebs. Beim Rauben des Ausbaus können die konturnahen Auflockerungszonen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich ausgeweitet werden. Um dieser Schädigung entgegenzuwirken, kann ein Nachschneiden der Kontur erforderlich werden.

Alternativ zum vollständigen Rückbau des Streckenausbaus werden durch die Nagra (2014c) im Ausbausystem Lücken bzw. ein verminderter Ausbau mit Stahlringen für Verschlussbauwerke vorgesehen. Eine solche Berücksichtigung der Verschlussbauwerke im Streckenausbau oder ein schnell entfernbarer Streckenausbau sind auch für den in § 18 Abs. 4 EndlSiAnfV genannten Fall des vorzeitigen Verschlusses des Endlagers günstig.

Zusammenfassend werden die möglichen Maßnahmen der Maßnahmengruppe Hohlraumverfüllung und -verschluss aufgezählt:

- Qualitätsgerechte Verfüllung von Hohlräumen und Bohrungen
- Qualitätsgerechte Verschlussbauwerke
- Stützender, möglichst arteigener Versatz
- Rückbau technischer Einrichtungen
- Nachschneiden der Hohlraumkontur
- Berücksichtigung von Verschlussbauwerken im Streckenausbau

## Geringhaltung chemisch induzierter Schäden

Die Maßnahmengruppe der Geringhaltung chemisch induzierter Schäden leitet sich aus § 5 Abs. 2 Nr. 3 EndlSiAnfV ab:

Es ist darzulegen, dass „die möglichen Änderungen der chemischen Verhältnisse im Einlagerungsbereich, insbesondere auf Grund der in das Endlagerbergwerk eingebrachten Materialien, die Barrierewirkung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nicht erheblich beeinträchtigen.“

Die Maßnahmen dieser Maßnahmengruppe werden im Folgenden genannt, erläutert und die Bewertungszeiträume genannt, in denen die Maßnahme eine Relevanz besitzt.

Beim Abteufen bzw. Erstellen von Erkundungsbohrungen in den Phasen der Erkundung und während der Errichtung und des Betriebs ist die verwendete Bohrspülung an das Wirtsgestein anzupassen, um Lösungsprozesse oder andere negative Beeinflussungen des Wirtsgesteins zu vermeiden. Gleiches gilt für andere verwendete Betriebslösungen, wie zur Durchführung

# Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung



| Projekt | PSP-Element | Funktion/Thema | Komponente | Baugruppe | Aufgabe | UA | Lfd.-Nr. | Rev |
|---------|-------------|----------------|------------|-----------|---------|----|----------|-----|
| NAAN    | NNNNNNNNNN  | NNAAANN        | AANNNA     | AANN      | AAAA    | AA | NNNN     | NN  |
| SG      | 0330        |                |            |           | EA      | TF | 0002     | 00  |

Blatt: 178

## Ortsübergreifende Sammlung – Maßnahmen zur Geringhaltung der Schädigung der wesentlichen Barrieren

von Pumpversuchen. Ist eine Verwendung von Lösungen, die das Gestein des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs als wesentliche Barriere schädigen könnten, erforderlich, sind Vorkehrungen zu treffen, um diesen Schäden vorzubeugen und sie gering zu halten. Die Maßnahme besitzt während aller Betrachtungszeiträume eine Relevanz.

Beim Einsatz von Spritzbeton und anderen zementhaltigen Materialien kann es nach Herold et al. (2020c) im Opalinuston zur Bentonitumwandlung und zur Ausbildung einer pH-Fahne (alkalische Porenlösung) im Gestein kommen. Um diese Prozesse zu begrenzen, wird empfohlen den Ausbau so minimal wie möglich zu gestalten und nach Möglichkeit in den Einlagestrecken komplett auf diesen zu verzichten. Durch den Einsatz von sogenannten low pH-Beton kann nach Herold et al. (2020c) die negative Beeinflussung der Barriereigenschaften des Gesteins reduziert werden. Auch die Menge an verwendetem Stahl soll nach Nagra (2014c) geringgehalten werden. Durch die anaerobe Korrosion von Eisen wird Gas gebildet (Herold et al. 2020c). Der sich dabei aufbauende Gasdruck ist potenziell geeignet unter anderem die geologische Barriere zu schädigen. Gleiches gilt beim Ausbau der Erkundungsbohrungen. Es ist zu beachten, dass möglichst keine Komponenten in den Bohrungen verbleiben.

Auch bei der Errichtung von geotechnischen Barrieren, wie Verschlussbauwerken, sind die Wechselwirkungen mit dem Wirtsgestein zu berücksichtigen und zu minimieren.

Zusammenfassend werden die möglichen Maßnahmen der Maßnahmengruppe Geringhaltung chemisch induzierter Schäden aufgezählt:

- Bohrspülung an Wirtsgestein anpassen
- Lösungsprozesse durch Betriebslösungen minimieren
- Berücksichtigung von Wechselwirkungen des Ausbaus mit dem Wirtsgestein
- Berücksichtigung und Minimierung von Wechselwirkungen der Materialien zur Errichtung geotechnischer Barrieren mit dem Wirtsgestein

## Geringhaltung thermisch induzierter Schäden

Die Maßnahmengruppe der Geringhaltung thermisch induzierter Schäden leitet sich aus § 5 Abs. 2 Nr. 2 EndlSiAnfV ab:

Es ist darzulegen, dass „durch die Temperaturentwicklung die Barrierewirkung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nicht erheblich beeinträchtigt wird.“

Die Schädigung des Wirtsgesteinsbereichs mit Barrierefunktionen ist durch mehrere Wirkmechanismen bei einer übermäßigen Wärmezufuhr möglich. Nach Meleshyn et al. (2016) ist es möglich, dass es durch Inhomogenitäten im Gestein bei der thermisch bedingten Ausdehnung

# Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung



| Projekt | PSP-Element | Funktion/Thema | Komponente | Baugruppe | Aufgabe | UA | Lfd.-Nr. | Rev |
|---------|-------------|----------------|------------|-----------|---------|----|----------|-----|
| NAAN    | NNNNNNNNNN  | NNAAANN        | AANNNA     | AANN      | AAAA    | AA | NNNN     | NN  |
| SG      | 0330        |                |            |           | EA      | TF | 0002     | 00  |

Blatt: 179

## Ortsübergreifende Sammlung – Maßnahmen zur Geringhaltung der Schädigung der wesentlichen Barrieren

des Gesteins zu ungünstigen Spannungszuständen kommen kann. In porösen und fluidgesättigten Gesteinen ist darüber hinaus nach Alfara et al. (2020b) auch eine thermisch induzierte Erhöhung des Porenwasserdruckes zu berücksichtigen. Dabei kann es zur Ausbildung ungünstiger Spannungszustände kommen. In beiden Fällen ist die Ausbildung von Sekundärpermeabilitäten möglich.

Bei Tongesteinen sind nach Bräuer et al. (2016) zusätzlich mögliche Mineralumwandlungen zu berücksichtigen. Nach Bracke et al. (2019) kann die thermisch induzierte Umwandlung von Tonmineralen die endlagerrelevanten Eigenschaften der Tongesteine, wie die Sorptionsfähigkeit und die Quellfähigkeit, und so deren Barrierewirksamkeit herabsetzen. Bei der Illitisation wird beispielsweise mit zunehmender Temperatur Smektit in Illit umgewandelt (Mengel 2006). Die Umwandlung beginnt bei ca. 50 – 70 °C (Goultly et al. 2016; Mengel 2006; Thyberg & Jahren 2011) und wird bei erhöhten Temperaturen beschleunigt.

Die Maßnahmen, die eine solche Schädigung des Wirtsgesteinsbereichs mit Barrierefunktion verhindern bzw. verringern sollen, werden im Folgenden genannt, erläutert und die Bewertungszeiträume genannt, in denen die Maßnahme eine Relevanz besitzt.

So sind während des Auffahrens von Hohlräumen und beim Abteufen von Bohrungen geeignete Methoden zu wählen, die den Wärmeeintrag geringhalten. Darüber hinaus ist bei der Wahl und Anwendung von Materialien zur Erstellung von Verschlussbauwerken, wie Sorelbeton und Asphalt, wirtsgesteinsspezifisch die thermische Wechselwirkung mit dem Gebirge zu berücksichtigen.

Eine wesentliche Wärmequelle stellen ab der Einlagerung in der Betriebsphase die Endlagergebäude dar (siehe Kapitel 4.2.8.2). Um eine Schädigung der wesentlichen Barriere während der Betrachtungszeiträume und darüber hinaus zu minimieren, ist nach § 27 Abs. 4 StandAG eine maximal physikalisch mögliche Grenztemperatur an der Behälteraußenwand für die betrachteten Wirtsgesteine zu definieren. Die Grenztemperatur wird als eine der wesentlichen Eingangsgrößen bei der vorläufigen Endlagerauslegung berücksichtigt (siehe Kapitel 4.2.8.5). Eine wirtsgesteinsspezifische Festlegung dieser Grenztemperaturen erfolgt bis zum Ende von Schritt 2 der Phase I des Standortauswahlverfahrens.

Zusammenfassend werden die möglichen Maßnahmen der Maßnahmengruppe Geringhaltung thermisch induzierter Schäden aufgezählt:

- Festlegung einer (wirtsgesteinsspezifischen) Grenztemperatur nach § 27 Abs. 4 StandAG
- Potenziellen Einfluss der Bewitterung oder Temperatur auf Wassergehalt im Gestein beachten

**Methodenbeschreibung zur Durchführung  
der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen  
gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung**



| Projekt | PSP-Element | Funktion/Thema | Komponente | Baugruppe | Aufgabe | UA | Lfd.-Nr. | Rev |
|---------|-------------|----------------|------------|-----------|---------|----|----------|-----|
| NAAN    | NNNNNNNNNN  | NNAAANN        | AANNNA     | AANN      | AAAA    | AA | NNNN     | NN  |
| SG      | 0330        |                |            |           | EA      | TF | 0002     | 00  |

Blatt: 180

**Ortsübergreifende Sammlung – Maßnahmen zur Geringhaltung der Schädigung der wesentlichen Barrieren**

**Optimierung aller Prozesse zum Zweck der Langzeitsicherheit**

§ 12 EndlSiAnfV sieht eine wiederkehrende Optimierung des Sicherheitskonzepts und der Endlagerauslegung vor. Als eines der Optimierungsziele wird in § 12 Abs. 1 Nr. 1 EndlSiAnfV die Langzeitsicherheit des Endlagers genannt. Die Geringhaltung der Schädigung der wesentlichen Barrieren kann als eine der Grundlagen dieser Langzeitsicherheit betrachtet werden. Die Optimierung nach § 12 EndlSiAnfV im Rahmen der rvSU wird in Kapitel 4.2.9 erläutert. Darüber hinaus sind das Sicherheitskonzept sowie die Endlagerauslegung und damit auch die hier betrachteten Maßnahmen sind in den nächsten Schritten des Standortauswahlverfahrens und auch nach der Standortentscheidung unter anderem auf das Ziel der Geringhaltung der Schädigung der wesentlichen Barrieren zu optimieren. Diese Maßnahmengruppe gilt sowohl für das Endlagersystem Typ 1 als auch Typ 2.

**Schutz der technischen und geotechnischen Barrieren im Fall § 4 Abs. 3 Nr. 2 EndlSiAnfV**

Kann im Kristallingestein kein geeigneter einschlusswirksamer Gebirgsbereich ausgewiesen werden, kann die Funktion der wesentlichen Barrieren nach § 4 Abs. 3 Nr. 2 EndlSiAnfV von geotechnischen und technischen Barrieren erfüllt werden. In diesem Fall sind die Maßnahmengruppen, die sich ausschließlich auf den einschlusswirksamen Gebirgsbereich bzw. den Wirtsgesteinsbereich mit Barriereigenschaften beziehen, nicht Teil dieser Betrachtung, da ausschließlich die wesentlichen Barrieren und nicht die weiteren Barrieren betrachtet werden. Eine Berücksichtigung der Maßnahmen für des Endlagersystem Typ 1 ist jedoch auch für den Typ 2 zu empfehlen, da auch hier das Wirtsgestein als weitere Barriere relevant ist. Maßnahmen, die sich auf die geotechnischen Barrieren beziehen, behalten auch in diesem Fall ihre Relevanz. Als zusätzliche Maßnahmengruppe umfasst diese Gruppe Maßnahmen, die ausschließlich für den Fall von technischen und geotechnischen Barrieren als wesentliche Barrieren Anwendung finden. Prozesse wie die Herstellung der Endlagerbehälter, die Erstellung der Endlagergebäude oder der Transport der Komponenten zum Standort des Endlagerbergwerks werden hierbei nicht betrachtet. Auf eine Aufschlüsselung in einzelne Maßnahmengruppen nach mechanischen, thermischen und chemischen Einwirkungen wird verzichtet.

In einem Sicherheitskonzept, das auf geotechnischen und technischen Barrieren als wesentliche Barrieren beruht, besitzt der Endlagerbehälter die wesentliche Funktion des sicheren Einschlusses der Radionuklide. Die Integrität des Endlagerbehälters ist daher entscheidend für die Langzeitsicherheit des Endlagers und die Einlagerung eines beschädigten Endlagerbehälters strikt zu vermeiden. Alle Aktivitäten, die mit und um den Endlagerbehälter erfolgen, müssen daher so ausgelegt werden, dass eine Beschädigung im Rahmen des bestimmungsgemäßen Betriebs ausgeschlossen ist. Zusätzlich erfolgt eine Sichtprüfung des Behälters am Einlagerungsort.

2020-10-26\_PM\_QM/V02\_Textblatt A4 Hochformat\_REV02

# Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung



| Projekt | PSP-Element | Funktion/Thema | Komponente | Baugruppe | Aufgabe | UA | Lfd.-Nr. | Rev |
|---------|-------------|----------------|------------|-----------|---------|----|----------|-----|
| NAAN    | NNNNNNNNNN  | NNAAANN        | AANNNA     | AANN      | AAAA    | AA | NNNN     | NN  |
| SG      | 0330        |                |            |           | EA      | TF | 0002     | 00  |

Blatt: 181

## Ortsübergreifende Sammlung – Maßnahmen zur Geringhaltung der Schädigung der wesentlichen Barrieren

Das Personal muss in den Abläufen geschult werden und für den hohen Stellenwert der Schadensvermeidung für den sicheren Einschluss der radioaktiven Abfälle sensibilisiert werden. Eine Schadensmeldung muss so einfach erfolgen können wie möglich und darf keine negativen Konsequenzen für den Meldungsgeber verursachen. Außerdem muss die verwendete Technik ausreichend unter realistischen Bedingungen erprobt sein. Dabei sind auch alle möglichen Fehlfunktionen zu berücksichtigen und auszuwerten.

Treten trotz der vorgesehenen Abläufe Schäden auf, ist eine sicherheitstechnische Bewertung durchzuführen, ob eine Neuverpackung erforderlich ist. Genauso sind Ereignisse zu definieren, wie der Absturz eines Behälters, das Anecken eines Behälters oder ein Brand, bei denen vorsorglich unabhängig vom Schadensmuster eine Neuverpackung initiiert wird.

Ein umfassender und kontinuierlicher Qualitätssicherungsprozess ermöglicht die Bewertung der Abläufe um Schäden vorzubeugen und Schadensereignisse in Prozessanpassung zu berücksichtigen.

Für die Handhabung der Behälter und Gebinde Übertage ist es unter Umständen möglich, sich an den Abläufen in den Zwischenlagern der radioaktiven Abfälle zu orientieren, die eine große Erfahrung bei der Handhabung von TLB für hoch radioaktive Abfälle besitzt.

Sollte die Einlagerung des Endlagergebundes in einem Bohrloch erfolgen, sollte dieses einen ausreichenden Durchmesser aufweisen, um ein Verkanten oder Verkratzen während der Einlagerung auszuschließen.

Als Beispiel für einen der im Ablauf zu optimierenden Prozesse, um eine Beschädigung des Endlagerbehälters zu verhindern, wird hier die Art und Weise aufgeführt, mit der der Versatz um das Endlagergebäude eingebracht wird.

Zusammenfassend werden die möglichen Maßnahmen der Maßnahmengruppe Schutz der technischen und geotechnischen Barrieren im Fall § 4 Abs. 3 Nr. 2 EndlSiAnfV aufgezählt:

- Geeignete Auslegung der Betriebsabläufe
- Sichtprüfung der Endlagerbehälter vor der Einlagerung
- Qualitätssicherungsmaßnahmen
- Schadensschwelle definieren
- Schulung und Sensibilisierung des Personals
- Erprobung der Technik
- Ausreichender Bohrl Lochdurchmesser
- Berücksichtigung bestehender Handhabungskonzepte

# Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung



| Projekt | PSP-Element | Funktion/Thema | Komponente | Baugruppe | Aufgabe | UA | Lfd.-Nr. | Rev |
|---------|-------------|----------------|------------|-----------|---------|----|----------|-----|
| NAAN    | NNNNNNNNNN  | NNAAANN        | AANNNA     | AANN      | AAAA    | AA | NNNN     | NN  |
| SG      | 0330        |                |            |           | EA      | TF | 0002     | 00  |

Blatt: 182

## Ortsübergreifende Sammlung – Maßnahmen zur Geringhaltung der Schädigung der wesentlichen Barrieren

- Auswahl von Versatzformen um den Endlagerbehälter, die eine Beschädigung ausschließen

### 4.2.6.8 Flächenbedarfsbestimmung Infrastrukturbereich

Bei der vorläufigen Auslegung des Endlagers im Rahmen der rVSU müssen zur Abschätzung der maximalen Größe eines Endlagerbergwerks nach § 6 Abs. 4 Nr. 2 EndlSiUntV auch die untertägigen Infrastrukturbereiche des HAA-Endlagers berücksichtigt werden. Dies geschieht durch eine begründete und nachvollziehbare Abschätzung des für die Infrastrukturbereiche benötigten Flächenbedarfs. Analog zur Auslegung des Einlagerungsbereichs wird hierbei in Abhängigkeit des Wirtsgesteins und der Teufe des Endlagers gearbeitet.

Im ersten Schritt der Bearbeitung wird analog der Vorgehensweise der *Kommission Lagerung hochradioaktiver Abfallstoffe* im Gutachten zum Flächenbedarf für ein Endlager für wärmeentwickelnde, hoch radioaktive Abfälle (DBE TEC 2016) der Flächenbedarf in Anlehnung an die Arbeiten zur vorläufigen Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben (VSG) (Bollingerfehr et al. 2012) abgeschätzt. Für das Wirtsgestein Steinsalz wird der Flächenbedarf der VSG übernommen. Für die Wirtsgesteine Tongestein und Kristallin dient der Flächenbedarf im Salz als Grundlage. Allerdings stehen Gebirgspfeilerbreite und Streckenbreite jeweils in einem anderen Verhältnis, wodurch sich die Flächenbedarfe erhöhen. Die im Rahmen der Methodenentwicklung berechneten Flächenbedarfe basieren zunächst auf diesen Abschätzungen.

Im zweiten Schritt der Bearbeitung werden unter Heranziehung recherchierbarer Literatur und BGE-interner Erfahrungen bei der Planung von Infrastrukturbereichen in laufenden Endlagerprojekten die für die Errichtung, den Betrieb und die Stilllegung eines HAA-Endlagers notwendigen Infrastruktureinrichtungen aufgezählt und in ihrer Funktion beschrieben. Bereits dabei wird aufgrund wirtsgesteinsspezifischen Aspekten differenziert (z. B. Infrastruktureinrichtungen zur Herstellung von Ausbauten im Tongestein). Auch Anforderungen, die sich entsprechend § 13 EndlSiAnfV bzgl. der Rückholbarkeit der Abfälle ergeben, werden berücksichtigt. Demnach sind die für eine Rückholung erforderlichen technischen Einrichtungen bereits während des Betriebs des Endlagers vorzuhalten.

Vor dem Hintergrund der Minimierung der Auffahrung von Hohlräumen unter Tage wird anschließend erörtert, welche Infrastruktureinrichtungen unter Tage angelegt werden müssen und welche möglicherweise auch über Tage angelegt werden können.

Auf Basis der Liste und Beschreibung der erforderlichen Infrastruktureinrichtungen wird ein Layout mit räumlicher Anordnung der verschiedenen Infrastruktureinrichtungen und eine begründete Flächenbedarfsschätzung durchgeführt. Dabei werden (teufenabhängige) gebirgsmechanische Daten der verschiedenen Wirtsgesteine berücksichtigt. Insbesondere beim Tongestein sind in größeren Teufen größere Streckenabstände und damit ein größerer Flächenbedarf erforderlich. Damit wird

# Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung

| Projekt | PSP-Element | Funktion/Thema | Komponente | Baugruppe | Aufgabe | UA | Lfd.-Nr. | Rev |
|---------|-------------|----------------|------------|-----------|---------|----|----------|-----|
| NAAN    | NNNNNNNNNN  | NNAAANN        | AANNNA     | AANN      | AAAA    | AA | NNNN     | NN  |
| SG      | 0330        |                |            |           | EA      | TF | 0002     | 00  |

Blatt: 183

der Flächenbedarf für den gesamten Infrastrukturbereich ermittelt. Analog zur Flächenbedarfsbestimmung des Einlagerungsbereichs des HAA-Endlagers werden bei Flächenbedarfsabschätzungen für den Infrastrukturbereich Teufen betrachtet, mit denen die bisher betrachteten Teufenbereiche von 350 m bis 900 m für Tongestein (Opalinuston) und von 450 m bis 1 200 m für Steinsalz (in steiler Lagerung) abgedeckt sind. Die Festlegung eines zu betrachtenden Teufenbereichs für kristallines Wirtsgestein steht hingegen noch aus.

### 4.2.6.9 Festlegung und Begründung wesentlicher Maße des Endlagerbergwerks

Auf Basis der Beschreibung des Aufbaus des Endlagerbergwerks und der darin ablaufenden Prozesse in den voran gegangenen Unterkapiteln können zur Bestimmung des Endlagerflächenbedarfs die dafür notwendigen Maße entweder festgelegt werden oder es kann beschrieben werden, wie sie abzuleiten sind. Die für die Flächenberechnung notwendigen Maßangaben sind in Abbildung 35 gekennzeichnet und werden in Beispiel 17 beispielhaft für Opalinuston und Steinsalz in steiler Lagerung zusammengefasst dargestellt.

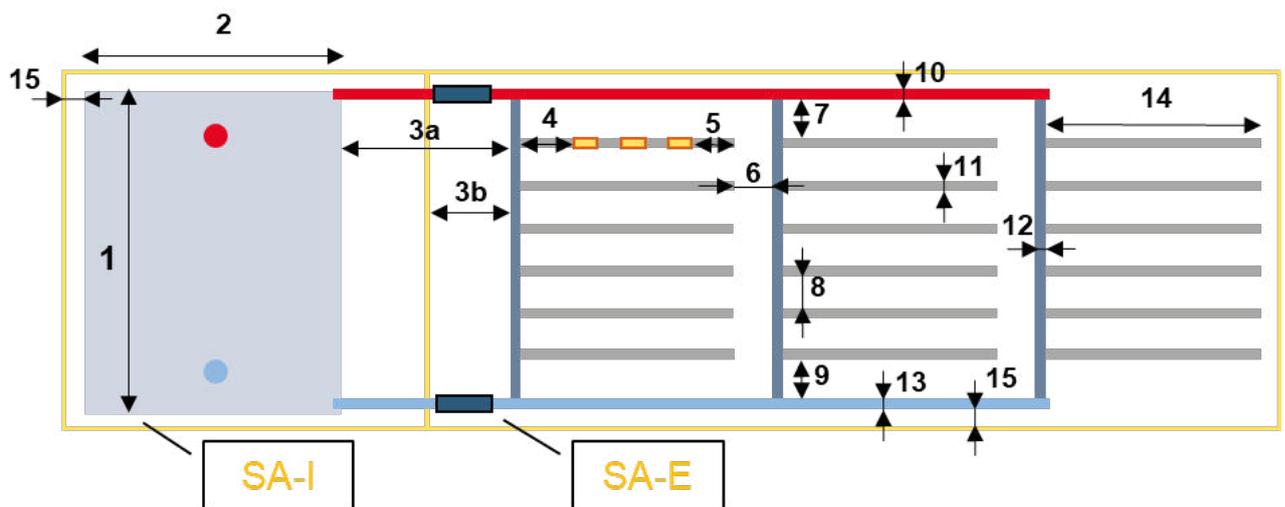


Abbildung 35: Allgemeiner Aufbau des Endlagerbergwerks mit Bemaßung für die Ermittlung des Flächenbedarfs

Für den gewählten Aufbau des Endlagerbergwerks stellt dessen geplante Breite (1) eine wichtige Größe dar. Von ihr leiten sich z. B. die Länge der Querschläge, die Anzahl der Einlagerungsstrecken je Einlagerungsfeld oder die notwendige Länge des Endlagers ab. Die Wahl der Endlagerbreite hängt zunächst vom Platzangebot im Wirtsgestein ab. Ist dieses ausreichend groß, wird eine Breite von 1 000 m veranschlagt. Dadurch bleiben die Fahrwege und Fahrzeiten für Transportfahrzeuge (z. B. Muldenkipper), die im Auffahrungsbetrieb zwischen den Einlagerungsstrecken und der Richtstrecke pendeln, in einer überschaubaren Größenordnung. Fällt das Platzangebot im Wirtsgestein, wie z. B. in einem schmalen, länglichen Salzstock, kleiner aus, orientieren sich die Lage des Endlagers und die geplante Endlagerbreite an der verfügbaren Breite. Bei dem hier gewählten Aufbau erhöht eine Verkleinerung der Endlagerbreite grundsätzlich den Flächenbedarf, da sich der Anteil der Richtstrecken und ihrer Gebirgspfeiler am Endlagerflächenbedarf vergrößert. Bei etwa 100 m geplanter Endlagerbreite besitzen allein die Richtstrecken schon einen Flächenanteil von ca. 20 %

## Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung



| Projekt | PSP-Element | Funktion/Thema | Komponente | Baugruppe | Aufgabe | UA | Lfd.-Nr. | Rev |
|---------|-------------|----------------|------------|-----------|---------|----|----------|-----|
| NAAN    | NNNNNNNNNN  | NNAAANN        | AANNNA     | AANN      | AAAA    | AA | NNNN     | NN  |
| SG      | 0330        |                |            |           | EA      | TF | 0002     | 00  |

Blatt: 184

am gesamten Endlagerflächenbedarf. Dieser hohe Flächenanteil der großen, langlebigen Richtstrecken ist nachteilig für die Erfüllung der Anforderung nach § 6 Abs. 4 EndlSiUntV (Geringhaltung der Schädigung der wesentlichen Barrieren), da das Wirtsgestein in diesem Fall zu einem großen Anteil durch die Richtstrecken gestört wird, die jedoch nur Mittel zum Zweck der Einlagerung darstellen. Eine Endlagerbreite kleiner als 100 m sollte deswegen vermieden werden.

Die Länge des Infrastrukturbereichs (2) ergibt sich aus seinem Flächenbedarf und der geplanten Breite des Endlagers. Sein Flächenbedarf wird im Rahmen der rvSU geschätzt (Kapitel 4.2.6.8).

Der Abstand zwischen Infrastrukturbereich und erstem Querschlag des Einlagerungsbereichs (3a) wird auf 300 m festgesetzt. Dieser Abstand ist voraussichtlich ausreichend für die Durchführung von Verschlussmaßnahmen zwischen Einlagerungsbereich und Infrastrukturbereich. Darüber hinaus werden die thermischen Auswirkungen der eingelagerten Abfälle auf den Infrastrukturbereich und die Schächte minimiert.

Für den Fall, dass nur der Einlagerungsbereich im Wirtsgesteinsbereich mit Barrierefunktion und der Infrastrukturbereich außerhalb liegt, wird ein Sicherheitsabstand definiert (3b). Entlang der Zugangsstrecken sollte der Abstand zwischen Einlagerungsbereich und Außengrenze des Wirtsgesteins mindestens 150 m betragen, um ausreichende Verschlussmaßnahmen innerhalb des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs vorsehen zu können.

Der Abstand vom Querschlag zum zuletzt eingelagerten Endlagergebäude (4) einer Einlagerungsstrecke beträgt mindestens 15 m, um den kurvenförmigen Eingang in die Einlagerungsstrecke frei zu halten. Der Abstand von der Ortsbrust der Einlagerungsstrecke zum ersten eingelagerten Endlagergebäude (5) beträgt 5 m um eine allseitige Umhüllung mit Buffer zu garantieren und ausreichend Platz für den Einlagerungsvorgang zu gewährleisten. Der Abstand zwischen Behältern wird auf Basis der thermischen Berechnungen abgeleitet.

Die Pfeilerbreiten (6 bis 9) ergeben sich aus der gebirgsmechanischen Bemessung derselben (Kapitel 4.2.7) Streckenbreiten (10 bis 13) ergeben sich aus der Planung des Einlagerungsbereichs (Kapitel 4.2.6.4.2). Die Streckenlänge der Einlagerungsstrecken wird mit 400 m angenommen. Diese Festlegung orientiert sich an § 49 ABVO, nach der in blind endenden Vortrieben mit einer Länge von mehr als 400 m Schutzbunker vorzusehen sind. Dies sollte in den Einlagerungsstrecken vermieden werden, da sie im Querschnitt so klein wie möglich bemessen werden, um das Wirtsgestein als wesentliche Barriere möglichst wenig zu schädigen. Die Festlegung von 400 m stellt deswegen ein vorläufiges Maximum dar. Dieses wird gewählt, da sich lange Einlagerungsstrecken mindernd auf den Flächenbedarf des Endlagerbergwerks und das notwendige Auffahrungsvolumen auswirken.

Es wird ein allseitiger vorläufiger Sicherheitsabstand (15) vorsorglich angenommen, damit um das Endlager herum ein einschlusswirksamer Gebirgsbereich ausgewiesen werden kann.

Beispiel 17 listet die Maßnahmen am Beispiel von Opalinuston und Steinsalz in steiler Lagerung auf, die für die rvSU verwendet werden.

## Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung



|         |             |                |            |           |         |    |          |     |            |
|---------|-------------|----------------|------------|-----------|---------|----|----------|-----|------------|
| Projekt | PSP-Element | Funktion/Thema | Komponente | Baugruppe | Aufgabe | UA | Lfd.-Nr. | Rev | Blatt: 185 |
| NAAN    | NNNNNNNNNN  | NNAAANN        | AANNNA     | AANN      | AAAA    | AA | NNNN     | NN  |            |
| SG      | 0330        |                |            |           | EA      | TF | 0002     | 00  |            |

*Beispiel 17: Festlegung/Beschreibung der Maße am Beispiel Opalinuston und Steinsalz (steile Lagerung)*

### Festlegung/Beschreibung der Maße am Beispiel Opalinuston und Steinsalz (steile Lagerung)

*Tabelle 16: Maße am Beispiel Opalinuston und Steinsalz (in steiler Lagerung)*

| Abk. / Nr. | Erläuterung  | Bsp. Opalinuston  | Bsp. Steinsalz in steiler Lagerung |
|------------|--|---|------------------------------------|
| SA-E       | Begrenzungslinie des Sicherheitsabstands (s. Nr. 3b und 15) um den Einlagerungsbereich   |   |                                    |
| SA-I       | Begrenzungslinie des Sicherheitsabstands (s. Nr. 15) um den Infrastrukturbereich   |   |                                    |
| 1          | Geplante Breite des Endlagerbergwerks  | 1 000 m   | 500 m                              |
| 2          | Länge des Infrastrukturbereichs  | Ergibt sich aus der Teufe, dem Flächenbedarf des Infrastrukturbereichs und der geplanten Breite des Endlagerbergwerks (1) |                                    |
| 3a         | Abstand zwischen Infrastrukturbereich und erstem Querschlag des Einlagerungsbereichs   | 300 m   |                                    |
| 3b         | Vorläufiger Sicherheitsabstand des Einlagerungsbereichs in Richtung der Richtstrecken, falls die ewG-Grenzen die Richtstrecken schneiden | 150 m   |                                    |
| 4          | Abstand vom Querschlag zum nächsten eingelagerten Endlagergebäude  | 15 m  |                                    |
| 5          | Abstand von der Ortsbrust der Einlagerungstrecke zum nächsten eingelagerten Endlagergebäude  | 5 m   |                                    |
| 6          | Abstand von der Ortsbrust der Einlagerungstrecke zum nächsten Querschlag   | Annahme: entspricht Nr. 7   |                                    |
| 7          | Pfeilerbreite zwischen der Richtstrecke für Einlagerungsbetrieb und der nächsten Einlagerungstrecke                                      | Ergibt sich aus der teufenabhängigen Bemessung der Pfeilerbreite  |                                    |

## Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung



| Projekt | PSP-Element | Funktion/Thema | Komponente | Baugruppe | Aufgabe | UA | Lfd.-Nr. | Rev |
|---------|-------------|----------------|------------|-----------|---------|----|----------|-----|
| NAAN    | NNNNNNNNNN  | NNAAANN        | AANNNA     | AANN      | AAAA    | AA | NNNN     | NN  |
| SG      | 0330        |                |            |           | EA      | TF | 0002     | 00  |

Blatt: 186

### Festlegung/Beschreibung der Maße am Beispiel Opalinuston und Steinsalz (steile Lagerung)

|    |   |  |
|----|---|--|
| 8  | Pfeilerbreite zwischen Einlagerungsstrecken   | Ergibt sich aus der teufenabhängigen Bemessung der Pfeilerbreite   |
| 9  | Pfeilerbreite zwischen der Richtstrecke für Auf-fahrungsbetrieb und der nächsten Einlage-rungsstrecke | Ergibt sich aus der teufenabhän-gigen Bemessung der Pfeiler-breite |
| 10 | Streckenbreite der Richtstrecke für Einlage-rungsbetrieb  | 7,6 m  |
| 11 | Streckenbreite der Einlagerungsstrecke  | 5,1 m  |
| 12 | Streckenbreite des Querschlags  | 7,6 m  |
| 13 | Streckenbreite der Richtstrecke für Auffah-rungsbetrieb   | 6,8 m  |
| 14 | Streckenlänge der Einlagerungsstrecke   | 400 m  |
| 15 | Allseitiger vorläufiger Sicherheitsabstand  | 50 m   |

#### 4.2.7 Gebirgsmechanische Auslegung

Der Flächenbedarf eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle hängt von verschiedenen Faktoren ab. Für hochradioaktive Abfälle in Deutschland steht das Abfallmengengerüst bis auf geringe Unge-wissheiten fest (siehe Kapitel 2). Im Rahmen der rvSU sind die wesentlichen variablen Einflussfak-toren auf den Flächenbedarf

- die Teufe des Einlagerungsbereichs
- der Wirtsgesteinsbereich mit Barrierefunktion, der den einschlusswirksamen Gebirgsbereich aufnimmt, mit seinen mechanischen und thermischen Eigenschaften
- Festlegungen, die bei der Endlagerauslegung und -planung getroffen werden (z. B. die Aus-legungstemperatur, die Maßnahmen zur Einhaltung dieser, Planung insbesondere des Ein-lagerungsbereichs)

Die Endlagerteufe ist maßgeblich für den Flächenbedarf, da diese zusammen mit dem geothermi-schen Gradienten die Gebirgstemperatur im Einlagerungsbereich bedingt. Bei der Endlageraus-legung ist eine maximale Auslegungstemperatur zu berücksichtigen, um die Barrieren nicht thermisch zu schädigen. Die hochradioaktiven Abfälle müssen jedoch mit ihrer Gesamtwärmeleistung im Ein-

## Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung



| Projekt | PSP-Element | Funktion/Thema | Komponente | Baugruppe | Aufgabe | UA | Lfd.-Nr. | Rev |
|---------|-------------|----------------|------------|-----------|---------|----|----------|-----|
| NAAN    | NNNNNNNNNN  | NNAAANN        | AANNNA     | AANN      | AAAA    | AA | NNNN     | NN  |
| SG      | 0330        |                |            |           | EA      | TF | 0002     | 00  |

Blatt: 187

lagerungsbereich vollständig untergebracht werden. Die Gebirgstemperatur in-situ und die thermischen Eigenschaften des Gebirges entscheiden maßgeblich darüber, auf welcher Fläche die hochradioaktiven Abfälle verteilt werden müssen, damit die Auslegungstemperatur eingehalten wird. Zusätzlich zu den thermischen Gegebenheiten kann sich die Endlagerteufe auf die Endlagerfläche auswirken, da in größeren Teufen mit größeren Gebirgsdrücken zu rechnen ist, was beispielsweise durch entsprechend breitere Pfeiler, d. h. Abstände zwischen den einzelnen Strecken, berücksichtigt werden muss. Aus diesen Zusammenhängen ist absehbar, dass sich der Flächenbedarf eines Endlagers aufgrund der thermischen Gegebenheiten sowie aufgrund von bergbaulichen Aspekten bei erhöhter Endlagerteufe vergrößert. Die thermischen Randbedingungen werden im folgenden Kapitel erläutert.

Vor der Durchführung der thermischen Auslegung ist jedoch festzulegen, welche Abstände von Einlagerungsstrecken zueinander minimal zulässig sind. Begrenzend ist vor allem die mechanische Tragfähigkeit der Gebirgspfeiler, die zwischen den parallelen Einlagerungsstrecken tragend verbleiben. Für die rvSU ist nur eine orientierende Berechnung auf Basis von Annahmen möglich. Dabei wird die Tragfähigkeit eines einzelnen Pfeilers untersucht. Die Größe der Pfeiler im Vergleich zur Größe der benachbarten Strecken ist dafür die entscheidende Größe, da die Größe des Hohlräume wesentlich die mechanische Last auf die benachbarten Pfeiler definiert und andererseits die Pfeilergröße die Tragfähigkeit des Pfeilers bestimmt.

In diesem Kapitel werden überwiegend beispielhaft methodische Vorgehensweisen erläutert, wie im Rahmen der rvSU die minimalen Abstände von parallelen Strecken zueinander („minimale Pfeilerbreiten“) ermittelt werden können. Die jeweilige Methode der Ermittlung der aus gebirgsmechanischer Sicht minimal zulässigen Pfeilergrößen ist jedoch stark abhängig vom Wirtsgestein. Grundsätzlich werden die mechanischen Einwirkungen auf einen Pfeiler der Tragfähigkeit des Pfeilers gegenübergestellt. Übersteigt die Tragfähigkeit des Pfeilers die mechanischen Einwirkungen, kann der Pfeiler als standfest gelten. In diesem Zusammenhang wird auch die Notwendigkeit von (tragenden) Ausbaumaßnahmen erörtert. Die Gebirgsparameter werden für das jeweilige Wirtsgestein in den rvSU als homogen über den jeweiligen Untersuchungsraum hinweg angenommen, solange keine genaueren Daten vorliegen. Aufgrund der Begrenztheit der vorgestellten analytischen Ansätze und Analogieschlüsse wird angestrebt, die gebirgsmechanische Auslegung für spätere Phasen der Standortsuche um numerische Modellierungen zu erweitern. Diese können über die Betrachtung einzelner Pfeiler hinausgehen und die gebirgsmechanische Situation großräumiger untersuchen.

Über die Pfeilerauslegung hinaus ist zu prüfen, ob sich aus der weiteren Endlagerplanung weitere Anforderungen an die Größe der Pfeiler ergeben; insbesondere aus

- der Endlager- und Bergbautechnik (z. B. durch notwendige Kurvenradien)
- den Verfüll- und Versatzmaßnahmen
- den Maßnahmen zur Rückholung

## Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung



| Projekt | PSP-Element | Funktion/Thema | Komponente | Baugruppe | Aufgabe | UA | Lfd.-Nr. | Rev |
|---------|-------------|----------------|------------|-----------|---------|----|----------|-----|
| NAAN    | NNNNNNNNNN  | NNAAANN        | AANNNA     | AANN      | AAAA    | AA | NNNN     | NN  |
| SG      | 0330        |                |            |           | EA      | TF | 0002     | 00  |

Blatt: 188

Auf Basis der Annahmen in der vorläufigen Endlagerauslegung ist z. B. eine Pfeilerbreite kleiner als 10,2 m aus technischen Gründen nicht umsetzbar, da in diesem Fall zu wenig Platz an den Streckeneingängen zur Verfügung steht, um die notwendigen Kurvenradien der Transporttechnik vorzusehen.

Innerhalb der natürlich vorgegebenen Grenzen, die die Endlagerteufe und die thermischen und mechanischen Randbedingungen vorgeben, bestehen darüber hinaus Freiheitsgrade der Planung, die sich ebenfalls auf den Endlagerflächenbedarf auswirken können. Dazu gehören z. B. die geplante Breite und Länge des Einlagerungsbereichs oder die Länge der Einlagerungsstrecken.

Beispiel 18 und Beispiel 19 veranschaulichen die gebirgsmechanischen Annahmen und Berechnungen, wie sie im Rahmen der rvSU verwendet werden sollen.

*Beispiel 18: Wirtsgesteinsspezifische Ermittlung der Pfeilerbreiten im Tongestein Opalinuston*

### Wirtsgesteinsspezifische Ermittlung der Pfeilerbreiten im Tongestein Opalinuston

Für die Ermittlung der Pfeilerbreiten im Opalinuston stehen einerseits orientierende numerischen Berechnungen aus (Herold et al. 2020c) für die generische Endlagerung im Tongestein zur Verfügung. Diese gehen teilweise über die Betrachtung einzelner Pfeiler hinaus und berücksichtigen darüber hinaus tragende Ausbausysteme. Für die rvSU können auf dieser Basis erste Annahmen insbesondere für den notwendigen Ausbau im Opalinuston generiert werden. Des Weiteren können überschlägige Formeln aus der Literatur für eine Abschätzung der minimalen Pfeilerbreiten verwendet werden. Aus beiden Ansätzen wird anschließend eine Arbeitshypothese für Ausbausysteme und Pfeilerbreiten für die Endlagerung im Opalinuston generiert.

*„Bei der Planung eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle in Tongesteinsformationen ist ein Ausbau der Grubenräume entsprechend der jeweiligen Teufenlage generell vorzusehen. Gründe dafür sind die Tongesteinseigenschaften wie zum Beispiel die geringe bis mäßige Festigkeit, das Kriechverhalten oder die Eigenschaftsänderungen in Abhängigkeit vom Wassergehalt. Bergbehördliche Vorgaben zur Wahrung der betrieblichen Sicherheit, radiologische Aspekte des Strahlenschutzes und weitere regulatorische Vorgaben führen zu hohen Anforderungen an die Ausbausysteme. Weiterhin kann mit Blick auf eine mögliche Rückholung der Endlagerbehälter ein langlebiger Streckenausbau von Vorteil sein, was wiederum zusätzliche Anforderungen an den Funktionszeitraum stellt. Auch für die Langzeitsicherheit des Endlagers hat der Ausbau Konsequenzen. Zum einen wird die Neigung zur Bildung von Wegsamkeiten beeinflusst, welche präjudizierend für potenziell eindringende Fluide wirken können. Zum anderen sind chemische Wechselwirkungen der Ausbaumaterialien mit dem Tongestein möglich“ (Herold et al. 2020c).*

Zur Bearbeitung dieses Spannungsfeldes von Ausbausystemen, verwendeten Baustoffen, Bau- und Betriebssicherheit sowie der Langzeitsicherheit wurden durch (Herold et al. 2020c) verschiedene Untersuchungen angestellt. Betrachtungen zum Streckenausbau wurden unterteilt in kurzlebige Strecken, insbesondere Einlagerungsstrecken, und langlebige Strecken

# Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung



| Projekt | PSP-Element | Funktion/Thema | Komponente | Baugruppe | Aufgabe | UA | Lfd.-Nr. | Rev |
|---------|-------------|----------------|------------|-----------|---------|----|----------|-----|
| NAAN    | NNNNNNNNNN  | NNAAANN        | AANNNA     | AANN      | AAAA    | AA | NNNN     | NN  |
| SG      | 0330        |                |            |           | EA      | TF | 0002     | 00  |

Blatt: 189

## Wirtsgesteinsspezifische Ermittlung der Pfeilerbreiten im Tongestein Opalinuston

(z. B. Richtstrecken), deren Lebensdauer mit bis zu 50 Jahren angesetzt wird. Der Einfluss verschiedener Parameter auf die Gestaltung der jeweiligen Ausbausysteme wurde untersucht, darunter:

- Anzahl benachbarter Einlagerungsstrecken
- Querschnittsform der Strecken
- Lateraler Trennflächenabstand („Bankung“) im Wirtsgestein
- Teufe
- Festigkeit des Gebirges

Auch wenn in (Herold et al. 2020c) nicht explizit Opalinuston in den Vordergrund gerückt wurde, liegen die zentralen Modellparameter in Größenordnungen, wie sie auch für Opalinuston in Deutschland auftreten können (s. Anhang 1). Die zweidimensionalen, numerischen Berechnungen ergaben folgendes:

Das Ausbausystem für Einlagerungsstrecken wurde, ähnlich der Vorgehensweise der NAGRA (Nagra 2014d), auf einen Ausbau aus Spritzbeton mit der Dicke von 30 cm festgelegt. Nach (Herold et al. 2020c) zeigt sich, dass Standfestigkeit für die Pfeiler und geringe Streckenverformungen bei neun benachbarten Einlagerungsstrecken mit folgenden Parametern erreicht werden können:

- Verhältnis von Pfeilerbreite zu Streckenbreite: 4
- Gesteinsfestigkeit: 20 MPa
- Lateraler Trennflächenabstand: 90 cm
- Teufe: 1 000 m

Damit liegt ein Indiz dafür vor, dass die technische Machbarkeit für den Bau und Betrieb von kurzlebigen Einlagerungsstrecken im Tongestein bis in eine Teufe von 1 000 m bei geringfügigem Ausbau gegeben ist. Voraussetzung ist, dass die gebirgsmechanischen Eigenschaften (Bankung, weitere Trennflächen, Festigkeit usw.) nicht allzu nachteilig ausfallen. Ein Ausbau aus Spritzbeton mit einer Dicke von 30 cm kann jedoch als planmäßig tragend bewertet werden. In (Herold et al. 2020c) wurden grundsätzlich 30 cm Spritzbeton für den Ausbau von Einlagerungsstrecken vorausgesetzt. Es wurde nicht geprüft, inwieweit die Ausbaumächtigkeit oder das Verhältnis von Pfeilerbreite zu Streckenbreite in geringeren Teufen reduziert werden kann.

Im Fall der langlebigen Grubenbaue mit Offenstandszeiten von bis zu 50 Jahren wurden in (Herold et al. 2020c) drei verschiedene Ausbausysteme einer einzelnen Strecke untersucht: einschalig, zweisechalig und zweisechalig mit nachgiebigen Elementen. Für alle drei Varianten

## Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung



| Projekt | PSP-Element | Funktion/Thema | Komponente | Baugruppe | Aufgabe | UA | Lfd.-Nr. | Rev |
|---------|-------------|----------------|------------|-----------|---------|----|----------|-----|
| NAAN    | NNNNNNNNNN  | NNAAANN        | AANNNA     | AANN      | AAAA    | AA | NNNN     | NN  |
| SG      | 0330        |                |            |           | EA      | TF | 0002     | 00  |

Blatt: 190

### Wirtsgesteinsspezifische Ermittlung der Pfeilerbreiten im Tongestein Opalinuston

konnten Teufenbereiche identifiziert werden, in denen das jeweilige Ausbausystem an seine Grenzen kommt. Die ansonsten festgelegten Randbedingungen waren die folgenden:

- Gesteinsfestigkeit: 20 MPa
- Bankung: 90 cm
- Spannungsverhältnis vertikal/horizontal: 1
- Frühzeitiger Einbau des Ausbaus 50 cm hinter der Ortsbrust

Die Ergebnisse zeigen, dass ein einschaliges, starres Ausbausystem mit einer Betondicke des Ausbaus von 55 cm unterhalb von 750 m Teufe an seine Grenzen kommt, da eine Betondruckfestigkeit nötig wird, die das bautechnisch machbare überschreitet (>> 100 MPa). Gleiches gilt für ein zweischaliges, starres Ausbausystem mit einer Gesamtbetondicke von 55 cm im Teufenbereich zwischen 750 m und 1 000 m. Erst das zweischalige Ausbausystem mit einer Gesamtdicke von 75 cm und Nachgiebigkeitselementen lässt eine ausreichende Standfestigkeit der Strecke über 50 Jahre bis in eine Teufe von 1 000 m erwarten. Die Nachgiebigkeitselemente erlauben dem Ausbau, dem aufkriechenden Gebirge in geringem Umfang nachzugeben. Die Annahme nachteiliger Gebirgseigenschaften (z. B. größere Kriechrate, Anisotropie, geringere Trennflächenabstände, geringere Gesteinsfestigkeit) kann jedoch auch solche Ausbausysteme in noch höherer Stärke notwendig machen oder an ihre Grenzen bringen. Andererseits führt der frühe Einbau des Ausbausystems schon 50 cm hinter der Ortsbrust zu einer hohen Belastung des Ausbaus, da nur eine verhältnismäßig geringfügige Vorentlastung stattfinden kann. Dadurch wird der Ausbauaufwand für die langlebigen Strecken voraussichtlich insgesamt überschätzt. Auf die Ergebnisse der rvSU hat dies jedoch keinen Einfluss, da der Ausbau der Richtstrecken nicht in die thermischen Auslegungsrechnungen eingeht und auch weiterhin die Berechnung des Endlagerflächenbedarfs nicht nennenswert beeinflusst.

Die Untersuchungen zeigen insgesamt, dass die Standfestigkeit der langlebigen Grubenbaue im Tongestein die größere Herausforderung darstellt im Vergleich zur Standfestigkeit der Einlagerungsstrecken. Ein tragender Ausbau ist bei diesen Strecken grundsätzlich anzunehmen. In kleineren Teufen wurde der Ausbau langlebiger Strecken nicht untersucht.

Für die Durchführung der rvSU sind die Erkenntnisse aus (Herold et al. 2020c) nutzbar, da sie erste Planungsannahmen für den Ausbau der Richt- und Einlagerungsstrecken ermöglichen. Dementsprechend geht die Endlagerauslegung der rvSU für Opalinuston von folgendem Ausbau aus, um die jeweiligen Strecken für ihre Betriebszeit zu stabilisieren (Tabelle 17):

# Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung



|         |             |                |            |           |         |    |          |     |
|---------|-------------|----------------|------------|-----------|---------|----|----------|-----|
| Projekt | PSP-Element | Funktion/Thema | Komponente | Baugruppe | Aufgabe | UA | Lfd.-Nr. | Rev |
| NAAN    | NNNNNNNNNN  | NNAAANN        | AANNNA     | AANN      | AAAA    | AA | NNNN     | NN  |
| SG      | 0330        |                |            |           | EA      | TF | 0002     | 00  |

Blatt: 191

## Wirtsgesteinsspezifische Ermittlung der Pfeilerbreiten im Tongestein Opalinuston

*Tabelle 17: Planungsannahmen für Streckenquerschnitte und Ausbau im Opalinuston im Rahmen der rvSU*

| Teufenbereich     | Kurzlebige Strecken  | Langlebige Strecken  |
|-------------------|--|--|
| < 750 m           | Halbbogenförmiger Streckenquerschnitt, 30 cm Spritzbeton- Ausbau | Runder Streckenquerschnitt, 55 cm starrer Betonausbau                      |
| 750 m bis 1 000 m | Halbbogenförmiger Streckenquerschnitt, 30 cm Spritzbeton- Ausbau | Runder Streckenquerschnitt, 75 cm Betonausbau mit Nachgiebigkeitselementen |

Zur Bestimmung der zulässigen Verhältnisse von Streckenbreite zu Pfeilerbreite für verschiedene Teufen gibt es international weder Berechnungsvorschriften für Tongestein im Allgemeinen, noch für Opalinuston im Besonderen. Darüber hinaus sind die Parameterunsicherheiten im Opalinuston sehr groß. Die gebirgsmechanischen Eigenschaften können sich von Standort zu Standort deutlich unterscheiden. Für die Endlagerauslegung der rvSU war es jedoch notwendig, trotz aller Unsicherheiten geometrische Festlegungen zu treffen, um eine vorläufige Endlagerfläche berechnen zu können. Dazu wurde folgender Ansatz gewählt:

Die geometrische Anordnung der Strecken im Einlagerungsbereich hat Ähnlichkeit mit dem Kammer-Pfeilerbau des klassischen Bergbaus. Hier wird die Lagerstätte zunächst durch Strecken erschlossen. Anschließend werden die Pfeiler im Rückbau abgebaut, um das Wertmineral (z. B. Steinkohle) zu gewinnen. Aus dauerhaften Stabilitätsgründen und zur Abtrennung von Bewetterungsströmen sowie als hydraulische Barriere verbleiben einige Pfeiler. Für solche Pfeiler hat (Wagner 2019) Berechnungsvorschriften und Parameter zusammengefasst, um ihre Tragfähigkeit zu berechnen.

Mit einer Abschätzung der Pfeilertragfähigkeit mit Hilfe der „Power law strength formula“ nach (Wagner 2019) und der mechanischen Einwirkung auf den Pfeiler nach (Herold et al. 2018a) lässt sich eine minimal zulässige Pfeilerbreite errechnen. Der Berechnung zu Grunde liegen eine einaxiale Druckfestigkeit des Tongesteins von 20 MPa (Hypothese auf Basis der Werte für Opalinuston in Herold et al., 2018) und eine durchschnittliche Dichte des überlagernden Gesteins von 2,5 t/m<sup>3</sup> sowie weitere Werte (nach (Wagner 2019)) für die Anwendung der Power law strength formula aus dem Steinkohlebergbau. Bei der Wahl des „Reduktionsfaktors“ wird berücksichtigt, dass die Auffahrung möglichst gebirgsschonend ausfällt und der Hohlraum frühzeitig nach Auffahrung durch einen Ausbau gestützt wird.

Wenn die mechanische Einwirkung auf den Pfeiler geringer ausfällt als seine Tragfähigkeit, kann der Pfeiler als grundsätzlich standfest gelten. In Abbildung 36 werden die minimal zulässigen Verhältnisse von Pfeilerbreite zu Streckenbreite von Einlagerungsstrecken in Abhängig-

# Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung



| Projekt | PSP-Element | Funktion/Thema | Komponente | Baugruppe | Aufgabe | UA | Lfd.-Nr. | Rev |
|---------|-------------|----------------|------------|-----------|---------|----|----------|-----|
| NAAN    | NNNNNNNNNN  | NNAAANN        | AANNNA     | AANN      | AAAA    | AA | NNNN     | NN  |
| SG      | 0330        |                |            |           | EA      | TF | 0002     | 00  |

Blatt: 192

## Wirtgesteinsspezifische Ermittlung der Pfeilerbreiten im Tongestein Opalinuston

keit von der Teufe dargestellt, für die diese Aussage zutrifft. Die zugehörigen Berechnungsformeln und eingesetzten Parameter werden im Folgenden vorgestellt. Die eingesetzten Parameter des Endlagerbergwerks basieren auf den Festlegungen aus Kapitel 4.2.6.9. Die sich ergebenden Verhältnisse von Pfeilerbreite zu Streckenbreite werden ebenfalls zur Abschätzung der Pfeilerbreiten zwischen Richtstrecken und Einlagerungsstrecken angesetzt. Dabei ist die Breite der jeweiligen Richtstrecke die bemessungsrelevante Breite für die Ermittlung der Breite des Pfeilers zwischen Richtstrecke und benachbarter Einlagerungsstrecke. Da die Richtstrecken nur einseitig von ungestörtem Gestein umgeben sind, überschätzt dieser Ansatz eher die notwendige Pfeilerbreite.

Die so ermittelten minimalen Pfeilerbreiten werden zusammen mit den numerisch berechneten Ausbausystemen (s. o.) den thermischen Analysen zugrunde gelegt.

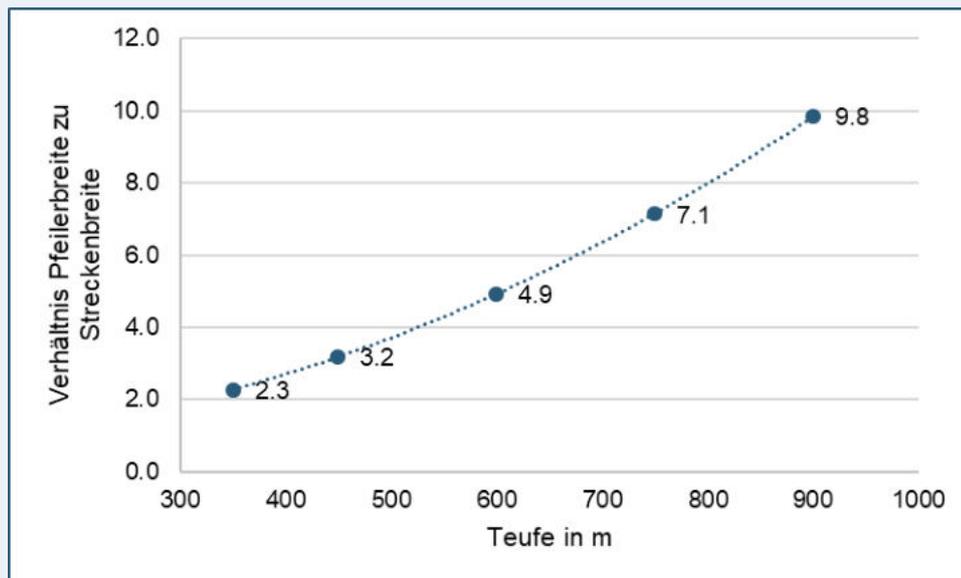


Abbildung 36: Errechnete Mindestverhältnisse von Pfeilerbreiten zu Streckenbreiten im Zusammenhang mit der Teufe

Die verwendete Formel für die Pfeilerfestigkeit nach Wagner (2019) ist:

$$\sigma_{cp} = k_{cp} \times \sigma_c \times \frac{w_{eff}^\alpha}{h^\beta} \quad (1)$$

wobei

$\sigma_{cp}$ : Pfeilerfestigkeit in MPa

$k_{cp}$ : Reduktionsfaktor, Annahme: 0,43

$\sigma_c$ : einaxiale Druckfestigkeit in MPa, Annahme: 20 MPa

$w_{eff}$ : effektive Pfeilerbreite für Pfeiler mit Länge >> Breite in m

## Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung



| Projekt | PSP-Element | Funktion/Thema | Komponente | Baugruppe | Aufgabe | UA | Lfd.-Nr. | Rev |
|---------|-------------|----------------|------------|-----------|---------|----|----------|-----|
| NAAN    | NNNNNNNNNN  | NNAAANN        | AANNNA     | AANN      | AAAA    | AA | NNNN     | NN  |
| SG      | 0330        |                |            |           | EA      | TF | 0002     | 00  |

Blatt: 193

### Wirtsgesteinsspezifische Ermittlung der Pfeilerbreiten im Tongestein Opalinuston

h: Pfeilerhöhe (entspricht Streckenhöhe einer Einlagerungsstrecke von ca. 5,1 m)

$\alpha$ : Faktor zur Anpassung des Einflusses der Pfeilerbreite auf die Pfeilerfestigkeit, Annahme: 0,46

$\beta$ : Faktor zur Anpassung des Einflusses der Pfeilerhöhe auf die Pfeilerfestigkeit, Annahme: 0,66

Die effektive Pfeilerbreite errechnet sich nach (Wagner 2019) wie folgt:

$$w_{eff} = \frac{4 \times A_P}{C_P} \quad (2)$$

wobei

$A_P$ : Grundfläche des Pfeilers in m<sup>2</sup>

$C_P$ : Umfang des Pfeilers in m

Damit wurde der erste Schritt der Pfeilerbemessung, nämlich die Pfeilerfestigkeit, errechnet. Es folgt die Berechnung der Beanspruchung des Pfeilers nach (Herold et al. 2018a):

$$\sigma_{Pfeiler} = \left(1 + \frac{b}{w}\right) \times P_0 \quad (3)$$

wobei

b: Streckenbreite von ca. 5,1 m

w: Pfeilerbreite in m

$P_0$ : lithostatischer Druck in MPa

Durch Gleichsetzung der Formeln 1 und 3 kann das Verhältnis aus Streckenbreite zu Pfeilerbreite errechnet werden, ab der gilt, dass die Pfeilertragfähigkeit der mechanischen Beanspruchung widerstehen kann. Aufgrund des rein orientierenden Charakters der Berechnung und den großen Parameterunsicherheiten werden keine Teilsicherheitsbeiwerte bei der Pfeilerbemessung berücksichtigt.

Für die Ermittlung geeigneter Teufenbereiche für die Endlagerung im Opalinuston sind die gebirgsmechanischen Verhältnisse eine wesentliche Randbedingung. Im Anhang 1 wird eine Abschätzung der günstigen Teufenbereiche für ein Endlager im Opalinuston vorgenommen.

## Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung



| Projekt | PSP-Element | Funktion/Thema | Komponente | Baugruppe | Aufgabe | UA | Lfd.-Nr. | Rev |
|---------|-------------|----------------|------------|-----------|---------|----|----------|-----|
| NAAN    | NNNNNNNNNN  | NNAAANN        | AANNNA     | AANN      | AAAA    | AA | NNNN     | NN  |
| SG      | 0330        |                |            |           | EA      | TF | 0002     | 00  |

Blatt: 194

*Beispiel 19: Wirtsgesteinsspezifische Ermittlung der Pfeilerbreiten im Steinsalz (steile Lagerung)*

### Wirtsgesteinsspezifische Ermittlung der Pfeilerbreiten im Steinsalz (steile Lagerung)

Für Steinsalz wird angesetzt, dass die minimale Pfeilerbreite das doppelte der Streckenbreite der benachbarten Strecke betragen muss. Diese Festlegung wurde bereits für eine steil lagernde Salzformation in (Bollingerfehr et al. 2012) im Rahmen der Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben (VSG) angewendet. Mit dieser Pfeilerbreite wird nach (Mehlhorn 1997) ausgeschlossen, dass sich zwei benachbarte Strecken im Steinsalz gegenseitig mechanisch beeinflussen. Der Kern der Pfeiler bleibt damit unbelastet von benachbarten Hohlräumen und standfest.

Nach Hou & Lux (2000) ist die zeitabhängige Standzeit eines Pfeilers im Salz abhängig von seinem Schlankheitsmaß und einem Formfaktor. Das Schlankheitsmaß entspricht dem Quotienten der Pfeilerbreite zur Pfeilerhöhe, während der Formfaktor aus der Pfeilerhöhe, seinem Umfang und seiner Grundfläche berechnet wird. Mit der nach Beispiel 8 angenommenen Streckenhöhe einer Einlagerungsstrecke und damit einer Pfeilerhöhe zwischen Einlagerungsstrecken von 3,7 m sowie den in Beispiel 18 festgelegten Maßen ergibt sich für die Pfeiler zwischen Einlagerungsstrecken ein Schlankheitsmaß von ca. 2,8 und ein Formfaktor von ca. 0,2. Für solche Werte liegt nach Hou & Lux (2000) die langfristige Tragfähigkeit eines Salzpfeilers bei etwa 62 MPa. Nach Formel 3 in Beispiel 18 lässt sich auch die Beanspruchung der Salzpfeiler überschlägig ermitteln. Unter Einsetzung der entsprechenden geometrischen Werte ergibt sich hier ein Wert von 55,2 MPa als Pfeilerbelastung in einer großen Teufe von 1 500 m. Da dieser Wert unterhalb der Pfeilertragfähigkeit liegt, wird die oben genannte Formel der doppelten Streckenbreite als Pfeilerbreite in den rvSU für alle Teufen verwendet. Kleinere Pfeilerbreiten sind aufgrund der notwendigen Kurvenradien am Eingang der Einlagerungsstrecken nicht zulässig. Für die den Richtstrecken benachbarten Pfeiler ist die gebirgsmechanische Situation günstiger als für die Pfeiler der Einlagerungsstrecken, da das Schlankheitsmaß noch deutlich größer ausfällt und die Richtstrecken nur einseitig von weiteren Hohlräumen umgeben sind.

# Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung



| Projekt | PSP-Element | Funktion/Thema | Komponente | Baugruppe | Aufgabe | UA | Lfd.-Nr. | Rev |
|---------|-------------|----------------|------------|-----------|---------|----|----------|-----|
| NAAN    | NNNNNNNNNN  | NNAAANN        | AANNNA     | AANN      | AAAA    | AA | NNNN     | NN  |
| SG      | 0330        |                |            |           | EA      | TF | 0002     | 00  |

Blatt: 195

## 4.2.8 Vorläufige Prognose der Endlagerflächenbedarfe

### 4.2.8.1 Einführung

Im Rahmen der rvSU des Standortauswahlverfahrens ist eine vorläufige Prognose der benötigten Flächenbedarfe für Endlager in den verschiedenen Wirtsgesteinen notwendig. In den folgenden Abschnitten wird die Vorgehensweise zur rechnerischen Abschätzung der Endlagerflächenbedarfe in Abhängigkeit der Entwurfsgrößen Temperatur im Einlagerungsbereich vor Einlagerungsbeginn  $T_{EB}$  sowie der Zielteufe des Endlagers vorgestellt. Der Schwerpunkt liegt hierbei auf der numerischen Analyse des Temperaturfelds im Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle. Hierzu erfolgt die Simulation der thermischen Verhältnisse im Nahfeld der Endlagergebäude mit dem Ziel der Ermittlung der möglichen Behälterbeladung unter Einhaltung der gemäß § 27 Abs. 4 StandAG aus Vorsorgegründen angenommenen maximalen Temperatur von 100 °C an der Behälteraußenwand. Basierend auf der Prognose möglicher Behälterbeladungen erfolgt unter Berücksichtigung der Abfallmengen die Ermittlung der Anzahl der benötigten Endlagergebäude. Anschließend erfolgt die vorläufige Prognose des kumulierten Endlagerflächenbedarfs.

Das Schema zur Prognose der Endlagerflächen ist in Abbildung 37 dargestellt. Die thermischen Simulationsberechnungen werden ausschließlich für Abfallarten mit signifikanter Wärmeleistung (bestrahlte Brennelemente aus Leistungsreaktoren sowie verglaste Abfälle aus der Wiederaufarbeitung) durchgeführt und erfolgen mittels Finite Elemente Methode (FEM). Das verwendete Simulationsmodell inkl. der zugehörigen Eingangsgrößen wird in den folgenden Abschnitten beschrieben. Die darauf aufbauende Methodik zur Ermittlung der kumulierten Endlagerflächen und die resultierenden Ergebnisse werden in Kapitel 4.2.8.7 beschrieben. In die Berechnung der kumulierten Endlagerflächen gehen die Flächenbedarfe für Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmefreisetzung (bestrahlte Kernbrennstoffe aus Forschungsreaktoren) und weitere Flächenbedarfe (im Wesentlichen für Infrastrukturflächen und Flächen aufgrund von Sicherheitsabständen) mit ein.

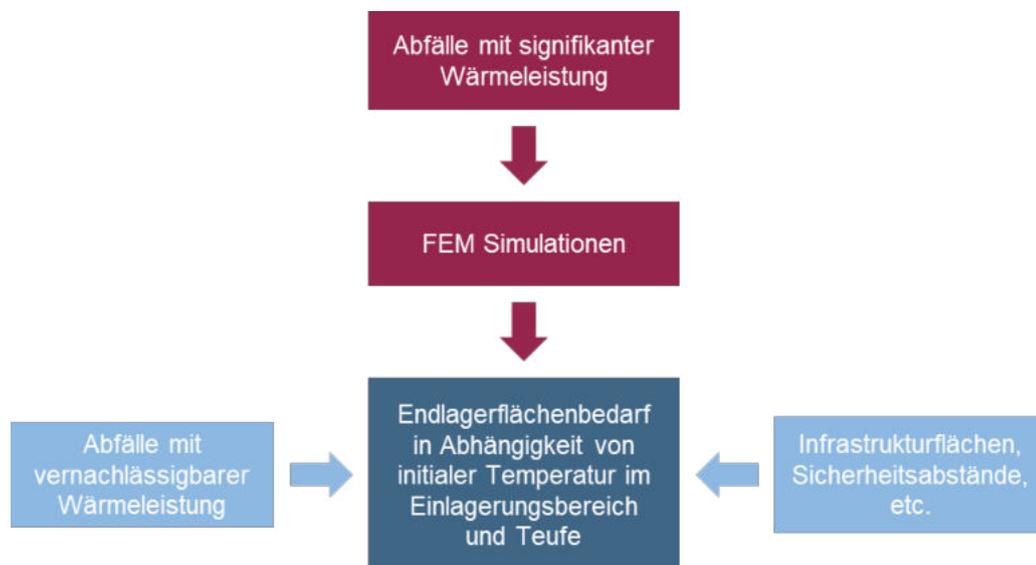


Abbildung 37: Eingangsgrößen des kumulierten Endlagerflächenbedarfs

## Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung



|         |             |                |            |           |         |    |          |     |            |
|---------|-------------|----------------|------------|-----------|---------|----|----------|-----|------------|
| Projekt | PSP-Element | Funktion/Thema | Komponente | Baugruppe | Aufgabe | UA | Lfd.-Nr. | Rev | Blatt: 196 |
| NAAN    | NNNNNNNNNN  | NNAAANN        | AANNNA     | AANN      | AAAA    | AA | NNNN     | NN  |            |
| SG      | 0330        |                |            |           | EA      | TF | 0002     | 00  |            |

Der sichere Einschluss der hochradioaktiven Abfälle im Endlager wird wie in Kapitel 4.1 dargestellt, durch ein sogenanntes Multibarrierensystem gewährleistet. Hierbei handelt es sich um ein gestaffeltes System von Einzelkomponenten, dessen Systemverhalten in numerischen Berechnungsmodellen häufig nur unter der Berücksichtigung einer Vielzahl gekoppelter physikalischer Prozesse möglichst vollständig abgebildet werden kann. In diesem Zusammenhang können daher in Abhängigkeit des betrachteten Wirtsgesteins neben thermischen, auch hydraulische, mechanische und chemische Prozesse relevant sein. Auf Grund des hohen Abstraktionsgrad der zugrundeliegenden, vorläufigen Auslegung des Endlagers und mangelnder Detailkenntnisse der Geologie in der aktuellen Phase der rvSU, werden in den numerischen Berechnungen zunächst vereinfachend nur thermische Prozesse berücksichtigt.

### 4.2.8.2 Abfallinventar und Wärmeleistung

In diesem Abschnitt wird auf die für die Flächenbedarfsberechnungen relevanten Kenngrößen des Abfallinventars näher eingegangen. Übergeordnete Angaben zum Abfallinventar finden sich in Kapitel 2.

Eine besonders wichtige Größe für die Endlagerflächenberechnung stellt hierbei das Abfallmengerüst dar. In Tabelle 18 sind die Mengen von Brennelementen bzw. Kokillen für Abfallarten mit signifikanter Wärmefreisetzungsrate aufgeführt. Wie in Kapitel 2 dargestellt, müssen in Deutschland keine CSD-B & CSD-C Kokillen endgelagert werden.

*Tabelle 18: Mengengerüst für Abfälle mit signifikanter Wärmeleistung*

| Abfallart                  | Anzahl Brennelemente / Kokillen |
|----------------------------|---------------------------------|
| DWR-UOX                    | 12 450                          |
| DWR-MOX                    | 1 530                           |
| SWR-UOX                    | 14 350                          |
| SWR-MOX                    | 1 250                           |
| WWER                       | 5 050                           |
| CSD-V (inkl. UK-HAW + WAK) | 3 864                           |

Neben den signifikant wärmeentwickelnden Abfallarten müssen außerdem noch Abfälle aus dem Betrieb deutscher Forschungsreaktoren endgelagert werden. Für diese Abfallarten werden in der aktuellen Phase die entsprechenden TLB als Endlagerbehälter angenommen (siehe Kapitel 4.2.6.2). Die zugehörige Anzahl an TLB ist in Tabelle 19 dargestellt. Da diese Inventararten eine vernachlässigbare Wärmeleistung aufweisen, werden sie in den numerischen Simulationsberechnungen nicht berücksichtigt. Die Mengen der jeweiligen TLB fließen stattdessen direkt in die kumulierten Endlagerflächenberechnungen mit ein.

## Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung



|         |             |                |            |           |         |    |          |     |            |
|---------|-------------|----------------|------------|-----------|---------|----|----------|-----|------------|
| Projekt | PSP-Element | Funktion/Thema | Komponente | Baugruppe | Aufgabe | UA | Lfd.-Nr. | Rev | Blatt: 197 |
| NAAN    | NNNNNNNNNN  | NNAAANN        | AANNNA     | AANN      | AAAA    | AA | NNNN     | NN  |            |
| SG      | 0330        |                |            |           | EA      | TF | 0002     | 00  |            |

*Tabelle 19: Mengengerüst für Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeleistung*

| Abfallart        | Anzahl TLB |
|------------------|------------|
| CASTOR® THTR/AVR | 457        |
| CASTOR® KNK      | 4          |
| CASTOR® MTR2     | 18         |
| CASTOR® MTR3     | 48         |

Anhand des Abfallmengengerüsts ist ersichtlich, dass der prognostizierte Flächenbedarf des Endlagers entscheidend von den Abfällen mit signifikanter Wärmeleistung abhängt. Die dabei zu berücksichtigende Wärmeleistung hängt neben der Inventarart auch maßgeblich von der Abklingzeit der Abfälle zum Zeitpunkt der Einlagerung ab. In Übereinstimmung mit dem geplanten Prozess zum Standortauswahlverfahren wird für die numerischen Berechnungen in den rvSU das Jahr 2050 als Zeitpunkt der ersten Einlagerung ausgewählt. Auf Basis dieser Annahmen werden für die Simulationsberechnungen repräsentative Abklingdauern festgelegt, welche Tabelle 20 entnommen werden können. Die repräsentativen Abklingdauern werden dabei hinreichend konservativ abgeschätzt. Für die angesetzten Abklingdauern wird insbesondere ein für jede Abfallart abdeckender Gesamtwärmeeintrag gewährleistet.

*Tabelle 20: Repräsentative Abklingdauer für die wärmeentwickelnden Abfallarten*

| Abfallart                  | Repräsentative Abklingdauer in a |
|----------------------------|----------------------------------|
| DWR-UOX                    | 32                               |
| DWR-MOX                    | 32                               |
| SWR-UOX                    | 32                               |
| SWR-MOX                    | 37                               |
| WWER                       | 57                               |
| CSD-V (inkl. UK-HAW + WAK) | 52                               |

Im Rahmen der VSG wurden Abbrandrechnungen durchgeführt, aus denen die zeitliche Wärmefreisetzung der einzelnen Abfallarten folgt. Die zeitlichen Verläufe der für die Simulationen zugrunde gelegten Wärmeleistung pro Brennelement bzw. Kokille sind in Abbildung 38 dargestellt.

# Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung

| Projekt | PSP-Element | Funktion/Thema | Komponente | Baugruppe | Aufgabe | UA | Lfd.-Nr. | Rev |
|---------|-------------|----------------|------------|-----------|---------|----|----------|-----|
| NAAN    | NNNNNNNNNN  | NNAAANN        | AANNNA     | AANN      | AAAA    | AA | NNNN     | NN  |
| SG      | 0330        |                |            |           | EA      | TF | 0002     | 00  |

Blatt: 198

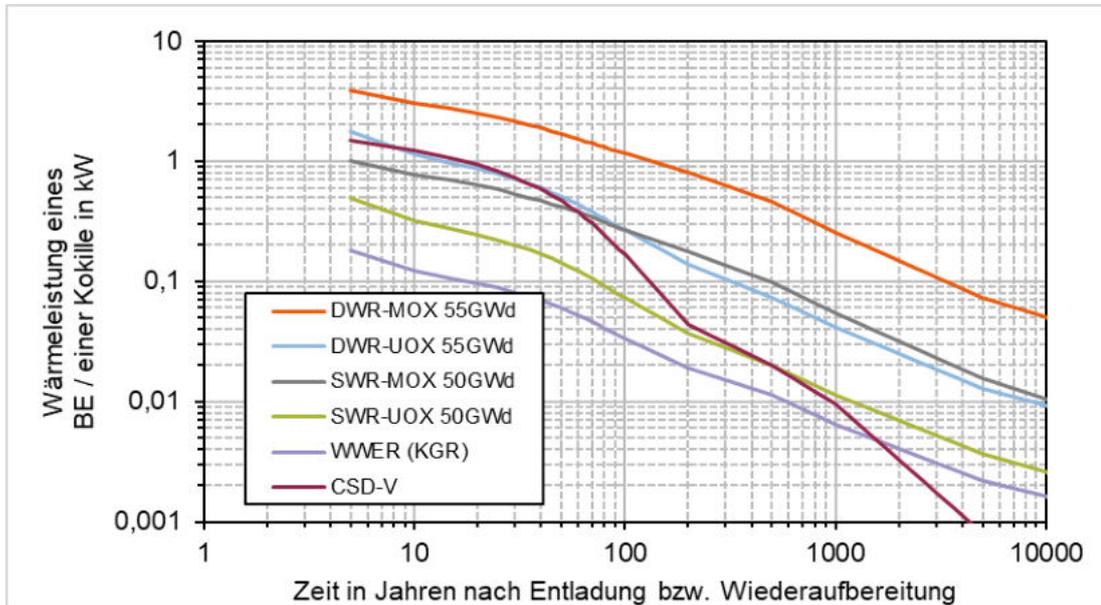


Abbildung 38: Zugrunde gelegte Wärmeleistung von bestrahlten Brennelementen und Kokillen in Abhängigkeit der Abklingzeit auf Basis der Daten der VSG (Peiffer et al. 2012)

### 4.2.8.3 Behälter- und Einlagerungskonzept

Im Kapitel 4.2.6.2 wird das zugrunde gelegte vorläufige Behälter- und Einlagerungskonzept für das Endlagersystem Typ 1 beschrieben. In diesem Abschnitt wird daher primär auf diejenigen Aspekte näher eingegangen, die für die numerischen Berechnungen relevant sind.

Da für die Endlagerung von HAA in Deutschland keine Behälterkonzepte existieren, die anhand aktueller Anforderungen entwickelt wurden, ist die dezidierte Modellierung einer potenziell komplexen Behälterstruktur in den Simulationsrechnungen nicht möglich. Aus diesem Grund werden in den Simulationsrechnungen vereinfachte repräsentative Ersatzmodelle der Behälter verwendet. Dazu werden die Behälter mittels zweier Teilvolumina abgebildet. Beispielhaft ist diese Vorgehensweise in Abbildung 39 skizziert.

Das innere Teilvolumen bildet den Behälterkorb ab und umfasst die radioaktiven Abfälle, die Strukturkomponenten, welche die Abfälle im Behälter aufnehmen und mögliche Verfüllmaterialien. Das äußere Teilvolumen repräsentiert die idealisierte Behälterhülle, mittels derer der Innen- sowie Außenbehälter, die zugehörigen Verschlussdeckel sowie ggf. Moderatorstäbe und Tragzapfen fiktiv zusammengefasst werden. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass das vereinfachte Behältermodell als symmetrisch angenommen wird, weshalb für den Behälterdeckel und die Wandstärke am Boden ein identischer, gemittelter Wert angesetzt wird. Die zugehörigen Geometrie Kennwerte für den Innen- und Außendurchmesser  $DI$  bzw.  $DA$ , die Innen- und Außenlänge  $LI$  und  $LA$ , sowie das Maß  $LD$  sind in Tabelle 21 dargestellt.

# Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung

|         |             |                |            |           |         |    |          |     |            |
|---------|-------------|----------------|------------|-----------|---------|----|----------|-----|------------|
| Projekt | PSP-Element | Funktion/Thema | Komponente | Baugruppe | Aufgabe | UA | Lfd.-Nr. | Rev | Blatt: 199 |
| NAAN    | NNNNNNNNNN  | NNAAANN        | AANNNA     | AANN      | AAAA    | AA | NNNN     | NN  |            |
| SG      | 0330        |                |            |           | EA      | TF | 0002     | 00  |            |

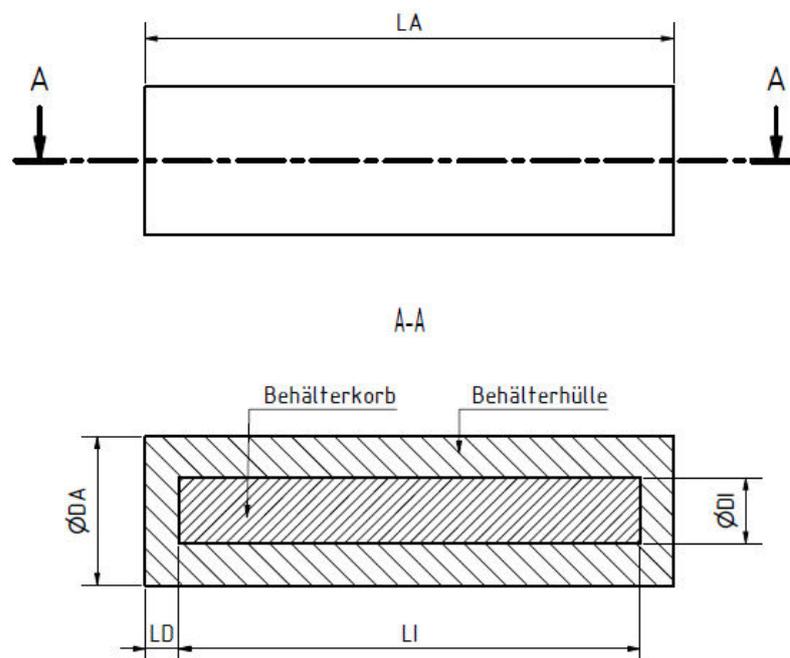


Abbildung 39: Skizze des vereinfachten Behältermodells für die Simulationen

Tabelle 21: Geometriedaten für vereinfachtes Behältermodell in den Simulationen

| Behältertyp  | DI<br>in mm | DA<br>in mm | LD<br>in mm | LI<br>in mm | LA<br>in mm |
|--|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Behälter für Brennstäbe aus Leistungsreaktoren im Tongestein | 378         | 1 100       | 489,5       | 4 538       | 5 517       |
| Behälter für Brennstäbe aus Leistungsreaktoren im Steinsalz  | 690         | 1 560       | 489,5       | 4 538       | 5 517       |
| Behälter für CSD-V Kokillen im Tongestein und Steinsalz      | 473         | 1 560       | 532,5       | 1 335       | 2 400       |

Die angewandten thermophysikalischen Materialparameter für die beiden Teilvolumina des vereinfachten Behältermodells sind in Tabelle 22 aufgeführt. Hierbei ist zu beachten, dass diese Parameter Schätzwerte darstellen, da derzeit keine konkreten Behälterkonzepte vorliegen und sie somit zwangsläufig mit einer Ungewissheit verbunden sind. Insbesondere werden die Materialeigenschaften vieler potenziell vorhandener Behälter- und Ausbauteile im Rahmen der geometrischen Vereinfachung in lediglich zwei Teilvolumina homogenisiert.

## Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung



|         |             |                |            |           |         |    |          |     |            |
|---------|-------------|----------------|------------|-----------|---------|----|----------|-----|------------|
| Projekt | PSP-Element | Funktion/Thema | Komponente | Baugruppe | Aufgabe | UA | Lfd.-Nr. | Rev | Blatt: 200 |
| NAAN    | NNNNNNNNNN  | NNAAANN        | AANNNA     | AANN      | AAAA    | AA | NNNN     | NN  |            |
| SG      | 0330        |                |            |           | EA      | TF | 0002     | 00  |            |

**Tabelle 22:** Thermophysikalische Materialparameter für das vereinfachte Behältermodell

| Komponente    | Material  | Dichte $\rho$<br>in kg/m <sup>3</sup> | Spez. Wärmekapazität $c_p$<br>in J/kg/K | Wärmeleitfähigkeit $\lambda$<br>in W/m/K |
|---------------|---|---------------------------------------|---|--|
| Behälterhülle | Feinkornbaustahl,<br>Bohrungen mit<br>Polythylenstäben          | 7 500                                 | 500                                     | 35                                       |
| Behälterkorb  | Sphäroguss, Ma-<br>terialien der<br>Brennelemente /<br>Kokillen | 7 500                                 | 250                                     | 17,5                                     |

Darüber hinaus sind die in Kapitel 4.2.6.2 definierten, maximal realisierbaren Behälterbeladungen als Nebenbedingung für die Entwurfsgröße Behälterbeladung relevant, siehe Tabelle 23.

**Tabelle 23:** Technisch maximal mögliche Behälterbeladungen entsprechend der Behälterannahmen für Tongestein und Steinsalz

| Abfallart | Maximale Beladung in Anzahl BE<br>bzw. Kokillen für Behälter im Ton-<br>gestein | Maximale Beladung in Anzahl BE<br>bzw. Kokillen für Behälter im<br>Steinsalz |
|-----------|---|--|
| DWR       | 3   | 10   |
| SWR       | 9   | 30   |
| WWER      | 7,5   | 25   |
| CSD-V     | 3   | 3  |

Als Art der Einlagerung der Endlagerbehälter wird in den vorläufigen Auslegungen des Endlagers im Tongestein sowie im Steinsalz das Konzept der Streckenlagerung zugrunde gelegt, siehe Kapitel 4.2.5. Im Folgenden werden diesbezüglich die wesentlichen Komponenten identifiziert und deren zugehörige thermophysikalischen Materialparameter abgeschätzt. Für poröse Medien werden hierbei immer die effektiven Materialparameter angegeben.

In Beispiel 20 und *Beispiel 21* werden die Modellannahmen hinsichtlich der Einlagerungskonzepte entsprechend der vorläufigen Endlagersauslegung im Tongestein und Steinsalz dargestellt.

# Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung



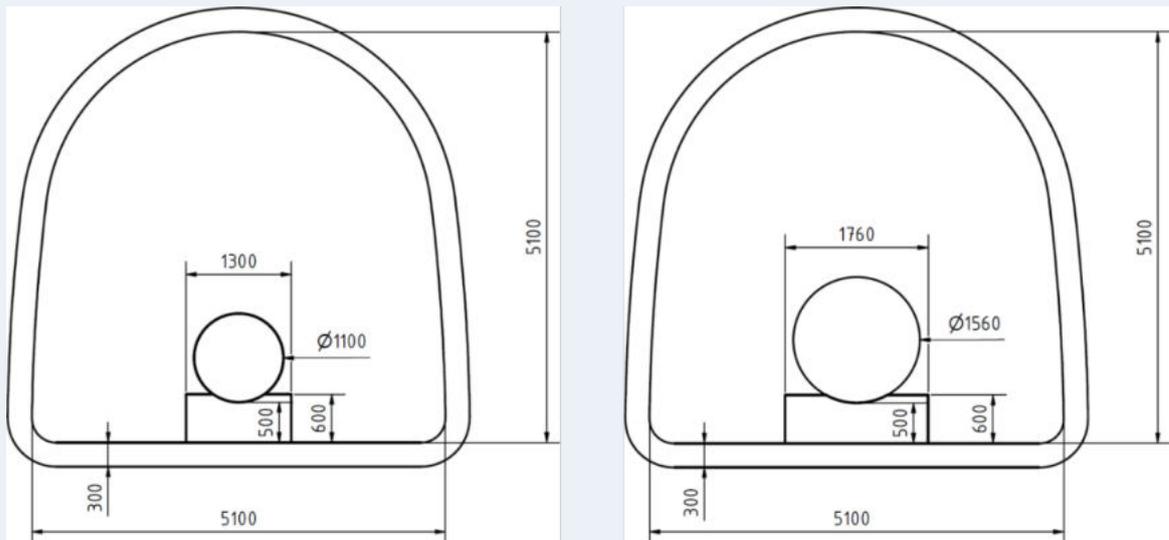
| Projekt | PSP-Element | Funktion/Thema | Komponente | Baugruppe | Aufgabe | UA | Lfd.-Nr. | Rev |
|---------|-------------|----------------|------------|-----------|---------|----|----------|-----|
| NAAN    | NNNNNNNNNN  | NNAAANN        | AANNNA     | AANN      | AAAA    | AA | NNNN     | NN  |
| SG      | 0330        |                |            |           | EA      | TF | 0002     | 00  |

Blatt: 201

*Beispiel 20: Einlagerungskonzept entsprechend der vorläufigen Endlagerauslegung im Tongestein Opalinuston*

## Einlagerungskonzept entsprechend der vorläufigen Endlagerauslegung im Tongestein Opalinuston

Das zugehörige Streckenprofil inkl. eines Endlagerbehälters für eine vorläufige Auslegung des Endlagers im Tongestein ist schematisch in Abbildung 40 dargestellt. Zusätzliche Angaben wie z. B. die exakten Abmessungen finden sich in Kapitel 4.2.5. Der Endlagerbehälter liegt auf einem Auflagesockel. Der Rest der Strecke wird mit dem sog. Buffer aufgefüllt, der im Falle eines Behälterdefektes die Migration der Radionuklide verlangsamen soll. Darüber hinaus ist ein Streckenausbau aus einer 30 cm dicken Spritzbetonschicht vorgesehen. Das umgebende Gestein im einschlusswirksamen Gebirgsbereich ist der Opalinuston. Die in den Simulationen verwendeten Materialparameter sind in Tabelle 24 dargestellt.



**Abbildung 40:** *Beispielhafte Darstellung des Streckenquerschnitts (mit Ausbau) für ein Endlager im Tongestein und Gebinde mit bestrahlten Brennelementen (links) und Gebinde mit CSD-V Kokillen (rechts)*

Da die zu verwendenden quellfähigen Tonminerale für den Behältersockel und den Buffer zum gegenwärtigen Zeitpunkt noch nicht genau festgelegt wurden, werden ersatzweise Materialkennwerte für Bentonit verwendet. Die thermophysikalischen Materialparameter für den Opalinuston und den Bentonit wurden aus Daten abgeschätzt, die im Rahmen von Projekten des Mont Terri Felslabors (Schweiz) gewonnen wurden und u. a. in (Bossart et al. 2017; Gaus et al. 2014) dokumentiert sind. Die Eigenschaften dieser beiden Materialien hängen in starkem Umfang vom jeweiligen Sättigungsgrad ab. Da zum gegenwärtigen Zeitpunkt keine hydraulischen Berechnungen durchgeführt werden, müssen Annahmen hinsichtlich des Sättigungsgrads getroffen werden.

# Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung



|         |             |                |            |           |         |    |          |     |            |
|---------|-------------|----------------|------------|-----------|---------|----|----------|-----|------------|
| Projekt | PSP-Element | Funktion/Thema | Komponente | Baugruppe | Aufgabe | UA | Lfd.-Nr. | Rev | Blatt: 202 |
| NAAN    | NNNNNNNNNN  | NNAAANN        | AANNNA     | AANN      | AAAA    | AA | NNNN     | NN  |            |
| SG      | 0330        |                |            |           | EA      | TF | 0002     | 00  |            |

## Einlagerungskonzept entsprechend der vorläufigen Endlagerauslegung im Tongestein Opalinuston

Es ist davon auszugehen, dass der Opalinuston im einschlusswirksamen Gebirgsbereich vor der Auffahrung der Strecken vollständig gesättigt vorliegt. Auf Grund der beabsichtigten kurzen Offenhaltungszeit der Einlagerungsstrecken und der Distanz zum Behälter wird der Opalinuston auch in den Berechnungen als vollständig gesättigt angenommen. Für die Wärmeleitfähigkeit des Opalinuston wird ein transversal isotropes Materialverhalten zugrunde gelegt, daher ergeben sich unterschiedliche Werte parallel (||) und senkrecht (⊥) zur Schichtung. Für den Bentonit wird angenommen, dass dieser im Fall des Behältersockels in kompaktierter Form vorliegt. Für den Buffer werden in der vorläufigen Endlagerauslegung im Tongestein zwei verschiedene Optionen vorgeschlagen, die Einbringung in Form von Formsteinen sowie alternativ als Granulat. Im Folgenden wird ein Buffer aus Formsteinen betrachtet. Aus Konservativitätsgründen werden die Materialparameter für den Bentonit unter der Annahme eines trockenen Zustands abgeschätzt. In einem späteren Stadium der Endlagerauslegung ist eine Erweiterung auf thermo-hydraulische Berechnungen anzustreben, um die Prognosegenauigkeit zu erhöhen.

*Tabelle 24: Thermophysikalische Materialparameter, abgeschätzt für eine vorläufige Endlagerauslegung im Tongestein am Beispiel des Opalinuston*

| Komponente     | Material               | Dichte $\rho$<br>in $\text{kg/m}^3$ | Spez. Wärmekapazität $c_p$<br>in $\text{J/kg/K}$ | Wärmeleitfähigkeit $\lambda$ in $\text{W/m/K}$ |
|----------------|------------------------|-------------------------------------|--|--|
| ewG            | Opalinuston            | 2 450                               | 1 000  | : 2,1<br>⊥ : 1,2                               |
| Buffer         | Kompaktierter Bentonit | 1 806                               | 1 058  | 0,8  |
| Behältersockel | Kompaktierter Bentonit | 1 806                               | 1 058  | 0,8  |
| Streckenausbau | Spritzbeton            | 2 355                               | 1 102  | 1,86   |

## Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung



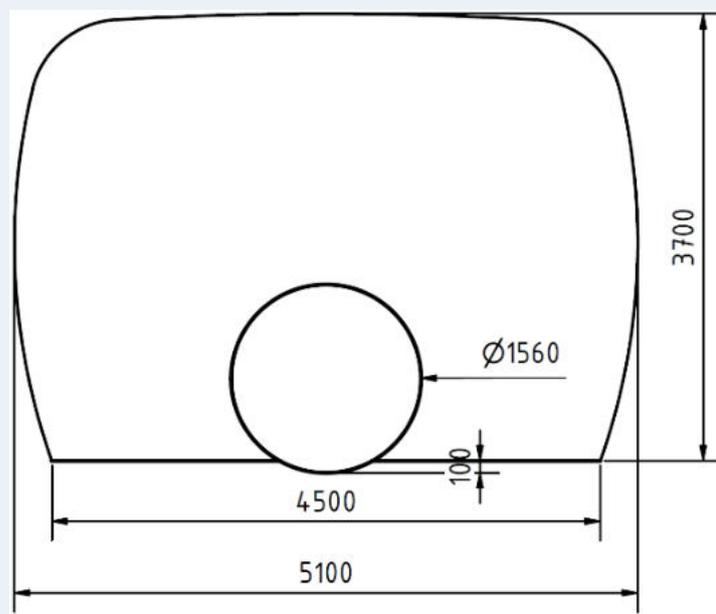
| Projekt | PSP-Element | Funktion/Thema | Komponente | Baugruppe | Aufgabe | UA | Lfd.-Nr. | Rev |
|---------|-------------|----------------|------------|-----------|---------|----|----------|-----|
| NAAN    | NNNNNNNNNN  | NNAAANN        | AANNNA     | AANN      | AAAA    | AA | NNNN     | NN  |
| SG      | 0330        |                |            |           | EA      | TF | 0002     | 00  |

Blatt: 203

*Beispiel 21: Einlagerungskonzept entsprechend der vorläufigen Endlagerauslegung im Steinsalz (steile Lagerung)*

### Einlagerungskonzept entsprechend der vorläufigen Endlagerauslegung im Steinsalz (steile Lagerung)

Das Streckenprofil einer Einlagerungsstrecke für eine vorläufige Endlagerauslegung im Steinsalz ist in Abbildung 41 zu sehen. Der Behälter liegt hierbei in einer Mulde, welche wenige Zentimeter tief in die Sohle gefräst wurde. Nach der Einlagerung der Gebinde wird die Strecke mit trockenem Salzgrus versetzt.



*Abbildung 41: Beispielhafte Darstellung des Streckenquerschnitts für ein Endlager im Steinsalz und Gebinde mit bestrahlten Brennelementen oder CSD-V Kokillen*

Die thermophysikalischen Parameter für das Steinsalz und den Salzgrus werden auf Basis von Daten aus den Veröffentlichungen (Heemann et al. 2014; Europäische Kommission et al. 2004) abgeschätzt, siehe Tabelle 25. Für den Salzgrusversatz wird eine zeitlich konstante Porosität von 0,3 angesetzt. Hierbei handelt es sich um eine konservative Abschätzung, da auf Grund der Gebirgskonvergenz eine zeitliche Kompaktion des Salzgrusversatzes stattfindet. Die Salzgruskompaktion wird in den Simulationen innerhalb der rvSU aufgrund des beträchtlichen rechentechnischen Mehraufwands nicht abgebildet. Längerfristig ist aber eine Erweiterung der Simulationen um thermo-mechanische Prozesse geplant.

# Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung



| Projekt | PSP-Element | Funktion/Thema | Komponente | Baugruppe | Aufgabe | UA | Lfd.-Nr. | Rev |
|---------|-------------|----------------|------------|-----------|---------|----|----------|-----|
| NAAN    | NNNNNNNNNN  | NNAAANN        | AANNNA     | AANN      | AAAA    | AA | NNNN     | NN  |
| SG      | 0330        |                |            |           | EA      | TF | 0002     | 00  |

Blatt: 204

## Einlagerungskonzept entsprechend der vorläufigen Endlagerauslegung im Steinsalz (steile Lagerung)

*Tabelle 25: Thermophysikalische Materialparameter, abgeschätzt für eine vorläufige Endlagerauslegung im Steinsalz*

| Komponente      | Material                | Dichte $\rho$ in $\text{kg/m}^3$ | Spez. Wärmekapazität $c_p$ in $\text{J/kg/K}$ | Wärmeleitfähigkeit $\lambda$ in $\text{W/m/K}$ |
|-----------------|-------------------------|----------------------------------|---|--|
| ewG             | Steinsalz<br>(z2-Folge) | 2 177                            | 875   | 5  |
| Streckenversatz | Salzgrus                | 1 524                            | 875   | 1  |

### 4.2.8.4 Auslegungsstrategie

In Bezug auf das Layout des Endlagerbergwerks existieren viele Freiheitsgrade, die einen direkten Einfluss auf die resultierenden, abfallspezifischen Flächenbedarfe haben. Aus diesem Grund ist es notwendig, eine geeignete Auslegungsstrategie festzulegen, in der das gewünschte Optimierungsziel, sowie die zu erfüllenden Nebenbedingungen definiert werden. In dieser Arbeit liegt der Fokus auf einer Minimierung der Flächenbedarfe unter der Berücksichtigung bergbaulicher Grenzen. In den Simulationsmodellen bestehen die primären Entwurfsvariablen im Allgemeinen aus der Behälterbeladung, dem Strecken- und dem Behälterabstand.

Zudem stellt die maximal zulässige Temperatur an der Behälteraußenwand eine der wesentlichen Nebenbedingungen der Auslegungsrechnungen dar. Gemäß § 27 Abs. 4 StandAG soll die Temperatur an der Außenfläche des Endlagerbehälters 100 °C vorsorglich nicht überschreiten, solange aufgrund von Forschungsarbeiten keine abweichenden Festlegungen für die einzelnen Wirtsgesteine getroffen wurden.

In Vorstudien hat sich gezeigt, dass üblicherweise ein minimaler, abfallspezifischer Flächenbedarf erzielt werden kann, indem die geometrischen Abmessungen (Strecken- und Behälterabstand) klein gewählt werden. Daher werden die Strecken- und Behälterabstände für die Berechnungen innerhalb der rvSU nicht als freie Entwurfsvariablen gehandhabt, sondern Festlegungen getroffen, die das Kriterium eines minimalen, abfallspezifischen Flächenbedarfs berücksichtigen. In Beispiel 22 werden die genannten Entwurfsgrößen für die vorläufige Endlagerauslegung im Tongestein und Steinsalz dargestellt.

## Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung



| Projekt | PSP-Element | Funktion/Thema | Komponente | Baugruppe | Aufgabe | UA | Lfd.-Nr. | Rev |
|---------|-------------|----------------|------------|-----------|---------|----|----------|-----|
| NAAN    | NNNNNNNNNN  | NNAAANN        | AANNNA     | AANN      | AAAA    | AA | NNNN     | NN  |
| SG      | 0330        |                |            |           | EA      | TF | 0002     | 00  |

Blatt: 205

*Beispiel 22: Strecken- und Behälterabstände entsprechend der vorläufigen Endlagerauslegung für das Tongestein Opalinuston und Steinsalz (steile Lagerung).*

### Strecken- und Behälterabstände entsprechend der vorläufigen Endlagerauslegung für das Tongestein Opalinuston und Steinsalz (steile Lagerung)

Der Mindeststreckenabstand zwischen Einlagerungsstrecken, der auf Grund bergbaulicher Überlegungen nicht unterschritten werden darf, wird im Kapitel 4.2.7 für eine vorläufige Endlagerauslegung im Tongestein und im Steinsalz definiert. In Tabelle 26 ist zu sehen, dass die resultierenden Mindeststreckenabstände im Tongestein stark abhängig von der betrachteten Teufe sind. Für das Steinsalz folgt entsprechend der vorläufigen Auslegung des Endlagers ein über den betrachteten Teufenbereich konstanter Wert von 15,3 m. Die bergbaulich getriebenen Mindeststreckenabstände werden gemäß der vorläufigen Endlagerplanung als Eingangsgrößen für die Streckenabstände in den Simulationsmodellen übernommen.

*Tabelle 26: Mindeststreckenabstände zwischen Einlagerungsstrecken für eine vorläufige Endlagerauslegung im Tongestein Opalinuston (Abstand Streckenmitte zu Streckenmitte)*

| Teufe in m | Streckenabstand in m |
|------------|----------------------|
| 350        | 16,7                 |
| 450        | 21,4                 |
| 600        | 30,3                 |
| 750        | 41,5                 |
| 900        | 55,3                 |

Eine weitere wichtige Eingangsgröße für die Berechnung der Endlagerflächenbedarfe ist der Behälterabstand. In Kapitel 4.2.6.4.2 wurde sowohl im Tongestein als auch im Steinsalz ein Mindestbehälterabstand von 1 m vorgeschlagen. Für die signifikant wärmeentwickelnden Abfallarten wird in den Simulationsrechnungen ein größerer Behälterabstand von 2,5 m verwendet, um ausreichend Sicherheitsreserven z. B. für die Platzierung der Behälter oder etwaige Veränderungen am Versatzmaterial vorzusehen.

Die Behälterbeladung wird als freier Parameter definiert und im Rahmen der thermischen Auslegungsrechnungen ermittelt. Die maximale Behälterbeladung wird dabei so berechnet, dass die Grenztemperatur an der Behälteraußenwand von 100 °C über den gesamten Bewertungszeitraum nicht überschritten wird. Die Behälterbeladung ist zudem begrenzt durch die behälterspezifische, baulich realisierbare Maximalbeladung, die Tabelle 23 zu entnehmen ist.

## Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung



| Projekt | PSP-Element | Funktion/Thema | Komponente | Baugruppe | Aufgabe | UA | Lfd.-Nr. | Rev |
|---------|-------------|----------------|------------|-----------|---------|----|----------|-----|
| NAAN    | NNNNNNNNNN  | NNAAANN        | AANNNA     | AANN      | AAAA    | AA | NNNN     | NN  |
| SG      | 0330        |                |            |           | EA      | TF | 0002     | 00  |

Blatt: 206

Bei der Ermittlung der möglichen Behälterbeladung werden nicht nur positive ganze Zahlen, sondern ein kontinuierliches Wertespektrum zugelassen, da die Behälterbeladungen im Sinne eines Indikators für die zulässige, äquivalente Wärmeleistung interpretiert werden können. Eine geeignete Behälterbeladung könnte in der Praxis z. B. durch Mischung von Inventaren unterschiedlicher Abklingzeit oder durch das Zerlegen von Brennelementen erreicht werden und könnte z. B. ein Aspekt späterer Optimierungsprozesse sein.

Die gewählte Auslegungsstrategie kann unter Umständen zu verhältnismäßig geringen Behälterbeladungen führen, sodass die Behälterkapazitäten nicht optimal ausgenutzt werden. Daher ist es denkbar, mit steigendem Detaillierungsgrad der Endlagerplanung auch ein gemischtes Optimierungsziel vorzusehen, welches zusätzlich zur Minimierung des Flächenbedarfs z. B. auch eine Maximierung der Behälterbeladung unter Annahme eines relativen Gewichtungsfaktors enthält.

### 4.2.8.5 Simulationsmodell

Für die Simulationsberechnungen kommt zum aktuellen Zeitpunkt die Open Source FEM Software CalculiX (Dhondt 2004) zum Einsatz. Perspektivisch werden die numerischen Berechnungen voraussichtlich primär mit der Open Source FEM Software OpenGeoSys (Bilke et al. 2019; Kolditz et al. 2012) durchgeführt, mittels derer gekoppelte thermische, hydraulische, mechanische und chemische Prozesse abgebildet werden können.

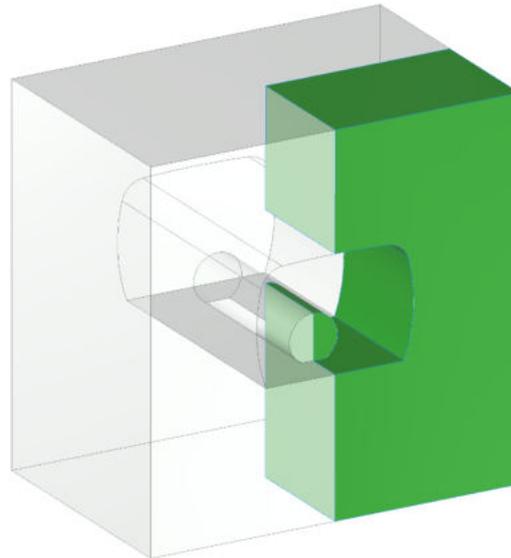
In Bezug auf die thermischen Berechnungen ist anzunehmen, dass die Wärmeübertragung größtenteils mittels Wärmeleitung erfolgt und daher Anteile aus Konvektion sowie Wärmestrahlung vernachlässigt werden können. Aus diesem Grund dient die instationäre Wärmeleitungsgleichung als Basis der hier gezeigten Berechnungen, mittels derer die zeitliche Entwicklung des Temperaturfelds im Behälternahfeld und im umgebenden Wirtsgestein ermittelt werden.

Durch die gezielte Ausnutzung von Symmetrieeigenschaften ist es möglich, die Berechnungen mit einem Viertelmodell durchzuführen. Der Übergang des Modells eines Behälters in der Einlagerungsstrecke zu einem Viertelmodell wird in Abbildung 42 beispielhaft dargestellt. Durch die Anwendung des Viertelmodells wird die benötigte Rechenzeit wesentlich reduziert.

# Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung

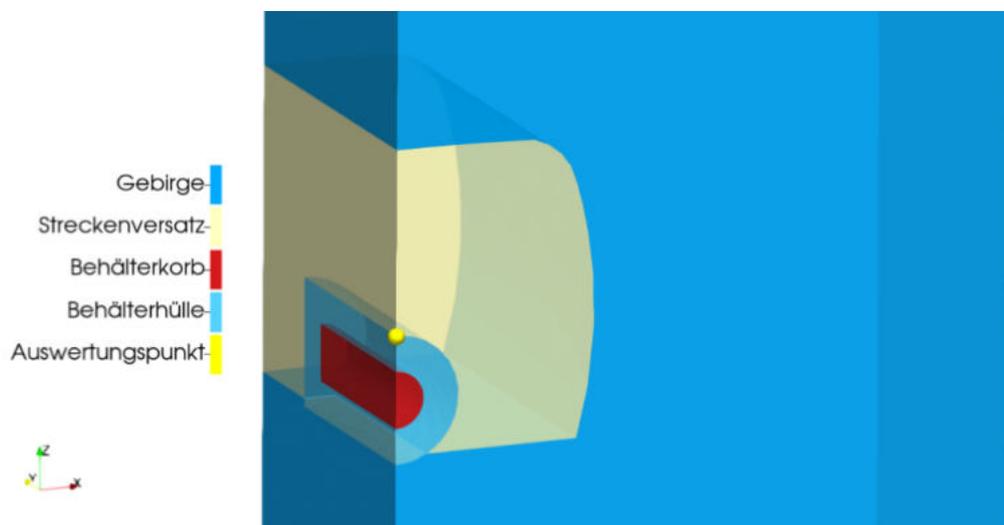
| Projekt | PSP-Element | Funktion/Thema | Komponente | Baugruppe | Aufgabe | UA | Lfd.-Nr. | Rev |
|---------|-------------|----------------|------------|-----------|---------|----|----------|-----|
| NAAN    | NNNNNNNNNN  | NNAAANN        | AANNNA     | AANN      | AAAA    | AA | NNNN     | NN  |
| SG      | 0330        |                |            |           | EA      | TF | 0002     | 00  |

Blatt: 207



**Abbildung 42:** Veranschaulichung des im Rahmen der Simulation verwendeten Viertelmodells (grün) am Beispiel einer vorläufigen Endlagerauslegung im Steinsalz (steile Lagerung)

Die Wärmeleistung der im Behälter befindlichen Abfälle wird mittels einer über den Behälterkorb (siehe Abbildung 42) homogen verteilten Volumenwärmequelle angenähert. Zur Modellierung des zeitlichen Verlaufs der Wärmeleistung werden die in Kapitel 4.2.8.2 gezeigten Wärmeleistungskurven angewendet, skaliert mit der jeweiligen Behälterbeladung. Eine potenziell inhomogene Verteilung der Wärmeleistung über die Brennelement-/Kokillenlänge wird zum gegenwärtigen Zeitpunkt in den Berechnungen nicht berücksichtigt. Die maximale Temperatur an der Behälteraußenwand wird am obersten Punkt des Behälters (auf Höhe der Behältermitte) evaluiert, da dort die höchsten Temperaturen an der Behälteraußenwand zu erwarten sind. Dieser Auswertungspunkt ist in Abbildung 43 gelb eingezeichnet.



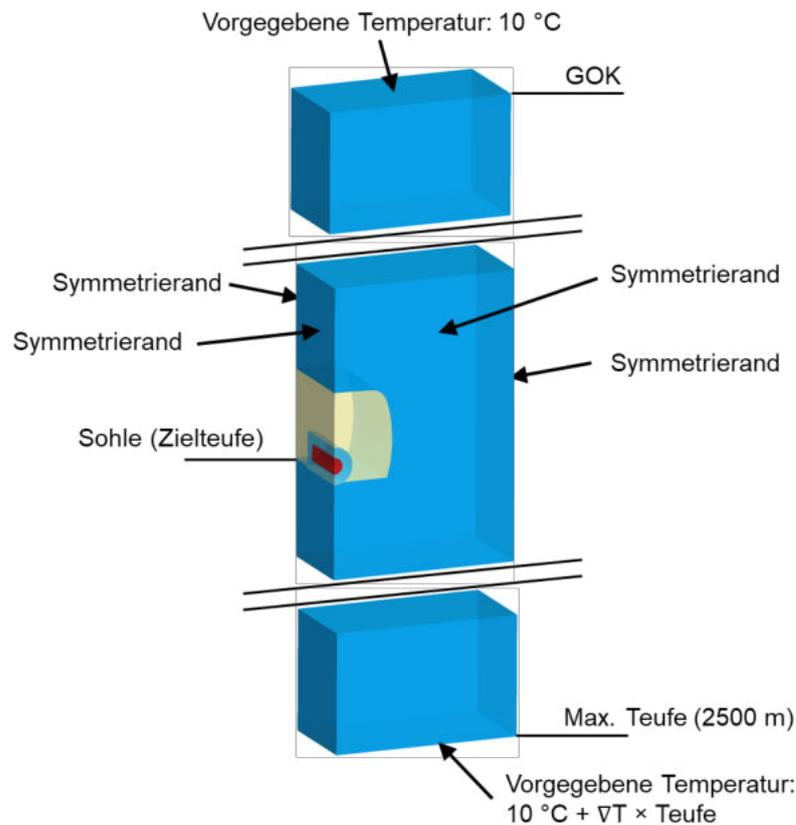
**Abbildung 43:** Schematische Darstellung der Position des Auswertungspunkts (für die maximale Temperatur an der Behälteraußenwand) am Beispiel des Viertelmodells für die vorläufige Endlagerauslegung im Steinsalz

## Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung

| Projekt | PSP-Element | Funktion/Thema | Komponente | Baugruppe | Aufgabe | UA | Lfd.-Nr. | Rev |
|---------|-------------|----------------|------------|-----------|---------|----|----------|-----|
| NAAN    | NNNNNNNNNN  | NNAAANN        | AANNNA     | AANN      | AAAA    | AA | NNNN     | NN  |
| SG      | 0330        |                |            |           | EA      | TF | 0002     | 00  |

Blatt: 208

Das vollständige Simulationsgebiet ist beispielhaft in Abbildung 44, inklusive der zugehörigen Randbedingungen, dargestellt. Es besteht aus einem Quader mit einer festen Höhe von 2 500 m, der an der Oberseite mit der Geländeoberkante abschließt. Die horizontalen Abmessungen ergeben sich aus der Behälterlänge, dem Behälter- sowie dem Streckenabstand. Die Sohle befindet sich auf Höhe der gewünschten Zielteufe für das Endlager. Da kein konkretes Schichtenverzeichnis berücksichtigt wird, werden die Materialeigenschaften, die für den einschlusswirksamen Gebirgsbereich abgeschätzt wurden, auch für das gesamte Gebirge angewendet. Gemäß Kapitel 4.2.1 werden für die vorläufige Endlagerauslegung im Tongestein Teufenbereiche von 350 m bis 900 m und im Steinsalz von 450 m bis 1 200 m betrachtet.



**Abbildung 44:** Schematische Darstellung der Randbedingungen für das Simulationsmodell

Im Simulationsmodell werden an den seitlichen Rändern Symmetrierandbedingungen (kein Wärmefluss) angesetzt. Dadurch werden einerseits die Symmetrieanahmen des Viertelmodells berücksichtigt, aber auch fiktiv eine unendlich häufig wiederholte Elementarzelle modelliert. Dies entspricht somit der Annahme einer unendlichen Ausdehnung des Einlagerungsfelds.

An der Geländeoberkante (GOK) des Simulationsgebietes wird eine zeitlich konstante Temperatur von 10 °C vorgegeben. Im Rahmen der generischen Endlagerauslegung werden für die Berechnungen verschiedene geothermischen Gradienten (0,02 K/m; 0,03 K/m; 0,04 K/m; 0,05 K/m) angesetzt, auf Basis derer die jeweilige Temperaturvorgabe am unteren Modellrand errechnet wird. Die gewählte Vorgehensweise ermöglicht auch die Berechnung der Flächenbedarfe in Abhängigkeit der

## Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung



| Projekt | PSP-Element | Funktion/Thema | Komponente | Baugruppe | Aufgabe | UA | Lfd.-Nr. | Rev |
|---------|-------------|----------------|------------|-----------|---------|----|----------|-----|
| NAAN    | NNNNNNNNNN  | NNAAANN        | AANNNA     | AANN      | AAAA    | AA | NNNN     | NN  |
| SG      | 0330        |                |            |           | EA      | TF | 0002     | 00  |

Blatt: 209

initialen Temperatur im Einlagerungsbereich  $T_{EB}$ . Längerfristig ist es auch denkbar, ortsspezifische Temperaturdaten zu verwenden, um die Prognosegenauigkeit für einen konkreten Ort zu erhöhen.

Die Anfangsbedingungen werden über eine vorgeschaltete Rechnung ermittelt, in welcher der stationäre Zustand (ohne Wärmefreisetzung im Behälterkorb) berechnet wird. Dies führt dazu, dass weitere Einflussfaktoren auf die Anfangstemperaturen, zum Beispiel durch die Bewetterung, entsprechend des Detaillierungsgrads der vorläufigen Endlagerauslegung nicht abgebildet werden.

Für die Simulation wird ein maximaler Zeitraum von 1.000 Jahren betrachtet, da die Wärmeleistung der betrachteten Abfälle bis zu diesem Zeitpunkt in jedem Fall so stark abnimmt, dass danach ein über die Zeit kontinuierlicher Abfall der Temperatur an der Behälteraußenwand resultiert. Die zeitliche Diskretisierung erfolgt mittels eines adaptiven Zeitschrittverfahrens. Beispiele für die räumliche Diskretisierung innerhalb des Finite Element Modells sind in Beispiel 23 dargestellt. In Vorstudien wurden die Raum- und Zeitdiskretisierung anhand von Konvergenzanalysen überprüft.

*Beispiel 23: Beispiel einer räumliche Diskretisierung für das Finite Elemente Modell für die vorläufige Endlagerauslegung im Tongestein Opalinuston und Steinsalz (steile Lagerung)*

### **Beispiel einer räumliche Diskretisierung für das Finite Elemente Modell für die vorläufige Endlagerauslegung im Tongestein Opalinuston und Steinsalz (steile Lagerung)**

Für die Simulation mit der Finite Elemente Methode (FEM) ist eine räumliche Diskretisierung des Simulationsgebietes notwendig, die mittels linearer Tetraederelemente (C3D4) erfolgt. In Abbildung 45 und Abbildung 46 werden beispielhaft die räumliche Diskretisierungen für einen Rechenfall für eine vorläufige Endlagerauslegung im Tongestein bzw. Steinsalz gezeigt. Im Behälternahfeld wird eine feinere Vernetzung gewählt, um die dortigen Prozesse möglichst genau abbilden zu können.

# Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung

| Projekt | PSP-Element | Funktion/Thema | Komponente | Baugruppe | Aufgabe | UA | Lfd.-Nr. | Rev |
|---------|-------------|----------------|------------|-----------|---------|----|----------|-----|
| NAAN    | NNNNNNNNNN  | NNAAANN        | AANNNA     | AANN      | AAAA    | AA | NNNN     | NN  |
| SG      | 0330        |                |            |           | EA      | TF | 0002     | 00  |

Blatt: 210

## Beispiel einer räumliche Diskretisierung für das Finite Elemente Modell für die vorläufige Endlagerauslegung im Tongestein Opalinuston und Steinsalz (steile Lagerung)

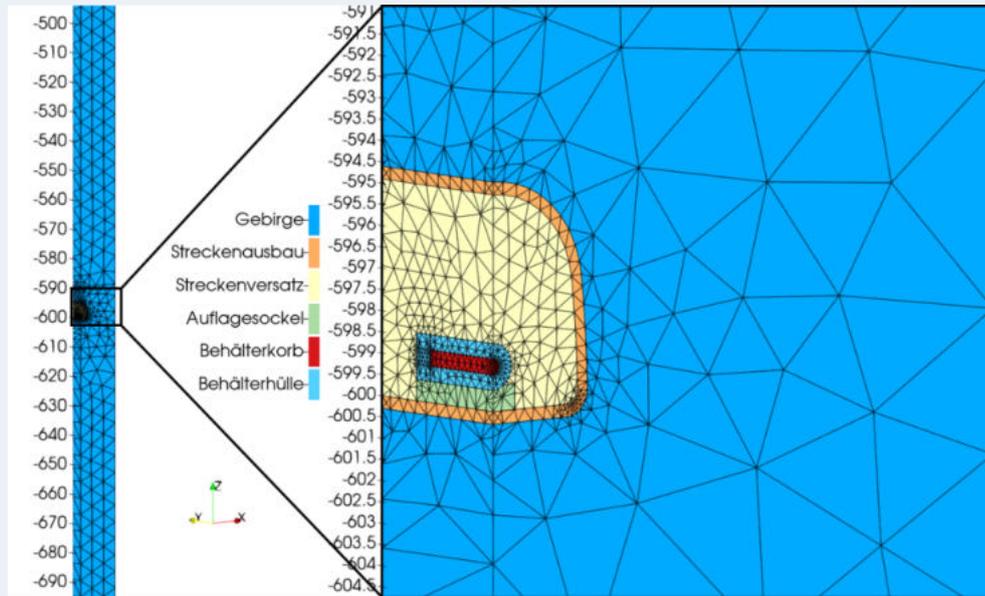


Abbildung 45: Beispiel für die räumliche Diskretisierung für die vorläufige Endlagerauslegung im Tongestein (52 013 Elemente, 11 407 Knoten)

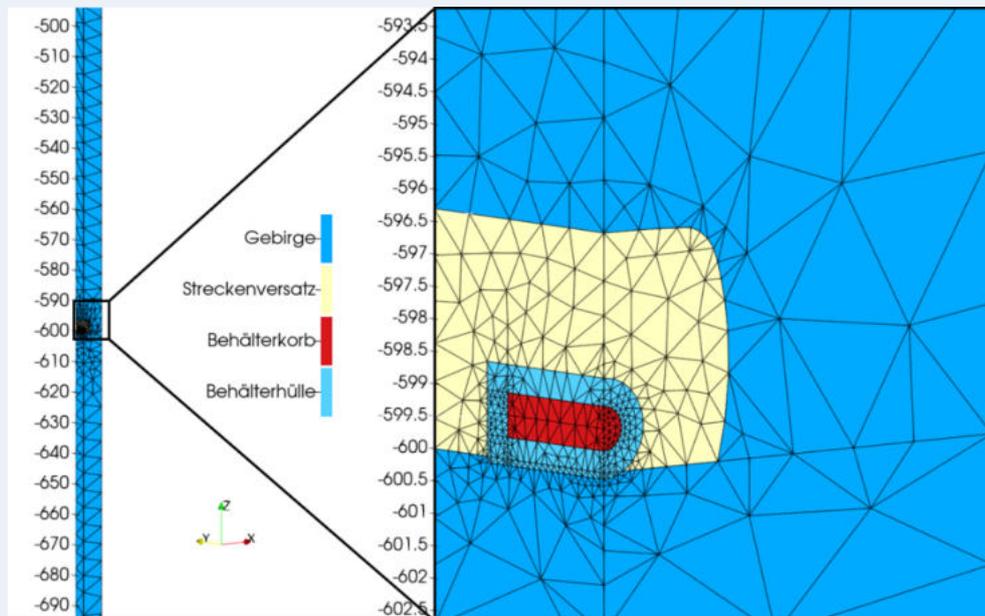


Abbildung 46: Beispiel für die räumliche Diskretisierung für die vorläufige Endlagerauslegung im Steinsalz (33 667 Elemente, 7 299 Knoten)

## Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung



| Projekt | PSP-Element | Funktion/Thema | Komponente | Baugruppe | Aufgabe | UA | Lfd.-Nr. | Rev |
|---------|-------------|----------------|------------|-----------|---------|----|----------|-----|
| NAAN    | NNNNNNNNNN  | NNAAANN        | AANNNA     | AANN      | AAAA    | AA | NNNN     | NN  |
| SG      | 0330        |                |            |           | EA      | TF | 0002     | 00  |

Blatt: 211

Insgesamt betrachtet sind zum aktuellen Zeitpunkt viele Eingangsgrößen des Simulationsmodells mit Ungewissheiten behaftet. Für diese Eingangsgrößen werden daher konservative Annahmen getroffen, um eine Unterschätzung der Flächenbedarfe zu vermeiden. Hinsichtlich der Bewertung der Simulationsergebnisse ist auch zu berücksichtigen, dass in den Simulationsmodellen aktuell keine Spalten modelliert werden, die sich potenziell zwischen den einzelnen Komponenten ergeben können und das Wärmeleitverhalten vermutlich negativ beeinflussen würden. Mit steigender Konkretisierung der Endlagerauslegung, der Berücksichtigung weiterer physikalischer Prozesse sowie der Ableitung von Parametern aus zusätzlichen experimentellen Untersuchungen kann die Prognosequalität in nachfolgenden Arbeiten erhöht werden.

### 4.2.8.6 Behälterbeladungen für wärmeentwickelnde Abfälle

Als Resultat der Simulationsmodelle ergibt sich die Behälterbeladung pro Abfallart für eine initiale Temperatur im Einlagerungsbereich und eine spezifische Teufe. Auf Basis des Abfallmengengerüsts (siehe Tabelle 18) kann anschließend die Anzahl an Behältern pro Inventarart abgeschätzt werden. Diese dient als Eingangsgröße für die Abschätzung der kumulierten Endlagerflächenbedarfe. In Beispiel 24 sind die Behälterbeladungen für einen Auslegungsfall der vorläufigen Endlagerauslegung im Tongestein und Steinsalz dargestellt.

*Beispiel 24: Beispiel zu Behälterbeladungen für vorläufige Endlagerauslegungen im Tongestein Opalinuston und Steinsalz (steile Lagerung)*

#### **Beispiel zu Behälterbeladungen für vorläufige Endlagerauslegungen im Tongestein Opalinuston und Steinsalz (steile Lagerung)**

Die mittels numerischen Berechnungen abgeschätzten Behälterbeladung für eine vorläufige Endlagerauslegung im Tongestein und Steinsalz sind in Tabelle 27 für einen Beispielfall dargestellt. Es wurde hierbei der Fall einer Teufe von 600 m und einer initialen Temperatur im Einlagerungsbereich von 28 °C (entspricht einem angenommen geothermischen Gradienten von 0,03 K/m) zugrunde gelegt. Aus Tabelle 27 ist ersichtlich, dass die Behälterbeladungen für die vorläufige Endlagerauslegung im Steinsalz auf Grund der für den Wärmetransport günstigeren thermophysikalischen Materialeigenschaften wesentlich höher sind als im Tongestein und somit insgesamt weniger Endlagerbehälter notwendig sind. Im Allgemeinen ist für die Berechnungen im Tongestein zu berücksichtigen, dass auf Grund der mit der Teufe ansteigenden Streckenabstände auch der pro Behälter benötigte Flächenbedarf ansteigt, wohingegen dieser Wert beim Steinsalz konstant bleibt.

## Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung



|         |             |                |            |           |         |    |          |     |
|---------|-------------|----------------|------------|-----------|---------|----|----------|-----|
| Projekt | PSP-Element | Funktion/Thema | Komponente | Baugruppe | Aufgabe | UA | Lfd.-Nr. | Rev |
| NAAN    | NNNNNNNNNN  | NNAAANN        | AANNNA     | AANN      | AAAA    | AA | NNNN     | NN  |
| SG      | 0330        |                |            |           | EA      | TF | 0002     | 00  |

Blatt: 212

### Beispiel zu Behälterbeladungen für vorläufige Endlagerauslegungen im Tongestein Opalinuston und Steinsalz (steile Lagerung)

*Tabelle 27: Beispiel der Behälterbeladungen für eine vorläufige Endlagerauslegungen im Tongestein und Steinsalz für eine initiale Temperatur im Einlagerungsbereich von 28 °C und bei einer Teufe von 600 m*

| Abfallart | Behälterbeladung (Tongestein) in BE/Kokillen pro Behälter | Behälterbeladung (Steinsalz) in BE/Kokillen pro Behälter |
|-----------|---|--|
| DWR-MOX   | 0,46  | 0,52   |
| DWR-UOX   | 1,67  | 2,47   |
| SWR-MOX   | 2,17  | 2,61   |
| SWR-UOX   | 5,19  | 8,87   |
| WWER      | 7,50  | 24,26  |
| CSD-V     | 1,82  | 2,54   |

Im Beispiel 25 werden die Simulationsergebnisse für eine vorläufige Endlagerauslegung im Tongestein bei einer Teufe von 600 m und für eine initiale Temperatur im Einlagerungsbereich von 28 °C für zwei unterschiedliche Inventararten (DWR-MOX und CSD-V) dargestellt. Die entsprechenden Ergebnisse für eine vorläufige Endlagerauslegung im Steinsalz finden sich analog dazu in Beispiel 26.

*Beispiel 25: Beispiel zu Simulationsergebnissen für eine vorläufige Endlagerauslegung im Tongestein Opalinuston*

### Beispiel zu Simulationsergebnissen für eine vorläufige Endlagerauslegung im Tongestein Opalinuston

In Abbildung 47 ist beispielhaft ein Auszug der Berechnungsergebnisse für eine vorläufige Endlagerauslegung im Tongestein dargestellt. Anhand dieser Abbildung ist ersichtlich, dass das Maximum der Temperatur an der Behälteraußenwand nach ungefähr 10 Jahren (CSD-V) bzw. 38 Jahren (DWR-MOX) auftritt. Die Charakteristik des Temperaturabfalls nach Erreichen des Temperaturmaximums ist jedoch stark von der Abfallart und deren zeitlich veränderlicher Wärmefreisetzungsrates abhängig. So ergibt sich für eine Beladung mit CSD-V Kokillen ein zügiger Abfall der Temperatur an der Behälteraußenwand. Dahingegen führt eine Behälterbeladung mit DWR-MOX Brennelementen zu einer über einen langen Zeitraum vergleichsweise hohen, maximalen Temperatur an der Behälteraußenwand.

# Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung

| Projekt | PSP-Element | Funktion/Thema | Komponente | Baugruppe | Aufgabe | UA | Lfd.-Nr. | Rev |
|---------|-------------|----------------|------------|-----------|---------|----|----------|-----|
| NAAN    | NNNNNNNNNN  | NNAAANN        | AANNNA     | AANN      | AAAA    | AA | NNNN     | NN  |
| SG      | 0330        |                |            |           | EA      | TF | 0002     | 00  |

Blatt: 213

## Beispiel zu Simulationsergebnissen für eine vorläufige Endlagerauslegung im Tongestein Opalinuston

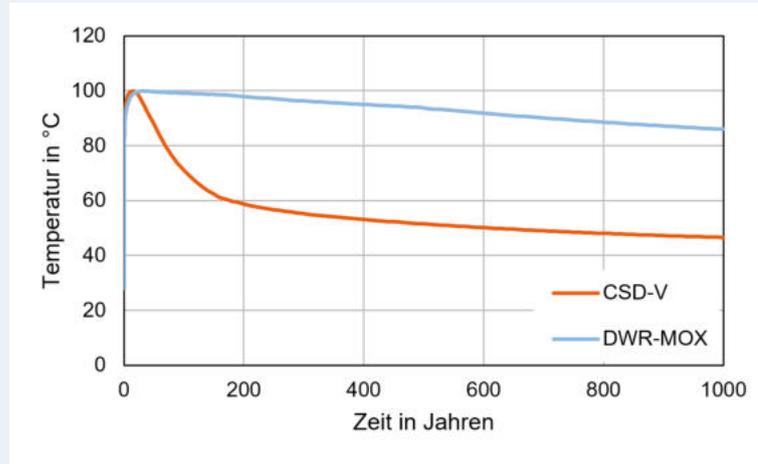


Abbildung 47: Beispiel der zeitlichen Temperaturentwicklung an der Behälteraußenwand für eine Endlagerauslegung im Tongestein für die Inventararten CSD-V und DWR-MOX (Teufe 600 m, initiale Temperatur im Einlagerungsbereich von 28 °C)

In Abbildung 48 und Abbildung 49 ist die zugehörige räumliche Temperaturverteilung im Einlagerungsbereich für die Abfallarten CSD-V respektive DWR-MOX beispielhaft dargestellt. In beiden Fällen resultiert eine im Vergleich zum Steinsalz (siehe Beispiel 26) räumlich stärker konzentrierte Erwärmung im Bereich um den Behälter. Dies ist eine direkte Folge der geringen Wärmeleitfähigkeiten der Materialien im Behälternahfeld.

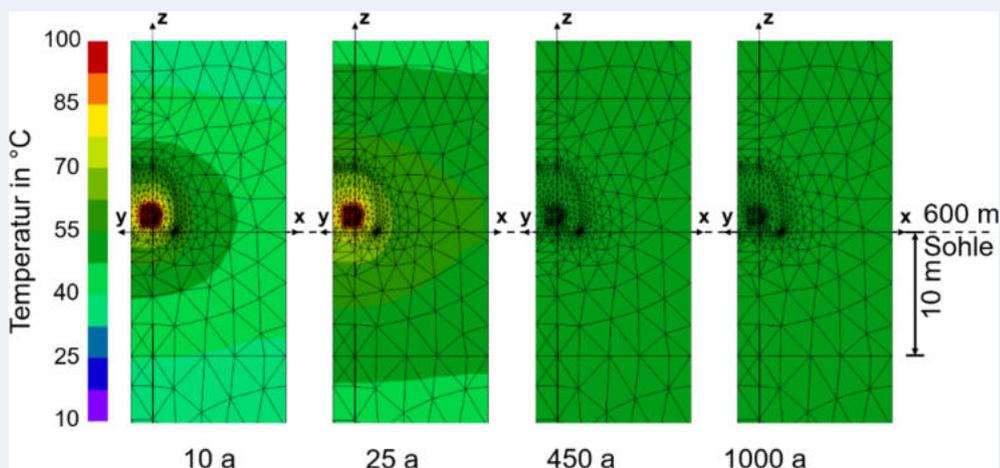


Abbildung 48: Beispiel der zeitlichen Entwicklung des Temperaturfeldes im Einlagerungsbereich für eine Endlagerauslegung im Tongestein für die Inventarart CSD-V (Teufe 600 m, initiale Temperatur im Einlagerungsbereich von 28 °C)

## Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung



| Projekt | PSP-Element | Funktion/Thema | Komponente | Baugruppe | Aufgabe | UA | Lfd.-Nr. | Rev |
|---------|-------------|----------------|------------|-----------|---------|----|----------|-----|
| NAAN    | NNNNNNNNNN  | NNAAANN        | AANNNA     | AANN      | AAAA    | AA | NNNN     | NN  |
| SG      | 0330        |                |            |           | EA      | TF | 0002     | 00  |

Blatt: 214

### Beispiel zu Simulationsergebnissen für eine vorläufige Endlagerauslegung im Tongestein Opalinuston

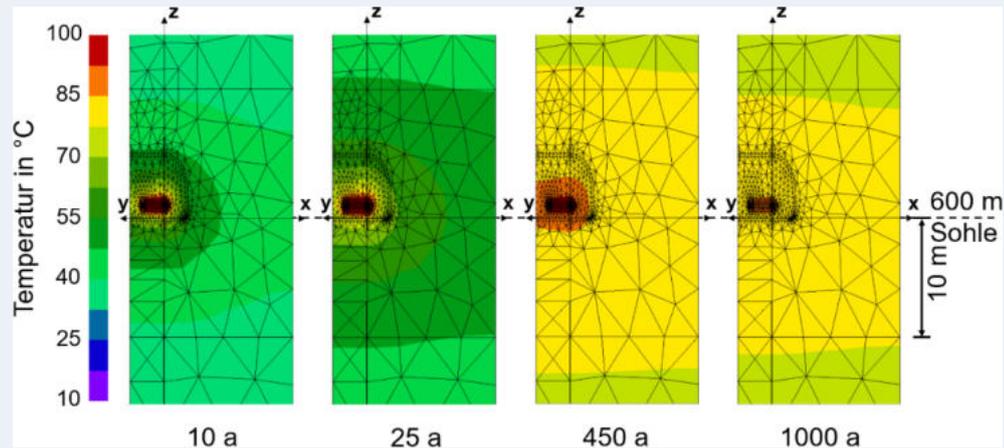


Abbildung 49: Beispiel der zeitlichen Entwicklung des Temperaturfeldes im Einlagerungsbereich für eine Endlagerauslegung im Tongestein für die Inventarart DWR-MOX (Teufe 600 m, initiale Temperatur im Einlagerungsbereich von 28 °C)

Beispiel 26: Beispiel zu Simulationsergebnissen für eine vorläufige Endlagerauslegung im Steinsalz (steile Lagerung)

### Beispiel zu Simulationsergebnissen für eine vorläufige Endlagerauslegung im Steinsalz (steile Lagerung)

In Abbildung 50 bis Abbildung 52 ist ein Auszug der Ergebnisse der Temperaturfeldsimulationen für eine vorläufige Endlagerauslegung im Steinsalz dargestellt. Die Abbildung 50 zeigt den zeitlichen Verlauf der maximalen Temperatur auf der Behälteraußenwand für die Abfallarten CSD-V und DWR-MOX. Für die Abfallart CSD-V ist die maximale Temperatur von 100 °C an der Behälteraußenwand bereits nach ungefähr 24 Jahren erreicht. Dahingegen tritt das Temperaturmaximum für die Abfallart DWR-MOX vergleichsweise spät erst nach ungefähr 449 Jahren auf. Die unterschiedliche Ausprägung der zeitlichen Lage des Temperaturmaximums wird durch das Abklingverhalten der Abfälle und der damit verbundenen zeitlichen Wärmefreisetzung getrieben. Der rapide Abfall der Wärmefreisetzung der CSD-V Abfälle führt zu einem zeitlich frühen, der langsame Abfall der Wärmefreisetzung der DWR-MOX Abfälle führt zu einem zeitlich späten Temperaturmaximum auf der Behälteroberfläche.

# Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung

| Projekt | PSP-Element | Funktion/Thema | Komponente | Baugruppe | Aufgabe | UA | Lfd.-Nr. | Rev |
|---------|-------------|----------------|------------|-----------|---------|----|----------|-----|
| NAAN    | NNNNNNNNNN  | NNAAANN        | AANNNA     | AANN      | AAAA    | AA | NNNN     | NN  |
| SG      | 0330        |                |            |           | EA      | TF | 0002     | 00  |

Blatt: 215

## Beispiel zu Simulationsergebnissen für eine vorläufige Endlagerauslegung im Steinsalz (steile Lagerung)

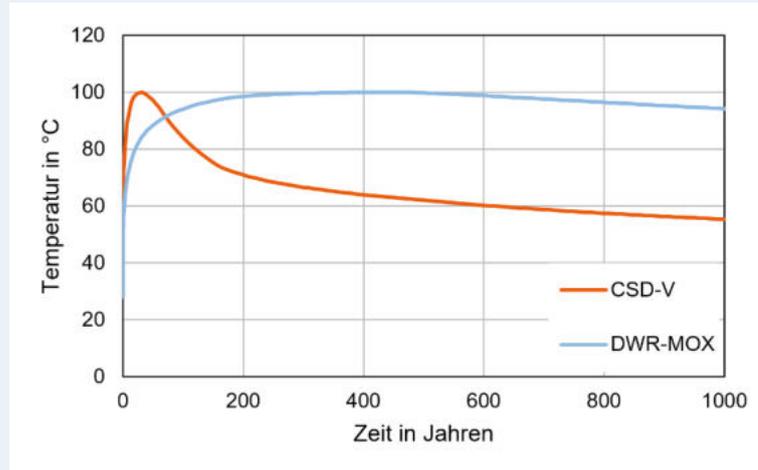


Abbildung 50: Beispiel der zeitlichen Temperaturentwicklung an der Behälteraußenwand für eine Endlagerauslegung im Steinsalz für die Inventararten CSD-V und DWR-MOX (Teufe 600 m, initiale Temperatur im Einlagerungsbereich von 28 °C)

Der rasche Abfall der Wärmeleistung der CSD-V Kokillen führt ferner zu einer lokal begrenzten Erwärmung des Gebirges nach der Einlagerung, siehe Abbildung 51. Es findet keine gleichmäßige Erwärmung des Gebirges im Einlagerungsbereich statt. Dahingegen führt die über einen langen Zeitraum beständige Wärmeabgabe des Abfalltyps DWR-MOX nach mehreren hundert Jahren zu einer eher gleichmäßigen Erwärmung des Gebirges im Einlagerungsbereichs – siehe Abbildung 52.

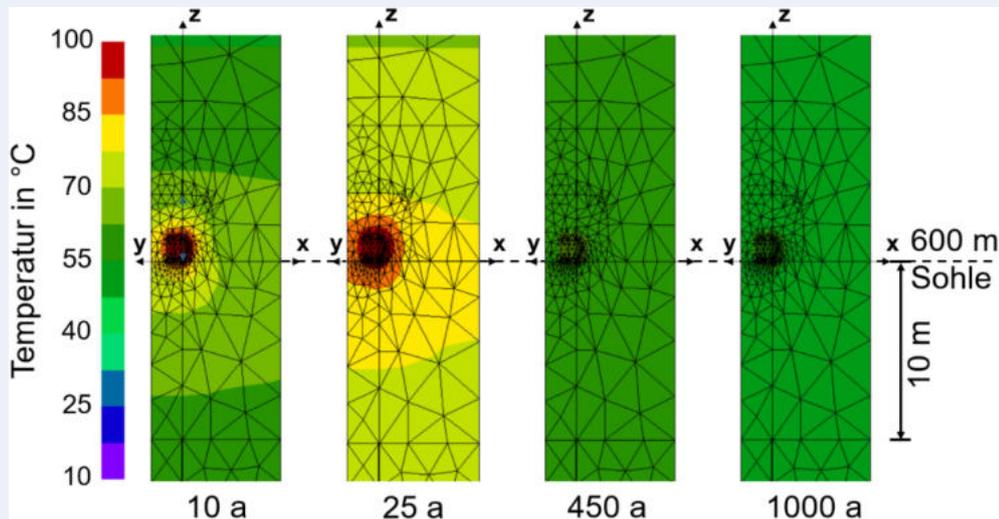


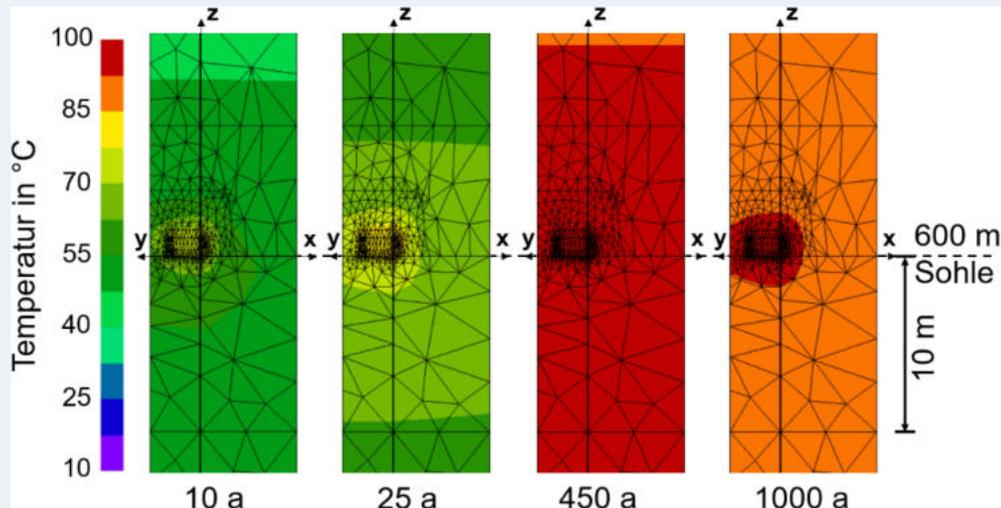
Abbildung 51: Beispiel der zeitlichen Entwicklung des Temperaturfeldes im Einlagerungsbereich für eine Endlagerauslegung im Steinsalz für die Inventarart CSD-V (Teufe 600 m, initiale Temperatur im Einlagerungsbereich von 28 °C)

## Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung

| Projekt | PSP-Element | Funktion/Thema | Komponente | Baugruppe | Aufgabe | UA | Lfd.-Nr. | Rev |
|---------|-------------|----------------|------------|-----------|---------|----|----------|-----|
| NAAN    | NNNNNNNNNN  | NNAAANN        | AANNNA     | AANN      | AAAA    | AA | NNNN     | NN  |
| SG      | 0330        |                |            |           | EA      | TF | 0002     | 00  |

Blatt: 216

### Beispiel zu Simulationsergebnissen für eine vorläufige Endlagerauslegung im Steinsalz (steile Lagerung)



**Abbildung 52:** Beispiel der zeitlichen Entwicklung des Temperaturfeldes im Einlagerungsbereich für eine Endlagerauslegung im Tongestein für die Inventarart DWR-MOX (Teufe 600 m, initiale Temperatur im Einlagerungsbereich von 28 °C)

#### 4.2.8.7 Kumulierte Endlagerflächenbedarfe

In diesem Abschnitt wird die grundlegende Vorgehensweise erläutert, um auf Basis der zuvor beschriebenen Behälterbeladungen einen kumulierten Endlagerflächenbedarf abzuschätzen und anschließend erfolgt eine Diskussion der erzielten Ergebnisse. Das zugrunde gelegte Layout des Endlagerbergwerks wird in Kapitel 4.2.6.9 ausführlich beschrieben. In die finalen Endlagerflächenbedarfe fließen dabei neben den Einlagerungsfeldern auch z. B. Infrastrukturflächen mit ein.

Um die kumulierten Endlagerflächenbedarfe zu berechnen, wird zunächst die notwendige Anzahl an Einlagerungsstrecken aus der prognostizierten Anzahl an notwendigen Endlagerbehältern berechnet. Anschließend lässt sich die Anzahl an Einlagerungszellen und somit der benötigte Flächenbedarf für das gesamte Einlagerungsfeld abschätzen. Durch die Addition der Flächenbedarfe für den Infrastrukturbereich sowie der weiteren Flächen (z. B. aus dem Abstand zwischen Infrastrukturbereich und erstem Querschlag des Einlagerungsbereichs), erhält man den kumulierten Endlagerflächenbedarf in Abhängigkeit der initialen Temperatur im Einlagerungsbereich (bzw. des geothermischen Gradienten) sowie der jeweiligen Teufe. In Beispiel 27 werden die resultierenden Ergebnisse für eine vorläufige Endlagerauslegung im Tongestein gezeigt. Analog dazu sind die Resultate für eine vorläufige Endlagerauslegung im Steinsalz im Beispiel 28 dargestellt.

# Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung



| Projekt | PSP-Element | Funktion/Thema | Komponente | Baugruppe | Aufgabe | UA | Lfd.-Nr. | Rev |
|---------|-------------|----------------|------------|-----------|---------|----|----------|-----|
| NAAN    | NNNNNNNNNN  | NNAAANN        | AANNNA     | AANN      | AAAA    | AA | NNNN     | NN  |
| SG      | 0330        |                |            |           | EA      | TF | 0002     | 00  |

Blatt: 217

Beispiel 27: *Beispiel von Simulationsergebnissen für eine vorläufige Endlagerauslegung im Tongestein Opalinuston*

## Beispiel von Simulationsergebnissen für eine vorläufige Endlagerauslegung im Tongestein Opalinuston

Die Ergebnisse für die prognostizierten Endlagerflächenbedarfe für eine vorläufige Endlagerauslegung im Tongestein sind in Abbildung 53 und Abbildung 54 gezeigt. Der Flächenbedarf für eine vorläufige Endlagerauslegung im Tongestein steigt mit zunehmender Teufe stark an, siehe Abbildung 53. Des Weiteren ist ersichtlich, dass ein größerer geothermischer Gradient, und dementsprechend höhere initiale Temperatur im Einlagerungsbereich, zu höheren Flächenbedarfen führt. Der geothermische Gradient stellt einen Bezug zwischen Teufe und Temperatur dar, welcher eine schematische Bearbeitung erleichtert. In der Praxis ist der geothermische Gradient jedoch eine Größe welche über die Teufe zumeist nicht linear ist, bzw. vom Teufenbereich abhängt über den er gemittelt wird. Für die konkrete Endlagerplanung ist die eigentliche Gebirgstemperatur entscheidend, daher erfolgt ergänzend eine weitere Darstellung der errechneten Flächenbedarfe im Tongestein in Abbildung 54. In dieser Abbildung wird die Endlagerfläche für die untersuchten Teufenlagen des Endlagers über die initiale Temperatur im Einlagerungsbereich aufgetragen. Die Abbildung erlaubt die zielgerichtete Ermittlung der prognostizierten Endlagerfläche für eine spezifische Zielteufe des Endlagers bei einer bekannten initialen Temperatur im Einlagerungsbereich.

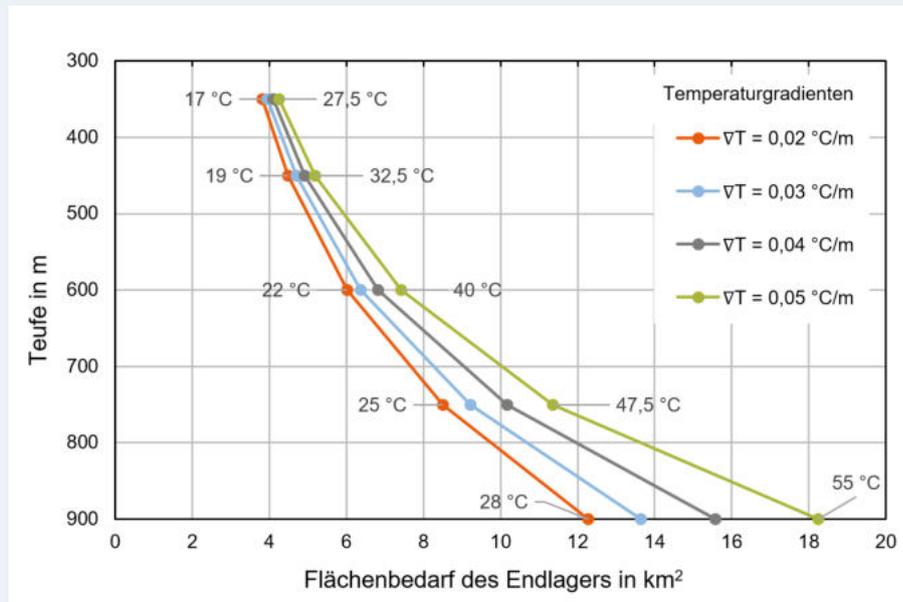


Abbildung 53: *Prognostizierter Endlagerflächenbedarf für eine vorläufige Endlagerauslegung im Tongestein Opalinuston in Abhängigkeit des geothermischen Gradienten*

## Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung

| Projekt | PSP-Element | Funktion/Thema | Komponente | Baugruppe | Aufgabe | UA | Lfd.-Nr. | Rev |
|---------|-------------|----------------|------------|-----------|---------|----|----------|-----|
| NAAN    | NNNNNNNNNN  | NNAAANN        | AANNNA     | AANN      | AAAA    | AA | NNNN     | NN  |
| SG      | 0330        |                |            |           | EA      | TF | 0002     | 00  |

Blatt: 218

### Beispiel von Simulationsergebnissen für eine vorläufige Endlagerauslegung im Tongestein Opalinuston

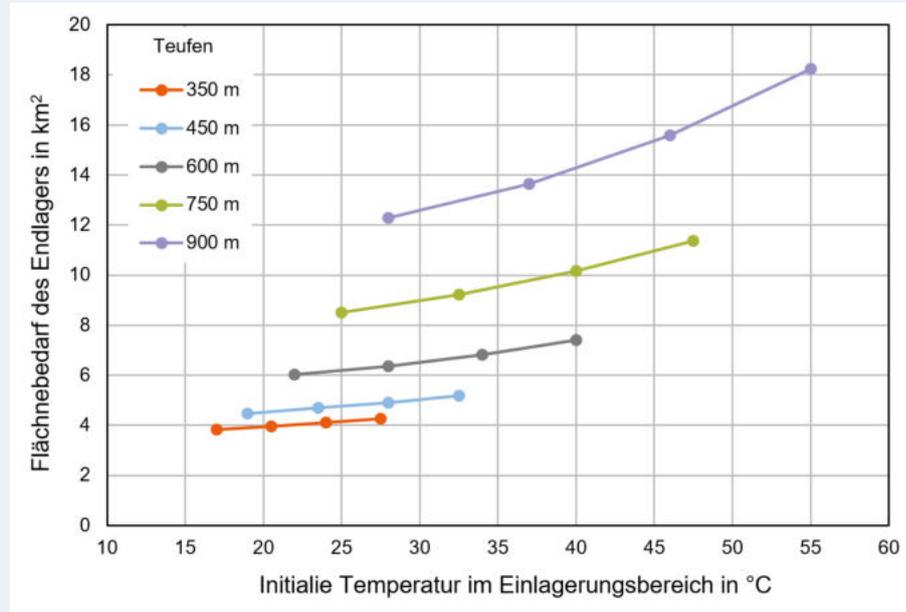


Abbildung 54: Prognostizierter Endlagerflächenbedarf für eine vorläufige Endlagerauslegung im Tongestein Opalinuston in Abhängigkeit der initialen Temperatur im Einlagerungsbereich

Beispiel 28: Beispiel von Simulationsergebnissen für eine vorläufige Endlagerauslegung im Steinsalz (steile Lagerung)

### Beispiel von Simulationsergebnissen für eine vorläufige Endlagerauslegung im Steinsalz (steile Lagerung)

Die prognostizierten Endlagerflächenbedarfe für eine vorläufige Endlagerauslegung im Steinsalz sind analog in Abbildung 55 und Abbildung 56 dargestellt. Die prognostizierten Flächenbedarfe sind bei gleicher Teufe und geothermischen Gradienten deutlich geringer als im Tongestein. Dies resultiert zum einen aus den für den Wärmetransport günstigeren thermophysikalischen Materialeigenschaften des Steinsalzes. Zum anderen besteht ein wichtiger Unterschied darin, dass der pro Endlagerbehälter benötigte Flächenbedarf für eine vorläufige Endlagerauslegung im Steinsalz über die Teufe als konstant angenommen wird (keine Teufenabhängigkeit der Streckenabstände), wohingegen dieser Wert im Tongestein auf Grund der gebergsmechanischen Auslegung mit steigender Teufe zunimmt.

# Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung



| Projekt | PSP-Element | Funktion/Thema | Komponente | Baugruppe | Aufgabe | UA | Lfd.-Nr. | Rev |
|---------|-------------|----------------|------------|-----------|---------|----|----------|-----|
| NAAN    | NNNNNNNNNN  | NNAAANN        | AANNNA     | AANN      | AAAA    | AA | NNNN     | NN  |
| SG      | 0330        |                |            |           | EA      | TF | 0002     | 00  |

Blatt: 219

## Beispiel von Simulationsergebnissen für eine vorläufige Endlagerauslegung im Steinsalz (steile Lagerung)

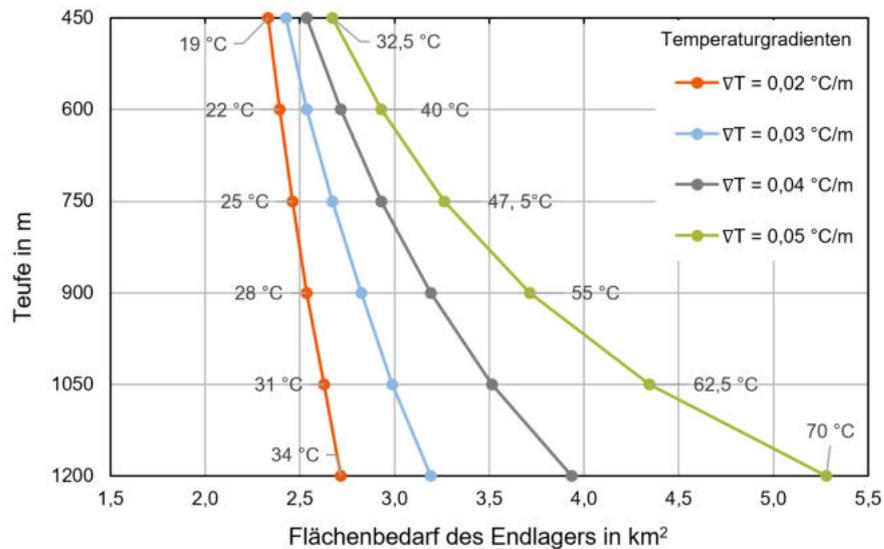


Abbildung 55: Prognostizierter Endlagerflächenbedarf für eine vorläufige Endlagerauslegung im Steinsalz (steile Lagerung) in Abhängigkeit des geothermischen Gradienten

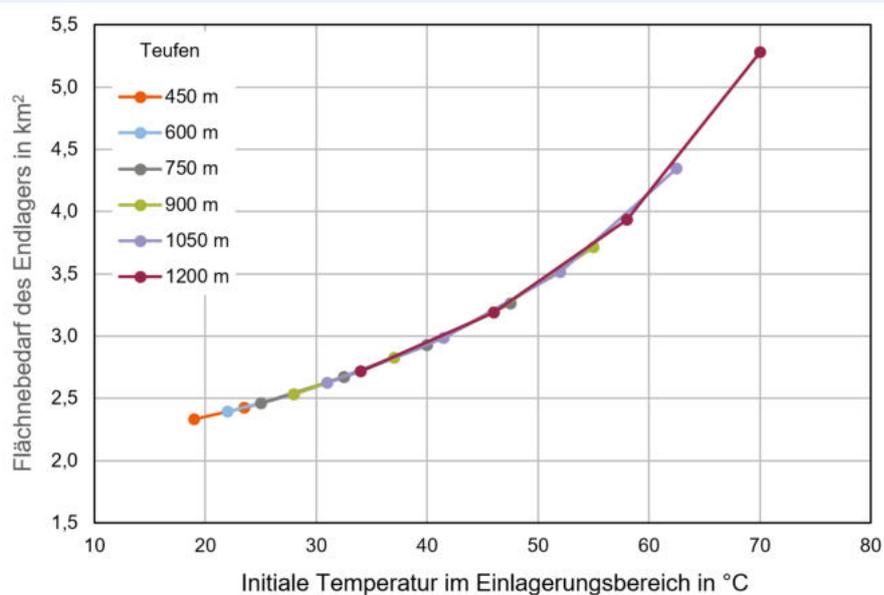


Abbildung 56: Prognostizierter Endlagerflächenbedarf für eine vorläufige Endlagerauslegung im Steinsalz (steile Lagerung) in Abhängigkeit der initialen Temperatur im Einlagerungsbereich

## Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung



| Projekt | PSP-Element | Funktion/Thema | Komponente | Baugruppe | Aufgabe | UA | Lfd.-Nr. | Rev |
|---------|-------------|----------------|------------|-----------|---------|----|----------|-----|
| NAAN    | NNNNNNNNNN  | NNAAANN        | AANNNA     | AANN      | AAAA    | AA | NNNN     | NN  |
| SG      | 0330        |                |            |           | EA      | TF | 0002     | 00  |

Blatt: 220

Insgesamt betrachtet resultiert aus der Anwendung der vorgestellten Methodik eine vorläufige Prognose der benötigten Endlagerflächen. Diese Prognose soll jedoch als Orientierungswert und weniger als ein exakter Flächenbedarf für das finale Endlager verstanden werden. Dies wird zum Beispiel durch die eingeschränkte Detailtiefe der vorläufigen Endlagerauslegung, dem aktuell noch eingeschränkten Kenntnisstand bezüglich der geologischen Verhältnisse, sowie den Vereinfachungen in den Simulationsmodellen bedingt.

### 4.2.9 Optimierung des Endlagersystems gemäß § 12 EndlSiAnfV

In § 6 Abs. 3 EndlSiUntV wird gefordert, in „*jeder vorläufigen Sicherheitsuntersuchung [...] das Endlagersystem entsprechend § 12 der Endlagersicherheitsanforderungsverordnung zu optimieren. Es ist darzustellen, welche Optimierungsmaßnahmen in die vorläufige Auslegung des Endlagers im jeweils aktuellen Stand eingegangen sind.*“ Über die damit ableitbare Weiterentwicklung der Endlagerauslegung in den aufeinander aufbauenden Sicherheitsuntersuchungen hinaus, führt die Begründung (BT-Drs. 19/19291) zu § 6 Abs. 3 EndlSiUntV aus: „*Die konkrete Darstellung der jeweils vorgenommenen Optimierungsmaßnahmen dient auch der Vergleichbarkeit der einzelnen repräsentativen [...] vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen untereinander: nur so kann transparent nachvollzogen werden, inwieweit beim Vergleich von Teilgebieten [...] erkannte Sicherheitsvor- oder -nachteile tatsächlich intrinsisch vorhanden sind und welche lediglich aus unterschiedlich ausgeschöpftem Optimierungspotenzial resultieren.*“

Gemäß § 12 Abs. 1 EndlSiAnfV sind das „*Sicherheitskonzept und die technische Auslegung des Endlagers [...] unter Berücksichtigung aller Umstände des Einzelfalls und unter Beachtung der Ausgewogenheit der Maßnahmen zur Erreichung*“ der Ziele Langzeitsicherheit und Betriebssicherheit zu optimieren. Die Optimierung endet gemäß § 12 Abs. 2 EndlSiAnfV „*wenn eine weitere Verbesserung der Sicherheit nur mit unverhältnismäßig hohem Aufwand erreicht werden kann.*“ Auch um dies transparent darzustellen, sind die durchgeführten Optimierungen bzw. Aufwände für eine weitere Verbesserung nachvollziehbar zu dokumentieren. Bei der Optimierung sind vorrangig die zu erwartenden Entwicklungen zu berücksichtigen, die abweichenden und hypothetischen Entwicklungen sind nachrangig in dieser genannten Reihenfolge hinzuzuziehen (§ 12 Abs. 3 EndlSiAnfV). Die Optimierungen der nachrangig genannten Entwicklungen dürfen die Sicherheit der Maßnahmen der jeweils vorrangigen Entwicklung nicht erheblich beeinträchtigen.

Die Verordnung priorisiert weder die Optimierung hinsichtlich der Betriebssicherheit noch der Langzeitsicherheit, beides ist gleichrangig zu berücksichtigen. Dies könnte allerdings zu Konflikten führen, da die Optimierung der Betriebs- bzw. der Langzeitsicherheit die jeweils andere Sicherheit (nachteilig) beeinflussen könnte. Dies ist bei den zukünftigen Arbeiten zu berücksichtigen und im Einzelfall begründet zu priorisieren.

Auch im Diskussionspapier „Standortauswahl“ der ESK mit Stand vom 18.02.2021 (ESK 2021) wird u. a. diskutiert, dass die Optimierung in „*Analogie zum Strahlenschutz*“ möglichst umfassend und unter Berücksichtigung des Einzelfalls abzuwägen sei. Dabei sei zu klären:

- „welcher Grad an Optimierung (Sicherheitsgewinn) im Verfahren effektiv erreicht wird,

## Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung



| Projekt | PSP-Element | Funktion/Thema | Komponente | Baugruppe | Aufgabe | UA | Lfd.-Nr. | Rev |
|---------|-------------|----------------|------------|-----------|---------|----|----------|-----|
| NAAN    | NNNNNNNNNN  | NNAAANN        | AANNNA     | AANN      | AAAA    | AA | NNNN     | NN  |
| SG      | 0330        |                |            |           | EA      | TF | 0002     | 00  |

Blatt: 221

- ob neben der Optimierung in einem Bereich auch Nachteile in anderen Bereichen verursacht werden,
- in welchem Maße die Optimierung einen Bereich weit unterhalb gesetzlicher Anforderungen betrifft,
- ob mit der Optimierung ggf. Personendosen des Betriebspersonals (z. B. aufgrund der Konditionierung und/oder Einlagerung) hypothetischen Dosen der Bevölkerung in ferner Zukunft (aufgrund möglicher Freisetzung aus dem Endlager) gegenübergestellt werden und
- welche zusätzlichen Risiken und Kosten damit verbunden sind.“

Dem Aufwand der einzelnen Optimierungsmaßnahmen sei demnach der Sicherheitsgewinn gegenüberzustellen, um „sicherzustellen, dass die Optimierung der Sicherheit an richtiger Stelle und zum richtigen Zeitpunkt erfolgt“. Weiterhin sieht die ESK ebenfalls die oben angesprochenen möglichen Zielkonflikte bei der Optimierung hinsichtlich Betriebs- und Langzeitsicherheit und spricht sich für eine Klärung der Prioritäten aus.

Anders als in der wvSU und der uvSU kann die Optimierung der Endlagerauslegung im Rahmen der rvSU nicht auf vorhergehenden Sicherheitsuntersuchungen des Untersuchungsraums/Teiluntersuchungsraums aufbauen. Daher wird innerhalb der rvSU nicht die Verbesserung der Endlagerauslegung gegenüber einem vorhergehenden Verfahrensstand als Optimierung verstanden, sondern die initiale, möglichst vorteilhafte Konfiguration des Endlagersystems gemäß Zielsetzungen Betriebssicherheit und Langzeitsicherheit aus § 12 EndlSiAnfV. In vielen Fällen werden dabei Entscheidungsprozesse mit zahlreichen Alternativen und der anschließenden Wahl einer Vorzugsvariante vorangehen.

Aufgrund der möglicherweise begrenzten Kenntnisse zu Beginn der rvSU sind hier für die vorläufige Endlagerauslegung zunächst Annahmen zu treffen und darauf aufbauend die Sicherheitsuntersuchungen durchzuführen. Gemäß § 6 Abs. 4 EndlSiUntV „ist ein Zweck [...], das jeweils zu Grunde gelegte vorläufige Sicherheitskonzept und die vorläufige Auslegung des Endlagers zu überprüfen und Optimierungspotenzial zu identifizieren. Dieses kann dann in späteren Verfahrensschritten entsprechend Absatz 1 in Verbindung mit § 4 Absatz 3 [EndlSiUntV] umgesetzt werden“ (Begründung (BT-Drs. 19/19291) zu § 6 Abs. 4 EndlSiUntV, Unterstreichung hinzugefügt). Demnach müssen die Annahmen zu einem späteren Zeitpunkt und aufbauend auf weiteren Erkenntnissen in einer weiterentwickelten Sicherheitsuntersuchung neu bewertet und gegebenenfalls angepasst werden, um eine weitere Optimierung zu erreichen. Die dazu notwendigen Informationen können z. B. aus zusätzlich gewonnenen Daten durch die übertägige / untertägige Erkundung, des fortschreitenden Standes von Wissenschaft und Technik oder auch des regulatorischen Rahmens stammen. Aus dem Informationsgewinn und der Anpassung entsteht so bereits vor dem Standortentscheid eine schrittweise Optimierung, die ausgehend von der rvSU in der wvSU und schließlich in der uvSU durchgeführt wird.

Im Rahmen der rvSU sind somit folgende grundsätzliche Arbeiten zur Optimierung notwendig: Die Endlagerauslegung wird möglichst vorteilhaft bezüglich der Optimierungsziele Betriebssicherheit und Langzeitsicherheit gewählt und dargestellt.

## Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung



| Projekt | PSP-Element | Funktion/Thema | Komponente | Baugruppe | Aufgabe | UA | Lfd.-Nr. | Rev |
|---------|-------------|----------------|------------|-----------|---------|----|----------|-----|
| NAAN    | NNNNNNNNNN  | NNAAANN        | AANNNA     | AANN      | AAAA    | AA | NNNN     | NN  |
| SG      | 0330        |                |            |           | EA      | TF | 0002     | 00  |

Blatt: 222

### 4.2.10 Endlagerauslegung im Untersuchungsraum bzw. Teiluntersuchungsraum

Für Teil 2 der Methodik, also die (teil-)untersuchungsraumspezifische vorläufige Auslegung des Endlagers, wird die wirtsgesteinsspezifische Endlagerauslegung auf die jeweiligen Untersuchungs-räume bzw. Teiluntersuchungsräume übertragen. Dadurch erfolgt in der Regel keine umfangreiche Anpassung der vorläufigen Endlagerauslegung. Lediglich die Beschreibung der wesentlichen und weiteren Barrieren auf Grundlage von ortsspezifische Informationen zu den geologischen Barrieren des Endlagersystems wird konkretisiert, vgl. Abbildung 16. Die Informationen werden in den jeweili- gen Geosynthesen der Untersuchungsräume bzw. Teiluntersuchungsräume zusammengestellt (siehe Kapitel 5.7) Dazu zählen insbesondere die räumliche Erstreckung der wesentlichen Barriere sowie Informationen zu dessen Eigenschaften, mit denen die wirtsgesteinsspezifische Beschreibung der wesentlichen Barriere detailliert wird. Zudem wird die Beschreibung der weiteren Barrieren auf- grund von ortsspezifischen Kenntnissen zum Wirtsgestein außerhalb des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs sowie zum Deck- und Nebengebirge konkretisiert.

Falls es erforderlich sein sollte, wird für die rvSU auf Basis ortsspezifischer Informationen zur hori- zontalen und vertikalen Ausdehnung des Wirtsgesteinsbereichs mit Barrierefunktion zudem im Rah- men einer Optimierung festgelegt, ob die Streckenlagerung auf ein oder zwei Einlagerungssohlen realisiert wird, vgl. Kapitel 4.2.5.

Für die anschließende Ermittlung des (teil-)untersuchungsraumspezifischen Flächenbedarfs eines möglichen Endlagerbergwerks wird auf Basis der im Rahmen der Geosynthese der Untersuchungs- räume bzw. Teiluntersuchungsräume gewonnenen Informationen zum Teufenbereich des jeweiligen Wirtsgesteins und zur zugehörigen initialen Temperatur im Einlagerungsbereich der (teil-)untersu- chungsraumspezifische Flächenbedarf ermittelt (vgl. Abbildung 16). Dieser ermittelte Flächenbedarf bildet eine Grundlage für die gemäß § 7 EndlSiUntV durchzuführenden Bewertungen im Rahmen der Analyse des geplanten Endlagersystems (vgl. Kapitel 8.6.3).

In Beispiel 29 und Beispiel 30 werden dreidimensionale Visualisierungen der untersuchungsraum- spezifischen Endlagerplanung in den Teilgebieten 001\_00TG\_032\_01IG\_T\_f\_jmOPT (Opalinuston) und 035\_00TG\_057\_00IG\_S\_s\_z (Bahlburg) vorgestellt.

*Beispiel 29: Beispielhafte Visualisierung der Endlagerauslegung im Teilgebiet 001\_00TG\_032\_01IG\_T\_f\_jmOPT (Opalinuston)*

#### Beispielhafte Visualisierung der Endlagerauslegung im Teilgebiet 001\_00TG\_032\_01IG\_T\_f\_jmOPT (Opalinuston)

Anhand der bekannten geologischen Daten des Untersuchungsraums ließ sich in einem CAD Programm eine beispielhafte vorläufige Endlagerauslegung im Opalinuston visualisieren (Ab- bildung 57). Die farblich markierten Schichten des Gebirges stellen die Teufelsloch-Subforma- tion, in der das Endlager in einer Teufe von 683 m liegt, sowie die Schichten des Deck- und Nebengebirges dar. Die blauen Markierungen im Endlagerbergwerk stellen die voraussichtli- chen Positionen der Verschlussbauwerke in den Richtstrecken und Schächten dar.

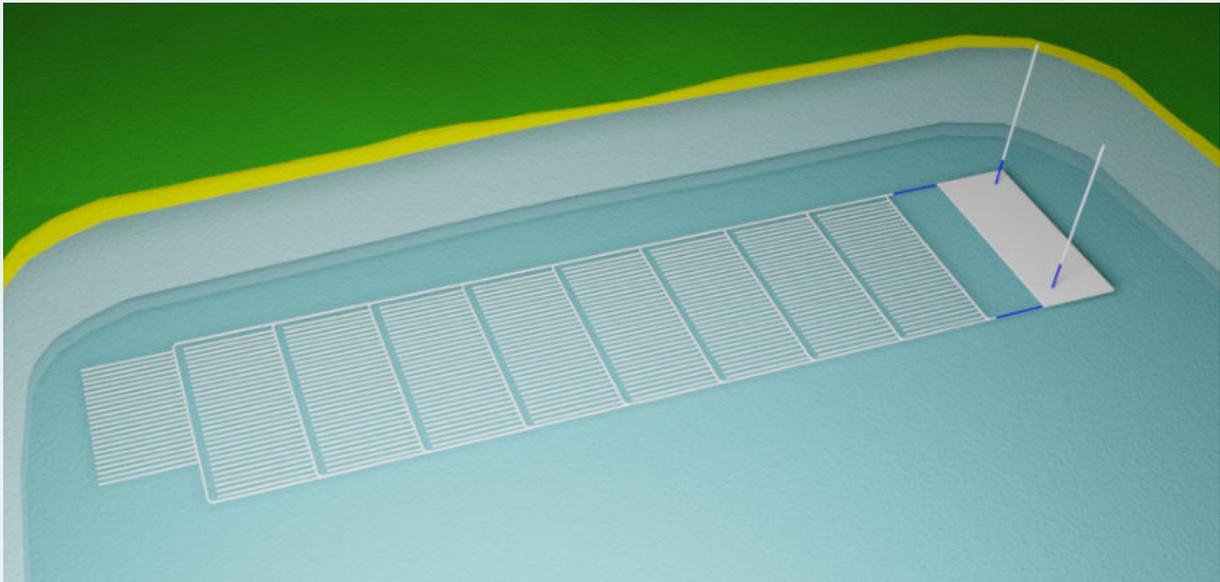
**Methodenbeschreibung zur Durchführung  
der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen  
gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung**



| Projekt | PSP-Element | Funktion/Thema | Komponente | Baugruppe | Aufgabe | UA | Lfd.-Nr. | Rev |
|---------|-------------|----------------|------------|-----------|---------|----|----------|-----|
| NAAN    | NNNNNNNNNN  | NNAAANN        | AANNNA     | AANN      | AAAA    | AA | NNNN     | NN  |
| SG      | 0330        |                |            |           | EA      | TF | 0002     | 00  |

Blatt: 223

**Beispielhafte Visualisierung der Endlagerauslegung im Teilgebiet  
001\_00TG\_032\_01IG\_T\_f\_jmOPT (Opalinuston)**



*Abbildung 57: Beispielhafte Visualisierung der Endlagerauslegung im Teilgebiet 001\_00TG\_032\_01IG\_T\_f\_jmOPT (Opalinuston) in Nahaufnahme*

*Beispiel 30: Beispielhafte Visualisierung der Endlagerauslegung im Teilgebiet 035\_00TG\_057\_00IG\_S\_s\_z (Bahlburg)*

**Beispielhafte Visualisierung der Endlagerauslegung im Teilgebiet  
035\_00TG\_057\_00IG\_S\_s\_z (Bahlburg)**

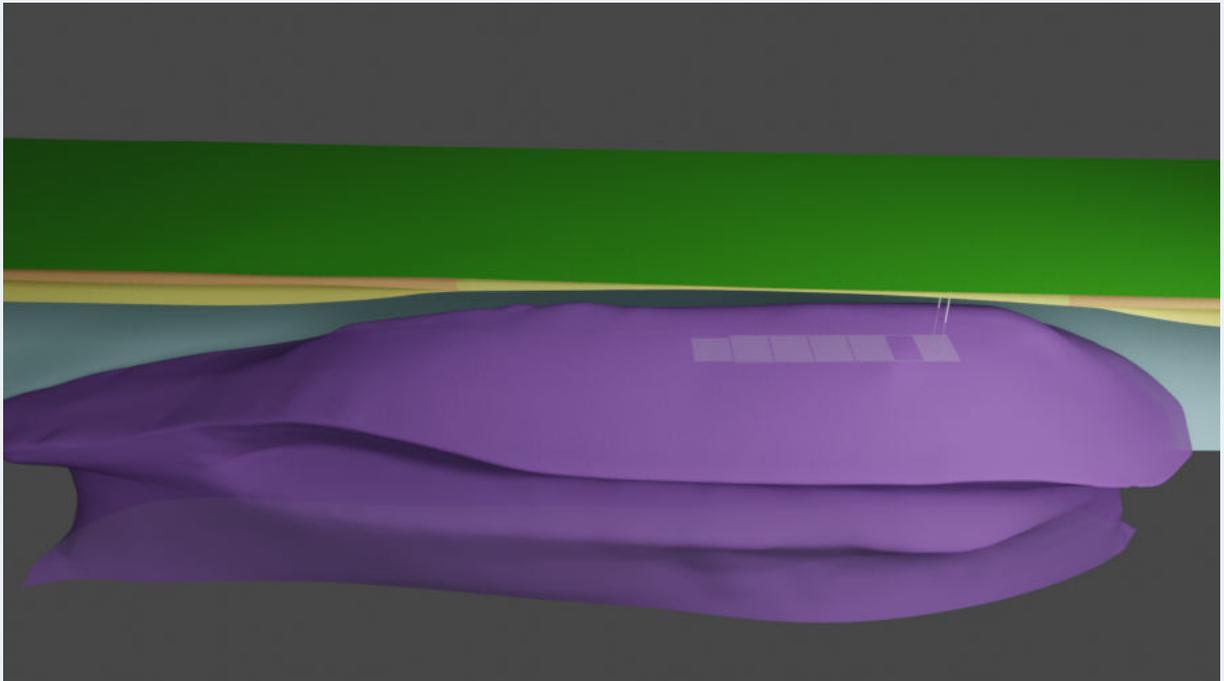
Anhand der bekannten geologischen Daten des Untersuchungsraums ließ sich in einem CAD Programm eine beispielhafte vorläufige Endlagerauslegung im Opalinuston visualisieren (Abbildung 58). Der in Lila eingefärbte Körper stellt den Salzstock dar, in der das Endlager in einer Teufe von ca. 850 m liegt. Die darüber liegenden eingefärbten Schichten stellen das Deck- und Nebengebirge dar. Abbildung 59 zeigt das gleiche Endlager aus der Nähe. Die grünen Markierungen im Endlagerbergwerk stellen die voraussichtlichen Positionen der Verschlussbauwerke in den Richtstrecken und Schächten dar.

**Methodenbeschreibung zur Durchführung  
der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen  
gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung**

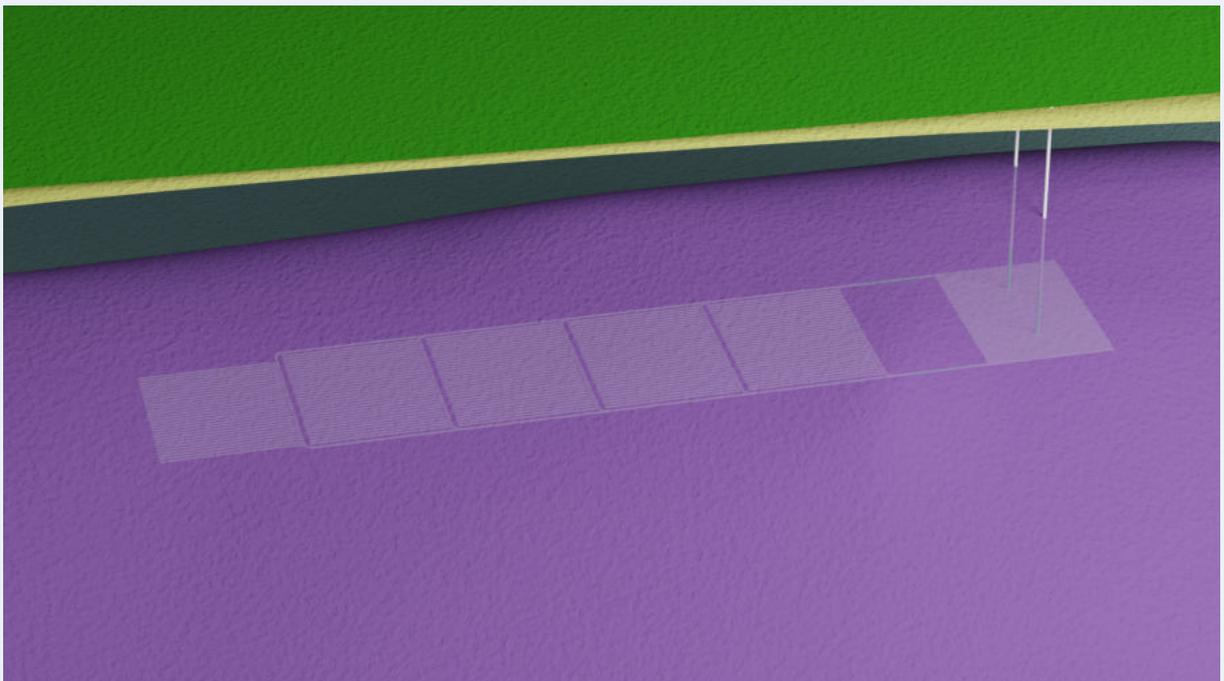
| Projekt | PSP-Element | Funktion/Thema | Komponente | Baugruppe | Aufgabe | UA | Lfd.-Nr. | Rev |
|---------|-------------|----------------|------------|-----------|---------|----|----------|-----|
| NAAN    | NNNNNNNNNN  | NNAAANN        | AANNNA     | AANN      | AAAA    | AA | NNNN     | NN  |
| SG      | 0330        |                |            |           | EA      | TF | 0002     | 00  |

Blatt: 224

**Beispielhafte Visualisierung der Endlagerauslegung im Teilgebiet  
035\_00TG\_057\_00IG\_S\_s\_z (Bahlburg)**



**Abbildung 58:** *Beispielhafte Visualisierung der Endlagerauslegung im Teilgebiet 035\_00TG\_057\_00IG\_S\_s\_z (Bahlburg) mit Ansicht des Salzstocks*



**Abbildung 59:** *Beispielhafte Visualisierung der Endlagerauslegung im Teilgebiet 035\_00TG\_057\_00IG\_S\_s\_z (Bahlburg) in Nahaufnahme*