

## Endlagerauslegung und -optimierung

Bericht zum Arbeitspaket 6

Vorläufige Sicherheitsanalyse  
für den Standort Gorleben

Erstellt von:

**DBE**TEC  
DBE TECHNOLOGY GmbH

GRS

nse  
international

The logo for nse international, featuring the letters 'nse' in a bold, lowercase font, with 'international' in a smaller font below it. To the right of the text is a stylized graphic element consisting of two overlapping, curved lines that form a shape resembling a lowercase 'd' or a similar symbol.



## Endlagerauslegung und -optimierung

Bericht zum Arbeitspaket 6

Vorläufige Sicherheitsanalyse  
für den Standort Gorleben

Wilhelm Bollingerfehr (DBETEC)  
Wolfgang Filbert (DBETEC)  
Sabine Dörr (DBETEC)  
Philipp Herold (DBETEC)  
Christian Lerch (DBETEC)  
Paul Burgwinkel (nse)  
Frank Charlier (nse)  
Bruno Thomauske (nse)  
Guido Bracke (GRS)  
Robert Kilger (GRS)

Juni 2012

Änderung der Vorbemerkung  
Dezember 2012

### **Anmerkung:**

Das FuE-Vorhaben UM10A03200 „Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben“ wurde im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) durchgeführt.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei dem Auftragnehmer. Die hierin geäußerten Meinungen müssen nicht der Meinung des Auftraggebers entsprechen.

## **Vorbemerkung – veränderte Zielsetzungen des Projekts VSG (Stand: Dezember 2012)**

Die Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben (VSG) ist ein Forschungsvorhaben der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS). Sie übernimmt die wissenschaftliche und organisatorische Leitung des vom Bundesministerium geförderten Projektes und bearbeitet selbst den Hauptteil der Arbeitspakete.

### **Ursprüngliche Zielsetzung**

In seiner ursprünglichen Konzeption wurden mit dem Projekt VSG im Wesentlichen drei Ziele verfolgt. Das erste Ziel bestand in der Erarbeitung einer systematischen Zusammenfassung des Kenntnissstands zu Gorleben. Darauf aufbauend sollte als zweites Ziel eine vorläufige Eignungsprognose erarbeitet werden. Diese Prognose sollte die Frage beantworten, ob und ggf. unter welchen Voraussetzungen am Standort Gorleben ein Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle betrieben werden könnte. Die Vorläufigkeit einer solchen Prognose ergibt sich dabei unter anderem zwangsläufig aus dem Umstand, dass eine endgültige Eignungsaussage nur nach einer vollständigen untertägigen Erkundung möglich ist, die in Gorleben nicht gegeben ist. Die dritte Zielsetzung der VSG bestand schließlich in der Identifizierung des noch bestehenden Bedarfs an Forschung und Entwicklung, also der standortspezifischen und standortunabhängigen Fragestellungen, die noch geklärt werden müssen.

### **Aktualisierte Zielsetzung**

Nach Beginn des Projekts wurde im politischen Raum ein breiter Konsens darüber erzielt, dass der Standort eines zukünftigen Endlagers für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle durch einen Vergleich verschiedener Standorte im Rahmen eines mehrstufigen Auswahlverfahrens gefunden werden soll. Aus dieser grundsätzlichen Entscheidung ergibt sich, dass die Frage der Eignung eines Standorts zukünftig nur noch im Vergleich mit anderen beantwortet werden kann. „Geeignet“ in diesem Sinn wird damit der Standort sein, der verschiedene grundsätzliche und vergleichsspezifische Kriterien erfüllt und sich damit als der im Hinblick auf die Sicherheit vergleichsweise beste Standort darstellt. Da diese Kriterien heute noch nicht feststehen, kann eine vorläufige Prognose einer so verstandenen Eignung für den Standort Gorleben im Rahmen der VSG nicht erarbeitet werden.

Vor diesem Hintergrund hat die GRS im Einvernehmen mit dem Bundesumweltministerium (BMU) als dem Zuwendungsgeber der VSG die Projektziele den veränderten Rahmenbedingungen angepasst. Danach bleiben die systematische Zusammenfassung des bisherigen Kenntnisstands zu Gorleben und die Identifizierung des zukünftigen Forschungs- und Entwicklungsbedarfs weiterhin Ziele der VSG. Die Änderungen betreffen die nachfolgenden Punkte:

- Die ursprünglich angestrebte vorläufige Eignungsprognose für den Standort Gorleben wird nicht erarbeitet. Es wird geprüft, ob die im Vorhaben VSG entwickelten Endlagerkonzepte im Verbund mit der geologischen Barriere am Standort Gorleben oder einem hinsichtlich der geologischen Situation vergleichbaren Salzstandort aus heutiger Sicht geeignet erscheinen, die Sicherheitsanforderungen des BMU zu erfüllen.
- Ergänzt werden die bisherigen Projektziele um eine Untersuchung der Frage, welche methodischen Ansätze der VSG in einem zukünftigen Standortauswahlverfahren sinnvoll zum Vergleich von Endlagerstandorten eingesetzt werden können. Unabhängig von der konkreten Ausgestaltung des zukünftigen Standortauswahlverfahrens ist bereits heute absehbar, dass es im Verlauf eines solchen Verfahrens immer wieder erforderlich sein wird, den bis zu einem bestimmten Verfahrensschritt erreichten Wissensstand zu den einzelnen Standorten systematisch zusammenzufassen und zu bewerten.

- Außerdem soll über die ursprünglichen Zielsetzungen hinaus untersucht werden, welche der in der VSG entwickelten technischen Konzepte zur Einlagerung der radioaktiven Abfälle und zum Verschluss des Endlagerbergwerks übertragbar auf Endlagersysteme an Standorten mit anderen geologischen Gegebenheiten sind.

### **Aktualisierte Projektplanung**

Durch den Ausstiegsbeschluss vom Mai 2011 hat sich die Prognose der zu erwartenden Gesamtmenge an wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen gegenüber jener, die zu Beginn des Projekts im Sommer 2010 anzunehmen war, erheblich verändert. Dies führte dazu, dass ein wesentlicher Teil der bis Mai 2011 durchgeführten Konzeptentwicklungen und Modellrechnungen mit den neuen Daten erneut durchgeführt und teilweise bereits fertiggestellte Teilberichte entsprechend durch aktualisierte Fassungen ergänzt werden mussten. Dieser zusätzliche Aufwand und die oben erwähnten Ergänzungen in der Zielsetzung der VSG führen dazu, dass das Projekt nicht – wie ursprünglich vorgesehen – Ende 2012 sondern Ende März 2013 abgeschlossen werden kann.

### **Projektpartner**

Da für die Bearbeitung der VSG spezialisiertes Fachwissen unterschiedlicher Disziplinen notwendig ist, sind neben der GRS verschiedene Partner in das Projekt eingebunden. Dazu zählen: Dr. Bruno Baltes, die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), die DBE TECHNOLOGY GmbH (DBE TEC), das Institut für Aufbereitung, Deponietechnik und Geomechanik der TU Clausthal (TUC), das Institut für Endlagerforschung der TU Clausthal (TUC), das Institut für Gebirgsmechanik GmbH (IfG), das Institut für Sicherheitstechnologie (ISTec), das Karlsruher Institut für Technologie/Institut für Nukleare Entsorgung (KIT/INE), die international nuclear safety engineering GmbH (nse; mehrere Institute der RWTH Aachen) sowie das Institut für Atmosphäre und Umwelt (IAU) der Universität Frankfurt.

### **Arbeitspakete**

Die Übersicht der Arbeitspakete (AP) der vorläufigen Sicherheitsanalyse Gorleben (VSG) umfasst:

- AP 1: Projektkoordination
- AP 2: Geowissenschaftliche Standortbeschreibung und Langzeitprognose
- AP 3: Abfallspezifikation und Mengengerüst
- AP 4: Sicherheits- und Nachweiskonzept
- AP 5: Endlagerkonzept
- AP 6: Endlagerauslegung und -optimierung
- AP 7: FEP-Katalog
- AP 8: Szenarienentwicklung
- AP 9: Integritätsanalysen
- AP 10: Analyse Freisetzungsszenarien
- AP 11: Bewertung Human Intrusion
- AP 12: Bewertung der Betriebssicherheit
- AP 13: Bewertung der Ergebnisse
- AP 14: Empfehlungen

**Deskriptoren:**

Betriebsabläufe, Endlagerauslegung und -optimierung, Endlagerbehälter, Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle, Gorleben, Grubengebäude, Rückholung und Bergung, Stilllegung und Rückbau, Tagesanlagen, Transport- und Einlagerungstechnik, Verfüll- und Verschlusskonzept

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung und Zielsetzung .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Grundlagen und Randbedingungen .....</b>	<b>5</b>
2.1	Abfallmengengerüst (Ausstiegsbeschluss).....	5
2.2	Abfallgebindegeometrien und -massen.....	8
2.2.1	Endlagerbehälter für die Variante B1 (Streckenlagerung) .....	9
2.2.2	Endlagerbehälter für die Variante B2 (Differenzbetrachtung zur Streckenlagerung) .....	10
2.2.3	Endlagerbehälter für die Variante C (Bohrlochlagerung) .....	11
2.2.4	Endlagerbehälter für die Variante A (radioaktive Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung) .....	14
2.2.5	Anzahl der Abfallgebinde mit Gesamtmasse/-volumina .....	15
2.3	Geologie .....	20
2.4	Radiologische Ausgangsdaten.....	23
2.5	Thermische Ausgangsdaten .....	23
2.5.1	Wärmeproduktion .....	24
2.5.2	Geothermisches Temperaturfeld.....	25
2.5.3	Thermisches Materialverhalten .....	26
2.6	Mechanische Ausgangsdaten .....	26
2.6.1	Grundspannungszustand.....	27
2.6.2	Mechanisches Materialverhalten.....	27
2.6.3	Thermomechanische Kopplung .....	27
2.7	Abgrenzungen zu Planungsgrundlagen in AP 5.....	28
<b>3</b>	<b>Endlagerauslegung und -optimierung .....</b>	<b>31</b>
3.1	Auslegungsanforderungen.....	31
3.1.1	Thermische Auslegungsanforderungen .....	32
3.1.2	Zusätzliche Auslegungsanforderungen .....	33

3.2	Endlagerkonzepte.....	34
3.3	Auslegung des Grubengebäudes.....	35
3.3.1	Kammerlagerung (Variante A) .....	36
3.3.2	Streckenlagerung (Variante B1).....	40
3.3.2.1	Thermische Berechnungen.....	40
3.3.2.2	Planungen der Einlagerungsfelder.....	66
3.3.2.3	Betrieblicher Strahlenschutz .....	70
3.3.2.4	Bewetterung .....	76
3.3.2.5	Verfüll- und Verschlussmaßnahmen .....	85
3.3.2.6	Rückholungskonzept .....	94
3.3.2.7	Bergung von Endlagerbehältern .....	117
3.3.3	Bohrlochlagerung (Variante C).....	119
3.3.3.1	Thermische Berechnungen.....	120
3.3.3.2	Planung der Einlagerungsfelder.....	133
3.3.3.3	Betrieblicher Strahlenschutz .....	143
3.3.3.4	Bewetterung .....	144
3.3.3.5	Verfüll- und Verschlussmaßnahmen .....	149
3.3.3.6	Rückholungskonzept .....	150
3.3.3.7	Bergung von Endlagerbehältern .....	155
3.3.4	Transport- und Lagerbehälter-Endlagerung (Variante B2) .....	156
3.3.4.1	Thermische Berechnungen.....	156
3.3.4.2	Planung der Einlagerungsfelder.....	160
3.3.4.3	Betrieblicher Strahlenschutz .....	174
3.3.4.4	Bewetterung .....	176
3.3.4.5	Verfüll- und Verschlussmaßnahmen .....	177
3.3.4.6	Rückholungskonzept .....	178
3.3.4.7	Bergung von Transport- und Lagerbehältern .....	182
3.4	Zeitabschätzung .....	182
<b>4</b>	<b>Optimierungsmöglichkeiten.....</b>	<b>185</b>
4.1	Optimierungsziele .....	185

4.2	Optimierungsmöglichkeiten von Endlagerkonzepten.....	186
4.2.1	Kammerlagerung (optionale Variante A).....	186
4.2.2	Streckenlagerung (Variante B1).....	187
4.3	Betriebssicherheit .....	189
4.4	Human Intrusion .....	190
<b>5</b>	<b>Nachweis der Unterkritikalität.....</b>	<b>193</b>
5.1	Einleitung.....	193
5.2	Rechenverfahren und Modellannahmen .....	194
5.3	Ausgediente Kernbrennstoffe aus Leichtwasserreaktoren .....	196
5.4	Ausgediente Kernbrennstoffe aus Versuchs- und Prototyp- Kernkraftwerken und Forschungsreaktoren .....	198
5.5	Bewertung .....	200
<b>6</b>	<b>Zusammenstellung identifizierter notwendiger FuE-Arbeiten.....</b>	<b>205</b>
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>211</b>
	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>217</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis.....</b>	<b>229</b>
	<b>Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>235</b>
	<b>Glossar/Abkürzungen/Stichwortverzeichnis .....</b>	<b>237</b>
<b>A</b>	<b>Anhang A: Bewetterung und Auswirkungen von Betriebsstörungen.....</b>	<b>239</b>
A.1	Einführung in das Programm NetzCAD.....	239
A.2	Modellannahmen .....	240
A.3	Betriebsstörungen und deren Einfluss auf die Bewetterung .....	241

<b>B</b>	<b>Anhang B: Thermische Grundlagen und Berechnungsmodelle.....</b>	<b>249</b>
B.1	Ableitung der Wärmeproduktion und ihr Modell .....	249
B.2	Stoffgleichungen und Materialparameter des thermischen Materialverhaltens .....	254
B.3	Stoffgleichungen und Materialparameter des mechanischen Materialverhaltens .....	257
B.4	Berechnungsmodelle zur thermischen Auslagung der Streckenlagerung – Variante B1 .....	263
B.5	Anpassung der Materialparameter für LinSour zur Berechnung der Streckenlagerung – Variante B1 .....	271
B.6	Berechnungsmodelle zur thermischen Auslegung der Bohrlochlagerung – Variante C .....	273
B.7	Anpassung der Materialparameter für LinSour zur Berechnung der Bohrlochlagerung – Variante C .....	281
	<b>Abbildungsverzeichnis der Anhänge A und B.....</b>	<b>283</b>
	<b>Tabellenverzeichnis der Anhänge A und B.....</b>	<b>285</b>

## 1 Einleitung und Zielsetzung

Eine wesentliche Aufgabe der VSG besteht in der Entwicklung von Endlagerkonzepten unter Berücksichtigung der geologischen Verhältnisse am Standort Gorleben auf der Basis des Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für die VSG /MÖN 12/. Die dafür erforderlichen Endlagerkonzepte, die als initiales Arbeitsmodell für alle weiteren technischen und sicherheitstechnischen Planungen und Modellbildungen dienen, wurden zum Beginn des Vorhabens entwickelt und im Bericht zum Arbeitspaket (AP) 5 „Endlagerkonzepte“ dokumentiert /BOL 11/. Auf der Grundlage der zum Vorhabensbeginn abgeschätzten Menge an radioaktiven Abfällen und ausgedienten Brennelementen und bereits vorliegender thermischer Berechnungen für ein Endlager im Salz wurden Grubengebäude konzipiert und die erforderlichen technischen Komponenten und Anlagen für den Endlagerbetrieb sowie ein Verfüll- und Verschlusskonzept erarbeitet. Im Rahmen der Arbeiten zum AP 6 wurden diese Konzepte durch Endlagerplanungen und -auslegungen optimiert. Dabei wurden zwei grundsätzlich unterschiedliche Varianten betrachtet. Zum einen sollen alle wärmeentwickelnden radioaktiven Abfälle und ausgediente Brennelemente in horizontalen Strecken eines Endlagerbergwerks in abschirmenden POLLUX<sup>®</sup>-Behältern eingelagert werden. Zum anderen wurde die Einlagerung aller dieser Abfälle in bis zu 300 m tiefen vertikalen Bohrlöchern untersucht. Für beide Varianten wurde als Option die Einlagerung einer bestimmten Menge von Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung betrachtet. Dadurch sollte geprüft werden, ob eine gemeinsame Endlagerung wärmeentwickelnder und vernachlässigbar wärmeentwickelnder Abfälle technisch machbar und sicherheitstechnisch sinnvoll ist. Für die Variante der Streckenlagerung wurde darüber hinaus im Sinne einer Differenzbetrachtung untersucht, ob und wie dieselbe Art und Menge von wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen und ausgedienten Brennelementen mittels Transport- und Lagerbehältern endgelagert werden kann. Zum Abschluss der VSG ist eine Analyse und Bewertung der Konsequenzen der Endlagerauslegung vorgesehen. Daraus werden Rückschlüsse erwartet, ob und in welcher Weise weitere Optimierungen notwendig sind, die wiederum im Zuge des weiteren Endlagerentwicklungsprozesses berücksichtigt werden können.

Grundlage der Planungen für den Bau, den Betrieb und den Verschluss des Endlagers war neben dem gesetzlichen Regelwerk (/ATG 11/, /SSV 11/) das zu Beginn des VSG-Vorhabens erarbeitete Sicherheits- und Nachweiskonzept im AP 4 /MÖN 12/. Mit dem Endlagerkonzept und den dabei geplanten technischen Komponenten, Systemen und

gewählten Prozessen soll das Sicherheitskonzept für die Betriebsphase und die Nachverschlussphase umgesetzt werden. Dazu gehören die Auswahl geeigneter Endlagerbehälter und Transport- und Handhabungssysteme sowie ein auf den langfristig sicheren Einschluss ausgerichtetes Verfüll- und Verschlusskonzept.

Änderungen von Planungsgrundlagen und Basisdaten haben Auswirkungen auf die Endlagerkonzepte. Die gravierende Reduzierung der zu erwartenden Menge von radioaktiven Abfällen und ausgedienten Brennelementen durch den Ausstiegsbeschluss vom Sommer 2011 /ATG 11/ sowie die am 30.09.2010 veröffentlichten BMU-„Sicherheitsanforderungen für die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle“ /BMU 10/ waren für die Endlagerauslegung die wesentlichen Veränderungen gegenüber den Grundlagen für das Endlagerkonzept aus AP 5 /BOL 11/. Zielsetzung der Arbeiten in AP 6 war es, unter Berücksichtigung aktualisierter Grundlagen entsprechende Endlagerkonzepte vertieft zu untersuchen und weiterzuentwickeln. Im vorliegenden Bericht werden die Ergebnisse dieser Endlagerauslegungs- und optimierungsarbeiten beschrieben. Grundlagen und Randbedingungen dafür waren neben dem schon erwähnten Sicherheitskonzept /MÖN 12/ ein aktualisiertes Abfallmengengerüst /PEI 11b/ und die bisher bekannten geologischen Bedingungen am Standort Gorleben /MRU 11/.

Im Kapitel 2 dieses Berichtes sind die verwendeten Grundlagen und die berücksichtigten Randbedingungen einschließlich der neuen Anforderung zur Rückholbarkeit eingelagerter Endlagerbehälter formuliert. Im Kapitel 3 ist die Endlagerauslegung für die vorgenannten Varianten umfänglich beschrieben. Das beinhaltet sowohl eine Zusammenstellung der Anforderungen als auch die jeweilige Auslegung des Grubengebäudes. Für jede Variante wurden der betriebliche Strahlenschutz, die Bewetterung, das Verfüll- und Verschlusskonzept sowie das Rückholkonzept beschrieben.

Im Kapitel 4 werden Aspekte der Endlageroptimierung gemäß den Optimierungszielen der BMU-Sicherheitsanforderungen betrachtet. Dabei werden Optimierungsmöglichkeiten im Hinblick auf Betriebs- und Langzeitsicherheit untersucht und auch Fragen zur besseren Verhinderung von unbeabsichtigtem menschlichem Eindringen in das Endlager behandelt. Darüber hinaus werden Ansätze zur Optimierung von Endlagerbehältern und -konzepten zur Verbesserung der Rückholbarkeit diskutiert.

Einen besonderen Stellenwert im Rahmen der langfristigen Sicherheit des Endlagers /BMU 10/ bildet der Nachweis des Kritikalitätsausschlusses für endgelagerte Brenn-

elemente. Die Ergebnisse der dazu durchgeführten Untersuchungen sind in Kapitel 5 beschrieben. Der Bericht schließt mit einem zusammenfassenden Kapitel zum identifizierten FuE-Bedarf (Kapitel 6) ab.



## **2 Grundlagen und Randbedingungen**

Für die Auslegung eines Endlagers sind zwei grundlegende Aspekte von besonderer Bedeutung. Zum einen müssen hinreichende Kenntnisse über Art und Menge der endzulagernden radioaktiven Abfälle und ausgedienten Brennelemente vorliegen. Zum anderen werden Kenntnisse über die geologischen Bedingungen am Standort für das geplante Endlager benötigt. Sofern zum Zeitpunkt einer vorläufigen Planung nicht alle notwendigen Kenntnisse vorliegen, müssen sinnfällige Annahmen getroffen werden. Im nachfolgenden Kapitel sind zum Abfallmengengerüst aktualisierte Daten gegenüber /BOL 11/ zusammengestellt worden.

Hinsichtlich der geologischen Randbedingungen am Standort Gorleben haben sich während der Laufzeit der VSG keine neuen auslegungsrelevanten Erkenntnisse ergeben. Insofern gelten dieselben Aussagen, wie sie in /BOL 11/ dokumentiert wurden. Im entsprechenden BGR-Bericht /MRU 11/ sind die bisherigen Erkundungsergebnisse ausführlich beschrieben. Im vorliegenden Bericht wird der dargestellten Endlagerauslegung das BGR-Arbeitsmodell zum strukturellen Aufbau des Salzstockes Gorleben zugrunde gelegt, das in /BFS 90/ dokumentiert ist.

Die in /BOL 11/ formulierten Annahmen und Randbedingungen hinsichtlich Salzrechten, Betriebssicherheit und Human Intrusion behalten auch bei der hier dargestellten Endlagerauslegung ihre Gültigkeit.

### **2.1 Abfallmengengerüst (Ausstiegsbeschluss)**

Für die VSG wurde das Abfallmengengerüst an radioaktiven Abfällen, die in einem Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle zu berücksichtigen sind, zusammengestellt /PEI 11b/. Zu diesen radioaktiven Abfällen zählen die ausgedienten Brennelemente aus den deutschen Leistungsreaktoren, die radioaktiven Abfälle aus der Wiederaufarbeitung der Brennelemente deutscher Leistungsreaktoren sowie die Brennelemente aus deutschen Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken und Forschungsreaktoren. Ergänzend zu diesen Abfällen werden radioaktive Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung, die evtl. in einem Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle zu berücksichtigen sind, als Option (Variante A) betrachtet.

In der Tab. 2.1 ist das Abfallmengengerüst der endzulagernden ausgedienten Brennelemente aus deutschen Leistungsreaktoren (DWR, SWR und WWER-DWR) aufgeführt /PEI 11b/. Die Mengenangaben berücksichtigen die im Sommer 2011 beschlossene Novelle des Atomgesetzes /ATG 11/. Darin sind die Laufzeiten der Leistungsreaktoren nicht nur auf deren Reststrommengen begrenzt worden, sondern auch endgültige Abschaltzeiten für die einzelnen Leistungsreaktoren festgelegt. Dadurch hat sich das Abfallmengengerüst der Brennelemente aus Leistungsreaktoren gegenüber der ursprünglichen Planung zu Beginn des Projektes reduziert.

**Tab. 2.1** Mengengerüst der ausgedienten Brennelemente aus Leistungsreaktoren

Abfallstrom: Leistungsreaktoren		Anzahl BE	Schwermetallmasse [t <sub>SM</sub> ]
DWR	UO <sub>2</sub>	12.450	6.415
	MOX	1.530	765
SWR	UO <sub>2</sub>	14.350	2.465
	MOX	1.250	220
WWER-DWR	UO <sub>2</sub>	5.050	580
Gesamt		34.630	10.445

Das Abfallmengengerüst der endzulagernden Abfälle aus der Wiederaufarbeitung ausgedienter Brennelemente deutscher Leistungsreaktoren ist in der Tab. 2.2 dargestellt /PEI 11b/. Zu den Wiederaufarbeitungsabfällen zählen die HAW-Kokillen (CSD-V) mit verglasten hochradioaktiven Spaltprodukten und Feedklärschlämmen, verglaste mittelradioaktive Deko- und Spülwässer (CSD-B) und kompaktierte mittelradioaktive Brennelementhülsen, Strukturteile und Technologieabfälle (CSD-C).

**Tab. 2.2** Mengengerüst der hochradioaktiven und wärmeentwickelnden Wiederaufarbeitungsabfälle

<b>Abfallstrom: Wiederaufarbeitungsabfälle</b>		<b>Anzahl Kokillen</b>
CSD-V (HAW-Kokillen)	AREVA NC (F)	3.025
	Sellafield Ltd. (UK)	570
	VEK (D)	140
	Summe	3.735
CSD-B	AREVA NC (F)	308
CSD-C	AREVA NC (F)	4.104

Die Tab. 2.3 gibt einen Überblick über die ausgedienten Brennelemente/Brennstäbe aus Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken und Forschungsreaktoren, die in Deutschland zu entsorgen sein werden /PEI 11b/. Hierbei handelt es sich um Brennelementkugeln der Arbeitsgemeinschaft Versuchsreaktor (AVR), Jülich, und des Thorium-Hoch-Temperaturreaktors (THTR 300), Hamm-Uentrop, um Brennstäbe der Kompakten Natriumgekühlten Kernreaktoranlage (KNK II), Karlsruhe, und des Nuklearschiffs Otto-Hahn und um Brennelemente der Forschungsreaktoren München II (FRM II) und Berlin (BER II).

**Tab. 2.3** Mengengerüst der ausgedienten Brennelemente (BE)/Brennstäbe (BS) aus Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken und Forschungsreaktoren

<b>Abfallstrom: Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerk/ Forschungsreaktor</b>	<b>Anzahl BE bzw. BS</b>
AVR	288.161 BE-Kugeln
THTR	617.606 BE-Kugeln
KNK II	2.484 Brennstäbe
Otto-Hahn	52 Brennstäbe
FRM II	ca. 120 – 150 MTR-BE
BER II	ca. 120 MTR-BE

Das Mengengerüst der als Option in die VSG aufgenommenen radioaktiven Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung ist in der Tab. 2.4 aufgeführt /PEI 11b/. Zu diesen radioaktiven Abfällen zählen der Graphit bzw. die graphithaltigen Abfälle aus dem Rückbau der Hochtemperaturreaktoren, die bei der Endlagerung von Brennstäben aus Leistungsreaktoren anfallenden Brennelement-Strukturteile, das bei der Urananreiche-

zung anfallende abgereicherte Uranoxid ( $U_3O_8$ ) und weitere nicht näher spezifizierte radioaktive Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung. Ursprünglich war es vorgesehen, alle radioaktiven Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung im Westfeld einzulagern. Im Zuge der Endlageroptimierung wurde beschlossen, dass die Brennelement-Strukturteile aufgrund ihrer Charakteristik im Bereich der ausgedienten Brennelemente endgelagert werden.

**Tab. 2.4** Mengengerüst der Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung

<b>Abfallstrom: Radioaktive Abfälle mit vernachlässig- barer Wärmeentwicklung</b>	<b>Abfallvolumen netto [m<sup>3</sup>]</b>
Graphit und graphithaltige Abfälle	1.000
Brennelement-Strukturteile	430
Uranoxid ( $U_3O_8$ )	35.000
Nicht näher spezifizierte vernachlässigbar wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle	8.813

## 2.2 Abfallbindegeometrien und -massen

Im Folgenden werden die für die im Kapitel 2.1 aufgeführten radioaktiven Abfälle ausgewählten Endlagerbehälter für die genannten unterschiedlichen Varianten beschrieben. Da es bisher keine genehmigungsreifen Behälterplanungen oder erteilte Zulassungen gibt, wird angenommen, dass die hier beschriebenen Behälter die Anforderungen erfüllen können.

Danach erfolgt basierend auf dem dargestellten Abfallmengengerüst und den ausgewählten Endlagerbehältern die Abschätzung der Anzahl der entsprechenden Abfallbinde je Variante. Darüber hinaus werden die Gesamtmassen und -volumina der Abfallbinde aus der Anzahl der Abfallbinde und den Abmessungen bzw. Massen der Endlagerbehälter ermittelt.

### 2.2.1 Endlagerbehälter für die Variante B1 (Streckenlagerung)

Für die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in horizontalen Strecken (Variante B1) werden folgende POLLUX<sup>®</sup>- und CASTOR<sup>®</sup>-Behälter ausgewählt:

- POLLUX<sup>®</sup>-10-Behälter zur Aufnahme von Brennstäben ausgedienter Brennelemente aus DWR, SWR und WWER
- POLLUX<sup>®</sup>-9-Behälter zur Aufnahme von CSD-V (HAW-Kokillen), CSD-B und CSD-C
- CASTOR<sup>®</sup>-Behälter zur Aufnahme von ausgedienten Brennelementen aus Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken und Forschungsreaktoren

POLLUX<sup>®</sup>-Behälter wurden für die Endlagerung in Salz konzipiert und ausgelegt. Für die CASTOR<sup>®</sup>-Behälter für die ausgedienten Brennelemente aus Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken und Forschungsreaktoren sind solche Planungen nachzuholen. Im Rahmen dieser Konzeptplanung wird angenommen, dass die Behälter nach Ertüchtigung für die Endlagerung geeignet sind.

Die POLLUX<sup>®</sup>-10-Behälter können wahlweise mit den Brennstäben von 10 DWR-Brennelementen, 30 SWR-Brennelementen oder 25 WWER-DWR-Brennelementen beladen werden. Je POLLUX<sup>®</sup>-9-Behälter wird von einer Beladung mit 9 CSD-V, 9 CSD-B oder 9 CSD-C ausgegangen. Der CASTOR<sup>®</sup> THTR/AVR kann wahlweise mit einer Stahlkanne mit etwa 2.100 THTR-BE oder mit zwei Stahlkannen mit insgesamt ca. 1.900 AVR-BE beladen werden. Die Beladung des CASTOR<sup>®</sup> KNK erfolgt entweder mit 9 Büchsen vom Typ Phenix (Brennstäbe des KNK) oder mit 8 Büchsen vom Typ Phenix und in der zentralen Tragkorbposition mit einer Büchse vom Typ OH (Brennstäbe der Otto-Hahn). Beim CASTOR<sup>®</sup> MTR 2 sind verschiedene Beladevarianten mit Brennelementen von verschiedenen Forschungsreaktoren, z. B. FRM II und BER II, zulässig.

Im Abschlussbericht des AP 5 werden die einzelnen Endlagerbehälter für die Variante B1 ausführlich beschrieben und abgebildet /BOL 11/.

In Tab. 2.5 sind die Abmessungen und Massen zu den Endlagerbehältern für die Variante B1 (Streckenlagerung) zusammengestellt.

**Tab. 2.5** Abmessungen und Massen der Endlagerbehälter für die Variante B1 (Streckenlagerung)

<b>Endlagerbehälter</b>	<b>Länge/ Höhe</b>	<b>Durch- messer</b>	<b>Gebinde- volumen</b>	<b>Max. Gebinde- masse</b>
	<b>[mm]</b>	<b>[mm]</b>	<b>[m³]</b>	<b>[Mg]</b>
POLLUX <sup>®</sup> -10/ POLLUX <sup>®</sup> -9 <sup>1)</sup>	5.517	1.560 <sup>2)</sup>	10,55	65
CASTOR <sup>®</sup> THTR/AVR	2.784	1.380 <sup>2)</sup>	4,16	26
CASTOR <sup>®</sup> KNK	2.784	1.380 <sup>2)</sup>	4,16	26
CASTOR <sup>®</sup> MTR 2	1.631	1.430 <sup>2)</sup>	2,62	16

<sup>1)</sup> ohne Tragzapfen

<sup>2)</sup> Annahme: gleiche Dimension und Masse wie POLLUX<sup>®</sup>-10

### **2.2.2 Endlagerbehälter für die Variante B2 (Differenzbetrachtung zur Streckenlagerung)**

Bei der Differenzbetrachtung zur Streckenlagerung (Variante B2) wird die Verwendung von Transport- und Lagerbehältern (TLB) als Endlagerbehälter für die DWR-, SWR- und WWER-BE in CASTOR<sup>®</sup> V/19, CASTOR<sup>®</sup> V/52, CASTOR<sup>®</sup> 440/84 und der Wiederaufarbeitungsabfälle in CASTOR<sup>®</sup> HAW 20/28 CG, TS 28 V, CASTOR<sup>®</sup> HAW 28M, TN85 und TGC36 betrachtet. Diese Transport- und Lagerbehälter haben eine Zulassung für den Transport und die Zwischenlagerung von ausgedienten Brennelementen und Wiederaufarbeitungsabfällen. Der Eignungsnachweis solcher Behälter für die Endlagerung ist noch zu erbringen. Für die Endlagerkonzeptplanung im Rahmen VSG wird die Eignung vorausgesetzt.

Die Beladung der einzelnen Transport- und Lagerbehälter ist je nach Typ und zulässiger Abfallart unterschiedlich. Der CASTOR<sup>®</sup> V/19 ist für die Beladung mit 19 DWR-Brennelementen, der CASTOR<sup>®</sup> V/52 für die Beladung mit 52 SWR-Brennelementen und der CASTOR<sup>®</sup> 440/84 ist für die Beladung mit bis zu 84 WWER-Brennelementen zugelassen. Der CASTOR<sup>®</sup> HAW 20/28 CG und der TS 28 V können mit 20 oder 28 CSD-V beladen werden. Die Transport- und Lagerbehälter CASTOR<sup>®</sup> HAW 28 M und

TN 85 sind für die Beladung mit 28 CSD-V zugelassen. Darüber hinaus ist vorgesehen, dass der CASTOR® HAW 28 M ebenfalls mit 28 CSD-B beladen werden kann. Der TGC 36 wird für die Beladung mit 36 CSD-C ausgelegt.

In /BOL 11/ werden die Endlagerbehälter für die Variante B2 ausführlich beschrieben und abgebildet.

In Tab. 2.6 sind die Abmessungen und Massen zu den Endlagerbehältern für die Differenzbetrachtung zur Streckenlagerung zusammengestellt.

**Tab. 2.6** Abmessungen und Massen der Endlagerbehälter für die Variante B2 (Differenzbetrachtung)

Endlagerbehälter	Länge/ Höhe [mm]	Durch- messer [mm]	Gebinde- volumen [m <sup>3</sup> ]	Max. Gebinde- masse [Mg]
CASTOR® V/19	5.940 <sup>1)</sup>	2.440	27,8	126
CASTOR® V/52	5.530 <sup>1)</sup>	2.440	25,9	124
CASTOR® 440/84	4.080	2.660	22,7	116
CASTOR® HAW 20/28 CG	6.110 <sup>1)</sup>	2.480	29,5	112
TS 28 V	6.100 <sup>1)</sup>	2.500	29,9	112
CASTOR® HAW 28M	6.122 <sup>1)</sup>	2.430	28,4	115
TN 85	6.200 <sup>1)</sup>	2.480	29,9	110
TGC 36	Keine Angaben, da der Behälter derzeit entwickelt wird			

<sup>1)</sup> inkl. Schutzplatte

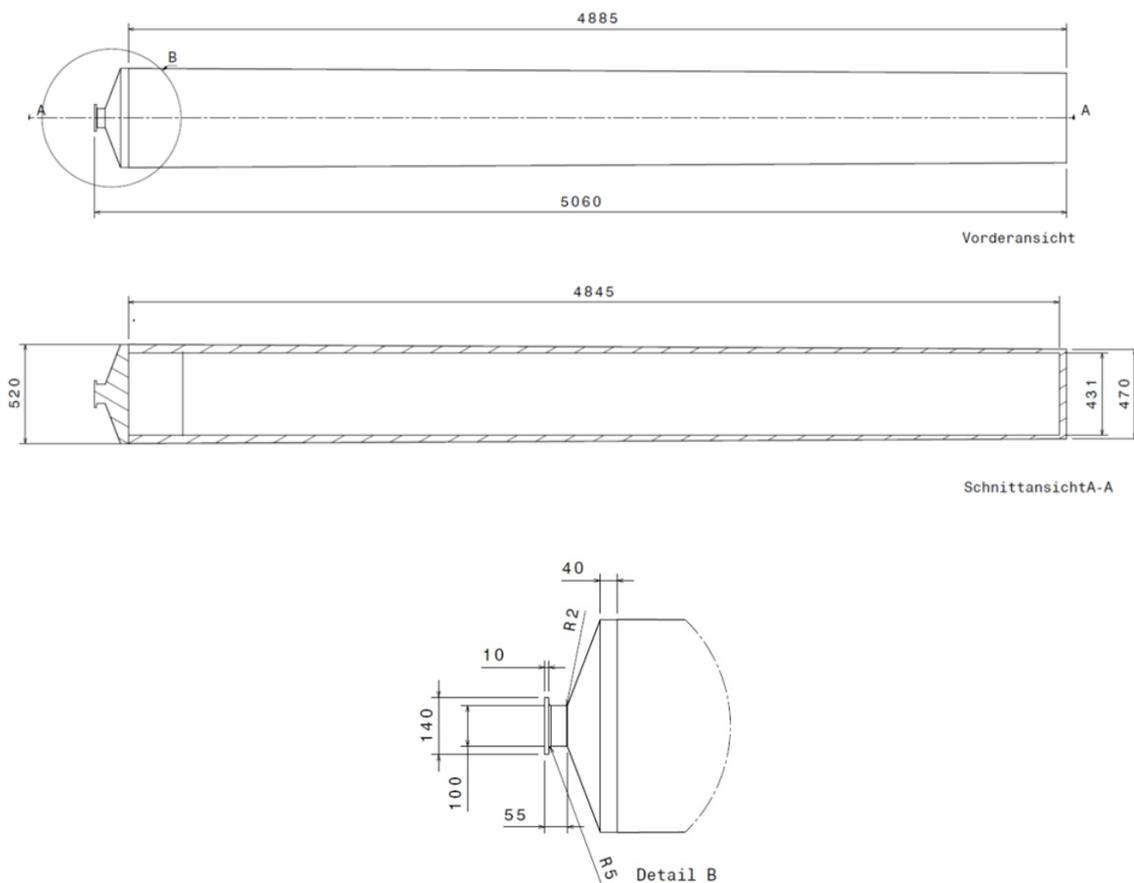
### 2.2.3 Endlagerbehälter für die Variante C (Bohrlochlagerung)

Für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen vertikalen Bohrlöchern wurden bei der Konzeption in AP 5 Brennstabkaskaden (BSK) für die direkte Endlagerung ausgelegter Brennelemente und Triple-Packs für die Endlagerung der Abfälle aus der Wiederaufarbeitung vorgesehen. Die BSK besteht aus einem zylindrischen Behälterkörper mit einem angepressten oder angeschweißten Boden. Zur Handhabung des Behälters weist der Schweißdeckel einen Tragpilz auf. Die BSK kann die Brennstäbe von 3 DWR-Brennelementen, 9 SWR-Brennelementen, 7,5 WWER-Brennelementen oder eine unterschiedliche Anzahl an Brennelementen/Brennstäben von Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken und Forschungsreaktoren aufnehmen. Bei den Triple-Packs han-

delt es sich um 3 CSD-V, 3 CSD-B oder 3 CSD-C in einem zylindrischen Behälterkörper, der im Wesentlichen den Abmaßen der BSK entspricht /BOL 11/.

Aus den Forderungen der Rückholbarkeit der Endlagerbehälter während der Betriebszeit des Endlagers /BMU 10/ resultieren neue Anforderungen an die Auslegung der BSK und des Triple-Packs für die Bohrlochlagerung. Deshalb wurde ein Behälter-Layout gewählt, das erlaubt, die oben genannten Brennelemente/Brennstäbe und auch die Kokillen mit Wiederaufarbeitungsabfällen aufzunehmen /NSE 12/. Im Rahmen der Weiterentwicklung des Bohrlochkonzeptes und unter Berücksichtigung der Sicherheitsanforderungen für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle /BMU 10/ wurde ein Konzept für eine rückholbare Kokille in optimierter Form (nachfolgend BSK-R genannt) entwickelt.

Die Länge der entworfenen BSK-R wird im Wesentlichen durch die Länge der Brennstäbe, eine analog zur bisherigen BSK berücksichtigte Abschirmung und einen für die Rückholung modifizierten Deckel mit Tragpilz bestimmt. Der Durchmesser der BSK-R wird bestimmt durch den Durchmesser der radioaktiven Abfälle aus der Wiederaufarbeitung sowie durch die konisch ausgeführte Kokillenwandung. Die Konizität wurde gewählt, um bei einer Rückholung das Ziehen der BSK-R aus der Verrohrung, die mit Versatz gefüllt werden soll, zu erleichtern. Die Wandstärke der BSK-R beträgt im unteren Ende 19,5 mm und am oberen Ende 44,5 mm. Zur Handhabung der BSK-R weist der Schweißdeckel einen Tragpilz auf. Zusätzlich ist der Kopf der Kokille mit einer Steigung von ca. 20° ausgeführt, um bei der Befüllung oder Rückholung ein Abfließen des Versatzes um den Tragpilz herum zu erleichtern. In der Abb. 2.1 ist die BSK-R schematisch dargestellt /NSE 12/. Für eine konkretisierende Planung von Kokillen im Anschluss an die VSG ist die Entwicklung von zwei Layouts möglich: Ein Layout für die Brennstäbe aus den Leistungsreaktoren mit einem geringeren Durchmesser und ein zweites Layout für die CSD-B/-C/-V-Kokillen mit einer reduzierten Länge /NSE 12/.



**Abb. 2.1** BSK-R (rückholbare Kokille für Brennstäbe und für Kokillen) /NSE 12/

Die in /BOL 11/ beschriebene modifizierte Brennstabkokille für die Brennelement-Kannen der Hochtemperaturreaktoren THTR-300 und AVR werden aufgrund ihrer geringen Anzahl in der konzeptionellen Betrachtung der Rückholung aus Bohrlöchern nicht berücksichtigt.

In der Tab. 2.7 sind die wichtigsten Daten der BSK-R für die Bohrlochlagerung zusammengestellt.

**Tab. 2.7** Abmessungen und Masse der BSK-R für die Variante C (Bohrlochlagerung)

<b>Endlager- behälter</b>	<b>Länge/ Höhe</b>	<b>Durch- messer oben</b>	<b>Durch- messer unten</b>	<b>Gebin- de- volumen</b>	<b>Max. Gebin- de- masse</b>	<b>Transport- gebinde- volumen</b>
	<b>[mm]</b>	<b>[mm]</b>	<b>[mm]</b>	<b>[m<sup>3</sup>]</b>	<b>[Mg]</b>	<b>[m<sup>3</sup>]</b>
BSK-R	5.060	520	470	0,94	5,3	7,41 <sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Transferbehälter: Länge = 5.570 mm, Durchmesser 1.305 mm (Annahme)

#### **2.2.4 Endlagerbehälter für die Variante A (radioaktive Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung)**

Aufgrund der Art der hier zu berücksichtigenden Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung wurden Behälter zugrunde gelegt, die auch für die Verpackung der Abfälle für das Endlager Konrad zu verwenden sind (Behältergrundtypen). Die Hauptfunktion dieser Endlagerbehälter besteht ebenfalls darin, die in ihnen verpackten radioaktiven Stoffe während der Transport- und Handhabungsprozesse sicher und dicht zu umschließen. Sollte in Planungsphasen, die über den Rahmen der VSG hinausgehen, diese Option weiterverfolgt werden, wäre die hier getroffene Annahme, dass die gewählten Behältertypen die Anforderungen erfüllen, zu überprüfen.

Für die Endlagerung der radioaktiven Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung in der VSG werden die folgenden Verpackungen ausgewählt:

- Gussbehälter Typ II ohne Blei-Abschirmung für den Graphit und die graphithaltigen Abfälle,
- Gussbehälter Typ II mit 120 mm Blei-Abschirmung für die Brennelement-Strukturteile (Variante B1),
- Stahlblechcontainer Typ VI für das Uranoxid (U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>),
- Stahlblechcontainer Typ IV, Gussbehälter Typ II ohne Blei-Abschirmung und Betonbehälter Typ I aus Normal- und aus Schwerbeton für die nicht näher spezifizierten vernachlässigbar wärmeentwickelnden radioaktiven Abfälle.

Im Abschlussbericht des AP 5 werden die Endlagerbehälter für die Variante A ausführlich beschrieben und abgebildet /BOL 11/.

In der Tab. 2.8 sind die Abmessungen und Massen der Endlagerbehälter für die Variante A aufgeführt. Die Abmessungen und Massen der rückholbaren Kokille für die Einlagerung der Brennelement-Strukturteile sind identisch mit den Abmessungen und Massen der BSK-R bei der Bohrlochlagerung (s. Tab. 2.7).

**Tab. 2.8** Abmessungen und Massen der Abfallgebinde für die Variante A

<b>Abfallgebinde</b>	<b>Länge/ Durchmesser [mm]</b>	<b>Breite [mm]</b>	<b>Höhe [mm]</b>	<b>Max. Gebinde- masse [Mg]</b>	<b>Gebinde- volumen [m<sup>3</sup>]</b>
Betonbehälter Typ I	Ø 1.060	-	1.370 <sup>1)</sup>	4 <sup>4)</sup>	1,2
Gussbehälter Typ II	Ø 1.060	-	1.500 <sup>2)</sup>	10 <sup>4)</sup>	1,3
Container Typ IV	3.000	1.700	1.450 <sup>3)</sup>	20	7,4
Container Typ VI	1.600	2.000	1.700	20	5,4

<sup>1)</sup> Höhe 1.370 mm + Lasche von 90 mm = 1.460 mm

<sup>2)</sup> Höhe 1.370 mm beim Typ KfK

<sup>3)</sup> Stapelhöhe 1.400 mm beim Typ KfK

<sup>4)</sup> aus /PEI 11b/

### **2.2.5 Anzahl der Abfallgebinde mit Gesamtmasse/-volumina**

Auf Basis der in Tab. 2.1 bis Tab. 2.4 dargestellten Mengengerüste wurde die Anzahl der entsprechenden Abfallgebinde für die jeweilige Variante wie in Tab. 2.9 bis Tab. 2.12 dargestellt abgeschätzt. Die Tab. 2.13 bis Tab. 2.15 enthalten die dazugehörigen Daten über die Gesamtmassen und -volumina der Abfallgebinde für die jeweiligen Varianten.

**Tab. 2.9** Anzahl der Endlagerbehälter für die Variante B1 – Streckenlagerung

Abfallart		Endlagerbehälter	
		Bezeichnung	Anzahl
Ausgediente Brennelemente aus Leistungsreaktoren	DWR	POLLUX®-10	1.398
	SWR		520
	WWER-DWR		202
	Summe		2.120
CSD-V	AREVA NC (F)	POLLUX®-9	415
	Sellafield Ltd. (UK)		
	VEK (D)		
CSD-B	AREVA NC (F)	POLLUX®-9	35
CSD-C	AREVA NC (F)	POLLUX®-9	456
Ausgediente Brennelemente aus Versuchs- und Prototyp-KKW's und Forschungsreaktoren	AVR	CASTOR® THTR/AVR	152
	THTR		305
	KNK II	CASTOR® KNK	4
	Otto-Hahn		
	FRM II	CASTOR® MTR 2	30
	BER II		20
	Summe	-	511
Brennelement-Strukturteile	Summe	Gussbehälter Typ II	2.620

**Tab. 2.10** Anzahl der Endlagerbehälter für die Variante B2 – Differenzbetrachtung zur Streckenlagerung

Abfallart		Endlagerbehälter	
		Bezeichnung	Anzahl
Ausgediente Brennelemente	DWR	CASTOR® V/19	736
	SWR	CASTOR® V/52	300
aus Leistungsreaktoren	WWER-DWR	CASTOR® 440/84	61
	Summe	-	1.097
CSD-V	AREVA NC (F)	CASTOR® HAW 20/28 CG CASTOR® HAW 28M TN 85 TS 28 V	134
	Sellafield Ltd. (UK)	CASTOR® HAW 28M	
	VEK (D)	CASTOR® HAW 20/28 CG	
CSD-B	AREVA NC (F)	CASTOR® HAW 28M	11
CSD-C	AREVA NC (F)	TGC36	114
Ausgediente Brennelemente	AVR	CASTOR® THTR/AVR	152
	THTR		305
aus Versuchs- und Prototyp-KKW's und Forschungsreaktoren	KNK II	CASTOR® KNK	4
	Otto-Hahn		
	FRM II	CASTOR® MTR 2	30
	BER II		20
	Summe		-

**Tab. 2.11** Anzahl der Endlagerbehälter für die Variante C – Bohrlochlagerung

Abfallart		Endlagerbehälter	
		Bezeichnung	Anzahl
Ausgediente Brennelemente aus Leistungsreaktoren	DWR	BSK-R	4.660
	SWR		1.734
	WWER-DWR		674
	Summe		7.068
CSD-V	AREVA NC (F)	BSK-R	1.245
	Sellafield Ltd. (UK)		
	VEK (D)		
CSD-B	AREVA NC (F)	BSK-R	103
CSD-C	AREVA NC (F)	BSK-R	1.368
Ausgediente Brennelemente aus Versuchs- und Prototyp-KKW's und Forschungsreaktoren	AVR	BSK-R	152
	THTR		305
	KNK II	BSK-R	5
	Otto-Hahn		
	FRM II	BSK-R	30
	BER II		26
	Summe	BSK-R	290
Brennelement-Strukturteile	Summe	BSK-R	874

**Tab. 2.12** Anzahl der Endlagerbehälter für die Variante A – radioaktive Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung

Abfallart	Endlagerbehälter	
	Bezeichnung	Anzahl
Graphit und graphithaltige Abfälle	Gussbehälter Typ II	2.300
Uranoxid (U <sub>3</sub> O <sub>8</sub> )	Container Typ VI	7.217
nicht näher spezifizierte vernachlässigbar wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle	Container Typ IV	1.695
	Gussbehälter Typ II	1.150
	Betonbehälter Typ I	800

**Tab. 2.13** Gesamtmasse und -volumen der Endlagerbehälter für die Variante B1 – Streckenlagerung

Abfallgebinde	Anzahl	Gesamtvolumen [m <sup>3</sup> ]	Gesamtmasse [Mg]
POLLUX <sup>®</sup> -10	2.120	22.366	137.800
POLLUX <sup>®</sup> -9	906	9.559	58.890
CASTOR <sup>®</sup> -Behälter <sup>1</sup>	511	1.633	2.789
Gussbehälter Typ II	2.620	3.144	26.200
Summe	6.157	36.702	235.676

<sup>1)</sup> CASTOR<sup>®</sup> THTR/AVR, CASTOR<sup>®</sup> KNK und CASTOR<sup>®</sup> MTR 2

**Tab. 2.14** Gesamtmasse und -volumen der Endlagerbehälter für die Variante B2 – Streckenlagerung

Abfallgebinde	Anzahl	Gesamtvolumen [m <sup>3</sup> ]	Gesamtmasse [Mg]
CASTOR <sup>®</sup> V/19	736	20.461	92.736
CASTOR <sup>®</sup> V/52	300	7.770	37.200
CASTOR <sup>®</sup> 440/84	61	1.385	7.076
Transport- und Lagerbehälter <sup>1</sup>	259	7.687	29.008
CASTOR <sup>®</sup> -Behälter <sup>2</sup>	511	1.633	2.789
Summe	1.867	38.936	168.809

<sup>1)</sup> CASTOR<sup>®</sup> HAW 20/28 CG, CASTOR<sup>®</sup> HAW 28M, TN 85, TS 28V, TGC36

<sup>2)</sup> CASTOR<sup>®</sup> THTR/AVR, CASTOR<sup>®</sup> KNK und CASTOR<sup>®</sup> MTR 2

**Tab. 2.15** Gesamtmasse und -volumen der Endlagerbehälter für die Variante C – Bohrlochlagerung

Abfallgebinde	Anzahl	Gesamtvolumen [m <sup>3</sup> ]	Gesamtmasse [Mg]
BSK-R	11.176	10.506	Keine Angabe

**Tab. 2.16** Gesamtmasse und -volumen der Endlagerbehälter für die Variante A – radioaktive Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung

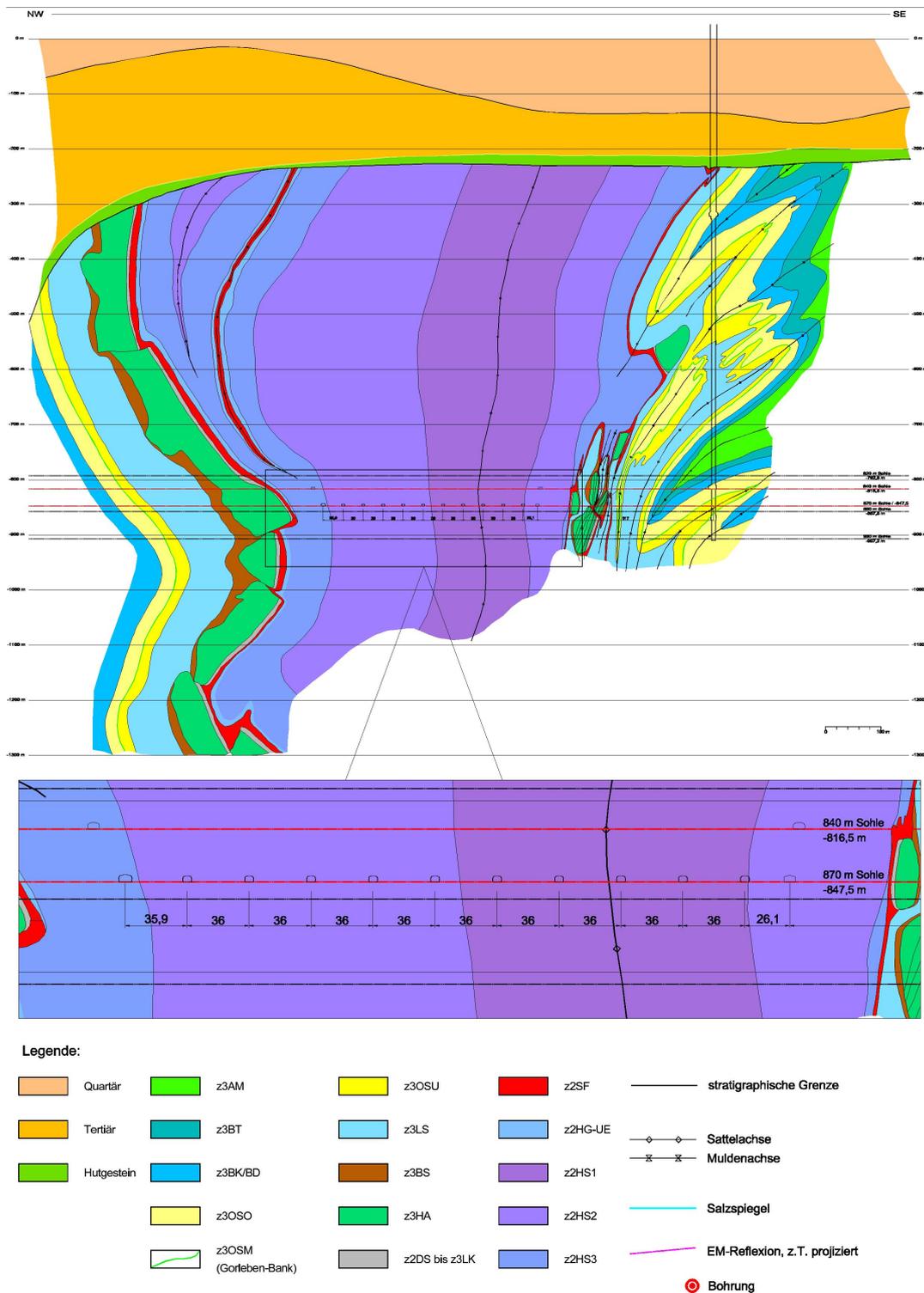
<b>Abfallgebinde</b>	<b>Anzahl</b>	<b>Gesamtvolumen [m<sup>3</sup>]</b>	<b>Gesamtmasse [Mg]</b>
Betonbehälter Typ I	800	960	3.200
Gussbehälter Typ II	3.450	4.485	34.500
Container Typ IV	1.695	12.543	33.900
Container Typ VI	7.217	38.972	144.340
Summe	13.162	56.960	215.940

## 2.3 Geologie

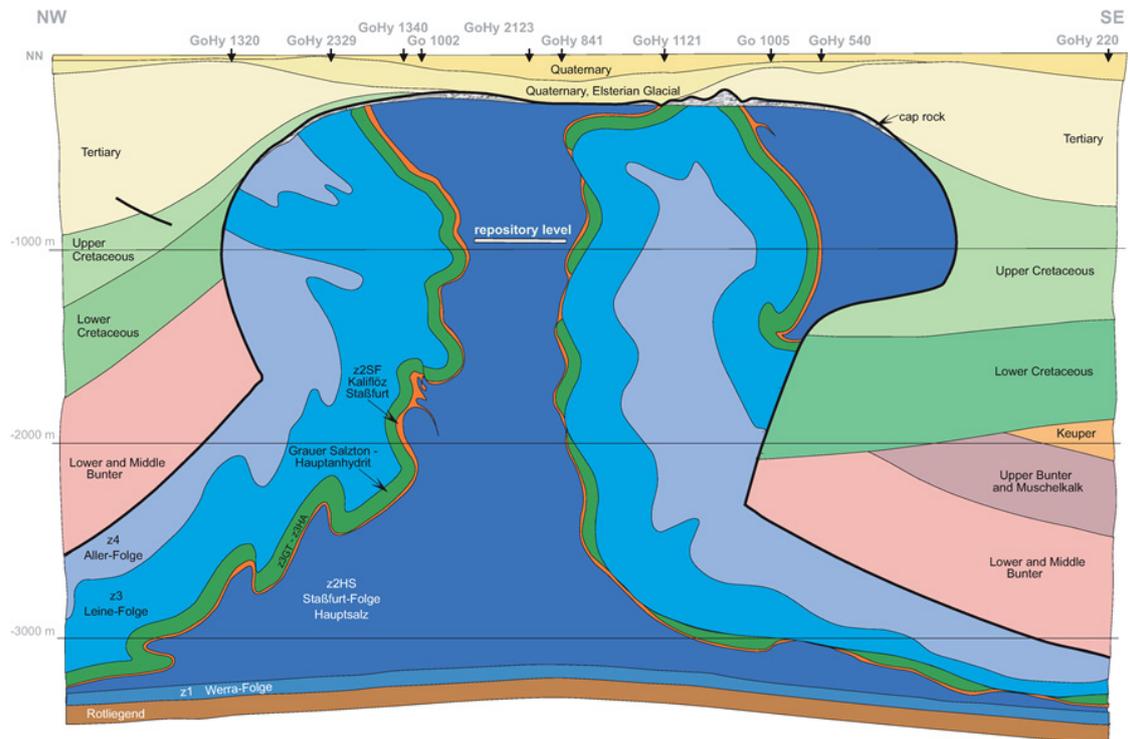
Der Kenntnisstand zur geologischen Situation am Standort Gorleben ist – wie bereits in /BOL 11/ erwähnt – in vier BGR-Berichten mit Stand 2000 dokumentiert. Als Planungsgrundlage für die Endlagerauslegung diente dementsprechend das BGR-Arbeitsmodell zum strukturellen Aufbau des Salzstockes Gorleben. Neuere für die Endlagerauslegung relevante Erkenntnisse wurden zwischenzeitlich nicht gewonnen. Insofern wird an dieser Stelle auf die Ausführungen in /BOL 11/ verwiesen. Für die thermische Auslegung wurde ein Referenzdatensatz aus den Erkundungsergebnissen von Querschlag West genommen.

Für den Salzstock Gorleben existieren zwei Vertikalschnitte an den Stellen Querschlag 1 West und Querschlag 1 Ost. Dort ist die geologische Situation im Erkundungsbereich EB1 beschrieben /BOR 08/. Von diesen beiden Vertikalschnitten wurde innerhalb des Projektes VSG der Schnitt Querschlag 1 West, Abb. 2.2, wegen seines höheren Detaillierungsgrades als repräsentativ für den gesamten Einlagerungsbereich angenommen. Abb. 2.2 basiert auf /BGR 02/, wobei anstelle des dort enthaltenen Querschlags in der für die Arbeiten in AP 6 und AP 9 verwendeten Abbildung die Projektion eines Einlagerungsfeldes der Variante B1 enthalten ist. In dem vergrößert dargestellten Auszug aus dem Vertikalschnitt sind zehn Einlagerungsstrecken für die Variante Streckenlagerung (B1) eingezeichnet. Die für diesen Vertikalschnitt aus den Erkundungsergebnissen bekannten geologischen Daten wurden für die thermischen Auslegungsberechnungen verwendet. Somit sind die damit berechneten geometrischen Parameter für die Einlagerungsfelder (Behälter-, Streckenabstände) und auch die thermisch bedingten Belastungen für die Schachtverschlussauslegung gekoppelt an die reale am Standort ange-troffene geologische Situation. Es wird im Rahmen der Endlagerauslegung davon

ausgegangen, dass die geologische Situation im EB1 auf die noch nicht erkundeten Bereiche übertragbar ist.



**Abb. 2.2** Geologischer Vertikalschnitt Querschlag 1 West mit Projektion eines Einlagerungsfeldes mit zehn Einlagerungsstrecken in der Variante B1 /BGR 02/



**Abb. 2.3** Vereinfachter schematischer Schnitt /BOR 91/

In Abb. 2.3 ist ein größerer Ausschnitt des im Hinblick auf den strukturellen Salzstockaufbau weiter vereinfachten schematischen Vertikalschnitts durch den Salzstock Gorleben dargestellt. Im Unterschied zu dem in Abb. 2.2 gezeigten Vertikalschnitt sind hier z. T. feinstratigraphische Einheiten zusammengefasst. Diese zeigen lokal noch einen älteren Erkundungsstand. Folgende Eigenschaften werden auf Grundlage des Vertikalschnittes (Abb. 2.3) bei der thermischen Auslegung berücksichtigt:

- Der als Einlagerungs- bzw. Nahfeldbereich vorgesehene innere Kern des Salzstocks besteht aus den als Homogenbereiche vorliegenden Einheiten des Hauptsalzes z2HS1 bis z2HS3, an die das Kaliflöz Staßfurt z2SF und der Hauptanhydrit z3HA angrenzen.
- Auf Höhe der Einlagerungssohle weist der Salzstock nach NW noch eine Mächtigkeit von über 1 km in den jüngeren Zechsteinfolgen auf, nach SE sind es fast 2 km, wobei nach einer gut 1 km mächtigen Leine- und Allerfolge eine ca. 800 m mächtige überkippte Staßfurtfolge anschließt.
- In der Vertikalen durch den Querschlag 1 West befindet sich der Salzspiegel in einer Tiefe von -230 mNN, die 870 m-Sohle als Einlagerungssohle in einer Tiefe von -858 mNN und das Rotliegende in einer Tiefe von unter -3.000 mNN.

- Auf der NW-Seite des Salzstocks liegt der Hauptanhydrit entlang eines Stranges in zerblockter Form vor, die SE-Seite ist in der Leinefolge durch eine starke Faltenbildung geprägt, entsprechend stark ist der Hauptanhydrit auch dort zerblockt. Die einzelnen Anhydritschollen schwimmen im umgebenden Steinsalz.

## **2.4 Radiologische Ausgangsdaten**

In /PEI 11b/ sind die Gesamtaktivitäten im Endlager bei dessen Betriebsende im Jahr 2075 ermittelt worden. Demnach weisen die in der VSG angesetzten radioaktiven Abfälle im Jahr 2075 eine Gesamtaktivität von ca.  $6,2 \cdot 10^{19}$  Bq im Endlager auf, die sich vorwiegend auf die ausgedienten Brennelemente aus Leistungsreaktoren (ca.  $5,3 \cdot 10^{19}$  Bq) und die verglasten hochradioaktiven Spaltprodukte und Feedklärschlämme (CSD-V) aus der Wiederaufarbeitung (ca.  $9,0 \cdot 10^{18}$  Bq) aufteilt. Die Gesamtaktivität an  $\alpha$ -Strahlern im Jahre 2075 beträgt ca.  $6,4 \cdot 10^{18}$  Bq, die sich ebenfalls vorwiegend auf die ausgedienten Brennelemente aus Leistungsreaktoren (ca.  $6,2 \cdot 10^{18}$  Bq) und die CSD-V (ca.  $2,0 \cdot 10^{17}$  Bq) aufteilen. Der angegebene Wert der Gesamtaktivitäten berücksichtigt auch die Aktivität der Hüllrohre und Strukturmaterialien der Brennelemente.

Die Gesamtaktivitäten der Brennelemente/Brennstäbe aus den Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken und Forschungsreaktoren und der anderen radioaktiven Abfälle aus der Wiederaufarbeitung (CSD-B und CSD-C) wurden in /PEI 11b/ ebenfalls ermittelt. Im Jahr 2075 liegt die Gesamtaktivität der Brennelemente/Brennstäbe aus den Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken und Forschungsreaktoren in der Größenordnung von  $1 \cdot 10^{16}$  Bq, die Gesamtaktivität der CSD-B in der Größenordnung von  $1 \cdot 10^{14}$  Bq. Kalkulatorisch wurde in der Gesamtaktivität neben der Aktivität der verglasten Abfälle auch die Aktivität der CSD-C aus der Wiederaufarbeitung berücksichtigt.

## **2.5 Thermische Ausgangsdaten**

Die thermischen Basisdaten beinhalten drei Teile: die Wärmeproduktion der berücksichtigten wärmeentwickelnden Abfälle, das geothermische Temperaturfeld am Einlagerungsstandort und die Beschreibung des thermischen Materialverhaltens.

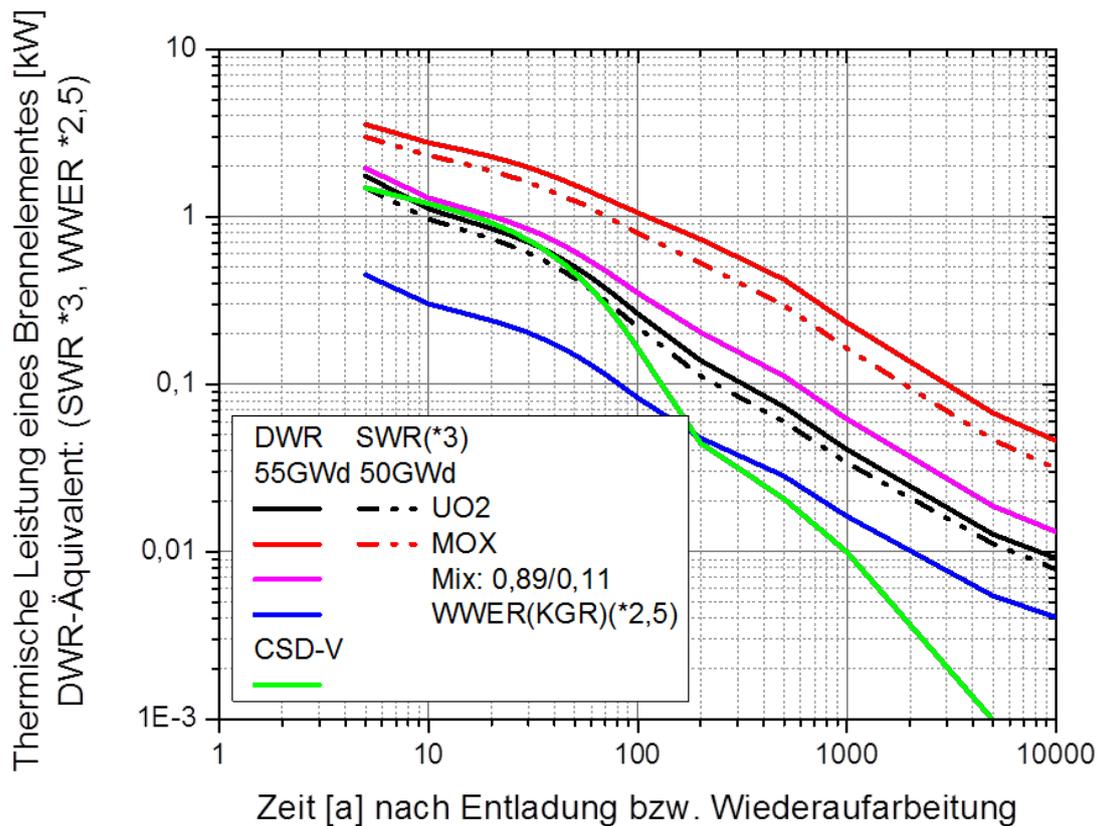
### 2.5.1 Wärmeproduktion

Von den in /PEI 11b/ behandelten Abfallströmen werden für die thermischen Berechnungen die der bestrahlten Brennelemente aus Leistungsreaktoren und der des radioaktiven Abfalls aus der Wiederaufarbeitung berücksichtigt.

In Abb. 2.4 ist die thermische Leistung der einzelnen BE-Typen in einer zur Behälterbeladung mit DWR-BE äquivalenten Bestückung dargestellt. Wie die Abbildung zeigt, ist die thermische Leistung bei Beladung mit Brennstäben von DWR-BE gegenüber der von SWR-BE bei gleichem Brennstofftyp stets höher. Die Abfallströme der SWR-BE werden thermisch abdeckend den DWR-BE zugerechnet.

Die thermische Leistung wird aus der Referenzleistung, der Gesamtanzahl der BE und deren Gesamtmasse Schwermetall bestimmt. Eine massenspezifische Referenzleistung ist in /PEI 11b/ für die einzelnen Abfallströme angegeben. Wie in Abb. 2.4 dargestellt werden die Leistungsdaten in /PEI 11b/ erst ab einem Zeitpunkt von 5 Jahren nach Reaktorentnahme bzw. Wiederaufarbeitung angegeben. In Anhang B.1 ist die Herleitung der in Abb. 2.4 dargestellten Leistungskurven angegeben sowie die in den thermischen Auslegungsberechnungen verwendete mathematische Funktion mit ihren Parametern.

Für die Einlagerung von MOX-BE, die im Vergleich zu  $\text{UO}_2$ -BE eine hohe Wärmeproduktion aufweisen, wurde eine Behälterbeladung entwickelt, die zum überwiegenden Anteil aus den Brennstäben von DWR-BE besteht und zu einem geringen Anteil aus denen der MOX-BE /AME 05/. Das in der VSG verwendete Verhältnis in der Behälterbeladung von 89 %  $\text{UO}_2$ -Anteil und 11 % MOX-Anteil entspricht dem Mischungsverhältnis, welches sich aus dem Verhältnis der Gesamtmengen von DWR- $\text{UO}_2$ -BE und DWR-MOX-BE ableitet.



**Abb. 2.4** Thermische Leistung eines Brennelementes in Abhängigkeit von der Zeit, beladungsäquivalent zu einem DWR-BE, sowie die thermische Leistung einer CSD-V

### 2.5.2 Geothermisches Temperaturfeld

In /BGR 03a/ wurde das natürliche ungestörte Temperaturfeld des Erkundungsbereiches 1 (EB1) anhand von drei Tiefbohrungen und acht untertägigen geologischen Erkundungsbohrungen bestimmt. Bei der hier durchgeführten thermischen Auslegung beschränkt sich das Modellgebiet im Wesentlichen auf den Salzkörper, entsprechend ist auch nur das Temperaturfeld im Salzkörper relevant.

Im Niveau der 840-m-Erkundungssohle beträgt die mittlere Gesteinstemperatur 37,97 °C und der Temperaturgradient in vertikaler Richtung -2,35 K/100 m. Zusätzlich wird in /BGR 03a/ ein Gradient in horizontaler Richtung ausgewiesen, der in S-N-Richtung 0,151 K/100 m und in W-O-Richtung 0,012 K/100 m beträgt. Die Abweichung gegenüber dem Mittelwert beträgt innerhalb der Ausdehnung des EB1 weniger als 0,5 K. Vor dem Hintergrund der Prognoseunsicherheit für die weiteren Einlagerungsbereiche, dem geringen Einfluss, den diese Abweichung auf das viskoplastische Verhalten

ten des Steinsalzes und die thermische Auslegung hat, sowie der Ungenauigkeit in der Abfallspezifikation bleibt diese horizontale Anisotropie bei der Auslegung unberücksichtigt.

Vor dem Hintergrund einer Gebirgstemperatur von ca. 40 °C im Einlagerungsbereich und einer Auslegungstemperatur von 200 °C für das Steinsalz steht zur Einlagerung des radioaktiven Abfalls eine Temperaturreserve von 160 K zur Verfügung.

### **2.5.3 Thermisches Materialverhalten**

Der Energietransport wird allein durch die Wärmeleitung beschrieben. Die numerische Berechnung folgt Standardverfahren. Die Beschreibung der Materialparameter lehnt sich eng an die Angaben in /BGR 00/ an. In den Varianten der Streckenlagerung wird für den Versatz der Strecken bzw. des horizontalen Großbohrlochs Salzgrus verwendet. Dadurch, dass Salzgrus unmittelbar am Endlagerbehälter anliegt und die Wärmeleitfähigkeit des Salzgrus auch vom Kompaktionsgrad abhängt, kommt dem Salzgrus bei der thermischen Auslegung besondere Bedeutung zu /WIE 12/. Die Funktionen des thermischen Materialverhaltens und die Materialparameter der einzelnen Gesteinsbereiche und Materialgruppen werden eingehend in Anhang B.2 behandelt.

### **2.6 Mechanische Ausgangsdaten**

Das Ziel der Berechnungen ist zwar die thermische Auslegung des Grubengebäudes, die Notwendigkeit eines mechanischen Berechnungsanteils ergibt sich jedoch in den Varianten B1 und B2 der Streckenlagerung aus der Abhängigkeit der thermischen Materialparameter vom Kompaktionszustand des Salzgrus. Salzgrusversatz ist in der Variante C nicht in unmittelbarer Nähe der Endlagerbehälter vorgesehen, sondern in der Überfahrungsstrecke über den Einlagerungsbohrlöchern. Der Einfluss der Überfahrungsstrecke in der thermischen Auslegung ist gering und wurde deshalb vernachlässigt.

Die mechanischen Basisdaten beinhalten zwei Teile: den Grundspannungszustand und die Beschreibung des mechanischen Materialverhaltens.

### **2.6.1 Grundspannungszustand**

Der Grundspannungszustand wird im Salz und im Deckgebirge als lithostatisch isotrop mit der in Tab. B.5 angegebenen Dichte von  $2.200 \text{ kg/m}^3$  angesetzt /BGR 03b/. Für die Einlagerungssohle, die 870 m-Sohle, ergibt sich daraus ein Grundspannungszustand in der Größe von 18,8 MPa.

### **2.6.2 Mechanisches Materialverhalten**

Im mechanischen Materialverhalten wird das thermoelastische-viskoplastische Materialverhalten der einzelnen Materialgruppen berücksichtigt. Bei Salzgrus, das als Versatzmaterial ausgewählt wurde, kommt zusätzlich noch dessen Kompaktionsfähigkeit zum Tragen. Für die geologischen Materialien lehnt sich die Beschreibung der Stoffansätze und deren Parameter eng an die Angaben in /BGR 00/ an. Die Beschreibung des mechanischen Verhaltens von Salzgrus basiert auf den experimentellen Daten aus /KOR 96/. Die Funktionen des mechanischen Materialverhaltens und die Materialparameter der einzelnen Gesteinsbereiche und Materialgruppen werden eingehend in Anhang B.3 behandelt.

### **2.6.3 Thermomechanische Kopplung**

In einer thermomechanisch gekoppelten Berechnung wirkt die Temperaturänderung der thermischen Seite über die thermische Expansion auf die Spannungsänderung der mechanischen Seite. Der Koppelparameter zwischen den beiden Seiten ist der thermische Ausdehnungskoeffizient, der hier ebenfalls als isotrop angenommen wird.

Das Ziel der Berechnungen ist die thermische Auslegung des Grubengebäudes und nicht die der Behälter. Aus numerischen Gründen bleibt die thermische Expansion des Behälters und der darin enthaltenen Materialien unberücksichtigt. Die Berechnungen zur Variante C, der Bohrlochlagerung, wurden auf einer rein thermischen Basis durchgeführt. Die thermische Ausdehnung entfällt dort. Für die Gesteine werden die thermischen Ausdehnungskoeffizienten entsprechend /BGR 00/ verwendet, Tab. 2.17.

**Tab. 2.17** Thermomechanische Koppelparameter der vorliegenden Gesteinseinheiten und von Salzgrus

Material	Thermischer Ausdehnungskoeffizient $\alpha_T$
Deckgebirge	$1,0 \cdot 10^{-5}$
Steinsalz	$4,0 \cdot 10^{-5}$
Kalisalz	$2,5 \cdot 10^{-5}$
Hauptanhydrit	$1,6 \cdot 10^{-5}$
Salzgrus, trocken	$4,0 \cdot 10^{-5}$

## 2.7 Abgrenzungen zu Planungsgrundlagen in AP 5

Die Endlagerplanungen im AP 5 wurden in Konzepttiefe durchgeführt. Dabei wurden die bis Ende 2010 vorliegenden Grundlagen, Daten und Kenntnisse, die für die Planung eines Endlagers für wärmeentwickelnde Abfälle erforderlich sind, zugrunde gelegt und um aus Analogiebetrachtungen gewonnene Annahmen ergänzt, wenn keine Daten vorlagen. Auf dieser Basis wurden Konzepte für die Tagesanlagen, Transport- und Einlagerungstechnik, das Grubengebäude im Salzstock Gorleben sowie die Betriebsabläufe, das Verfüll- und Verschlusskonzept und die Stilllegung beschrieben.

In der hier vorliegenden Endlagerauslegung und -optimierung wurden die Grundlagen und die darauf aufbauenden Endlagerkonzepte grundsätzlich beibehalten. Jedoch mussten die zwischenzeitlich veränderten Randbedingungen wie ein reduziertes Abfallmengengerüst gemäß dem Ausstiegsbeschluss vom Sommer 2011 aus der friedlichen Nutzung der Kernenergie und die Ende 2010 vom BMU vorgegebenen Sicherheitsanforderungen für Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle berücksichtigt werden. Letztere fordern u. a. die Möglichkeit der Rückholung der eingelagerten Endlagerbehälter in der Betriebsphase des Endlagers und eine Handhabung der Endlagerbehälter bis zu einem Zeitraum von 500 Jahren nach Verschluss des Endlagers für den Fall einer Bergung. Dies führte zum einen zu einem räumlich kleineren Endlager und zum anderen zur Überprüfung aller Einlagerungskonzepte und zu einer Neukonzeption für die Bohrlochlagerung.

Für die Einlagerungskonzepte Streckenlagerung B1 und B2 und Bohrlochlagerung C wurden im Rahmen der Auslegungsplanungen umfangreiche thermische Berechnungen durchgeführt, um den Nachweis zu führen, dass die thermischen Auslegungswerte

an allen Stellen im Endlager zu jeder Zeit eingehalten werden. Ebenso wurde im Unterschied zur Endlagerkonzeption im AP 5 der rechnerische Nachweis geführt, dass während des Endlagerbetriebes alle Betriebspunkte mit ausreichenden Frischwettermengen versorgt werden.

Da die Endlagerbehälter für die zu betrachtende Art und Menge von radioaktiven Abfällen und ausgedienten Brennelementen bis auf eine Ausnahme unverändert geblieben sind, wurden die Tagesanlagen und die Transport- und Einlagerungstechniken nicht erneut beschrieben, sondern auf die Darstellungen im AP 5-Bericht verwiesen. Die Ausnahme stellt für die Bohrlochlagerung eine rückholbare Kokille (BSK-R) dar, die neu konzipiert wurde und den Anforderungen nach Rückholbarkeit aus einem verrohrten Bohrloch genügt.

Im AP 6-Bericht sind zudem weitere Optimierungsmöglichkeiten für das Endlager aufgezeigt und in einer gesonderten Untersuchung die Fragen zum Kritikalitätsausschluss behandelt worden.



### **3 Endlagerauslegung und -optimierung**

Die Planung und Auslegung eines Endlagers für wärmeentwickelnde Abfälle erfolgt für eine bestimmte Art und Menge von radioaktiven Abfällen in einem ausgewählten Wirtsgestein. Im Rahmen der vorliegenden Planungen werden in den nachfolgenden Kapiteln zunächst die relevanten Anforderungen beschrieben. Anschließend folgt für die vorgenannten Varianten (Streckenlagerung, Bohrlochlagerung sowie einer Differenzbetrachtung zur Einlagerung von Transport- und Lagerbehältern) die Auslegung des jeweiligen Endlagerbergwerkes. Für jede Variante werden die Ergebnisse der thermischen Berechnungen dargestellt. Weiterhin beinhaltet die Endlagerauslegung für das geplante Grubengebäude Planungen zum betrieblichen Strahlenschutz, zur Bewetterung und zum Verfüll- und Verschlusskonzept. Da die Rückholung in der Betriebsphase und eine Handhabung der Endlagerbehälter für eine mögliche Bergung bis zu 500 Jahre nach Verschluss des Endlagers Auslegungsgrundlagen sind, wurden dafür entsprechende Planungen durchgeführt und beschrieben.

Die angenommene Art und Menge von Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung wird bei der Auslegung durch einen von den wärmeentwickelnden Abfällen getrennten Endlagerflügel berücksichtigt. Dieser separate Bereich des Grubengebäudes wurde für alle betrachteten Einlagerungsvarianten unverändert beibehalten.

#### **3.1 Auslegungsanforderungen**

Bei der Entwicklung von Endlagerkonzepten im Rahmen der Arbeiten im AP 5 /BOL 11/ wurden grundlegende Annahmen, die den Planungen zugrunde gelegt wurden, beschrieben. Das betraf Annahmen zur geometrischen Ausprägung der geologischen Struktur des Salzstockes im geplanten Einlagerungshorizont in 870 m Teufe. Diese Annahmen gelten auch für die vorliegenden Planungen. In gleicher Weise wurden die Anforderungen und Annahmen zum sicheren Betrieb des Endlagers (siehe AP 12-Bericht) und hinsichtlich denkbarer Szenarien für unbeabsichtigtes, menschliches Eindringen in das verschlossene Endlager beibehalten.

### 3.1.1 Thermische Auslegungsanforderungen

Das Ziel der in dieser Arbeit beschriebenen thermischen Berechnungen ist es, die thermische Belastung des Wirtsgesteins abzuschätzen. Für eine bestimmte Einlagerungskonfiguration bestehend aus Einlagerungskonzept und Behälterbauweise lassen sich Bemessungswerte substituieren. Das ist in der Vergangenheit erfolgt /MER 79/, /FRE 85/, indem die Grenztemperatur zum Schutz der chemischen Integrität der Glasmatrix in einer CSD-V eingehalten wird, wenn die Temperatur auf der Behälteroberfläche den thermischen Auslegungswert von 200 °C für Steinsalz nicht überschreitet /WOL 12/. In dem damals untersuchten Konzept erfolgte die Einlagerung unmittelbar im Steinsalz. Eine abweichende Einlagerungskonfiguration, wie sie sich z. B. aus der Einlagerung von CSD-V in POLLUX®-Behältern in Strecken oder in Triple-Packs in verrohrten Bohrlöchern ergibt, erfordert eine Neubewertung. Die thermische Auslegung der Behälter ist Bestandteil der Behälterzulassung, so dass keine maximal zulässigen Grenztemperaturen für den Behälter und die darin enthaltenden Materialien abgeleitet und in den Berechnungen berücksichtigt werden.

Das Wirtsgestein besteht im Umfeld der Einlagerungsfelder aus Steinsalzen der Zechsteinserie 2 (z2). In einer Entfernung von ca. 50 m zu den Richtstrecken ist beim Übergang vom z2 zum Zechstein 3 (z3) mit carnallitischem Gestein zu rechnen, dem Kaliflöz Staßfurt z2SF sowie im Anschluss daran mit Hauptanhydrit z3HA /BOR 08/. Aus thermischer Sicht ergibt sich für diese drei Gesteinstypen folgendes:

- Das Steinsalz des z2 liegt überwiegend als Hauptsalz vor. Hierbei handelt es sich im Wesentlichen um Halit. Ausgehend von der Häufigkeit und Verteilung des als Nebengemengeanteil vorkommenden Anhydrits (zwischen 2 % und 12 %) wird es feinstratigraphisch in Knäuelsalz z2HS1, Streifensalz z2HS2 und Kristallbrockensalz z2HS3 unterschieden. Erst im z2HS3 bzw. im Übergang zum Hangendsalz z2HG tritt bei Annäherung an die Hangendgrenze auf weniger als 10 m Polyhalit auf /BOR 08/. Polyhalit beginnt ab ca. 230 °C Kristallwasser freizusetzen /ROT 86/. Mit der Begrenzung der Maximaltemperatur im Steinsalz auf 200 °C ist die thermische Stabilität des Polyhalits sicher gewährleistet.
- Carnallitit zersetzt sich in Abhängigkeit vom Wasserdampfpartialdruck und der Temperatur /WOL 12/. Für ein vollständig eingespanntes und porenraumfreies System liegt der Schmelzpunkt bei 167,5 °C. Beide Bedingungen sind im Umfeld der Einlagerungsfelder erfüllt, solange keine Dilatanz im Carnallitit auftritt. Als Folge des bei der Auffahrung berücksichtigten Sicherheitsabstands werden

carnallitische Gesteinspartien nur durch die Zugangsstrecken aus den Infrastruktur- in die Einlagerungsbereiche direkt aufgeschlossen. Das beeinflusste Gesteinsvolumen ist allerdings gering und diese Streckenabschnitte werden unmittelbar nach der Durchfahrung abgedichtet. Bezüglich des Fernfeldeffekts zeigen die Berechnungsergebnisse in /KOC 12/, dass, abgesehen von hohlraumnahen Auflockerungszonen, in den hier betrachteten Einlagerungskonzepten signifikante dilatante Bereiche erst in der Nähe des Salzspiegels in einem Abstand von ca. 600 m zur Einlagerungssohle auftreten. Die maximale Temperaturerhöhung am Salzspiegel beträgt ca. 10 K. Zusammenfassend wird als Temperaturkriterium für den Carnallitit der nicht zu überschreitende Wert von 167,5 °C verwendet.

- Der Hauptanhydrit z3HA ist bis weit oberhalb der Grenztemperatur des Carnallitits stabil /THI 12/. Damit ist das Temperaturkriterium des Carnallitits abdeckend und auslegungsbestimmend.

Die thermische Auslegung erfolgt auf der Basis einer Grenztemperatur von 167 °C für Kalisalz und von 200 °C für Steinsalz. Der Wert von 200 °C für Steinsalz ist ein Auslegungswert und hat nicht den Charakter eines Bemessungswertes.

### **3.1.2 Zusätzliche Auslegungsanforderungen**

Mit der Veröffentlichung der „Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle“ /BMU 10/ traten für die VSG zusätzliche Anforderungen in Kraft. Für die Endlagerauslegung ist dort der Artikel 8 mit den Anforderungen insbesondere zur

- Zuverlässigkeit und Robustheit von Sicherheitsfunktionen (8.1)
- Minimierung der ewG-Durchörterung (8.2)
- Rückholung der Abfallbehälter in der Betriebsphase (8.6)
- Handhabbarkeit der Abfallbehälter bei einer eventuellen Bergung (8.6)

von besonderer Relevanz.

Für die Endlagerkonzepte, die als initiale Arbeitsmodelle mit Stand vom 31.12.2010 erstellt wurden /BOL 11/, konnten diese Anforderungen aus zeitlichen Gründen nicht vollumfänglich berücksichtigt werden. Insofern wurden die Varianten zu diesem Zeit-

punkt zwar einer Plausibilitäts- und generellen Machbarkeitsprüfung unterzogen, es wurden aber keine Rückholungskonzepte im Detail geplant und beschrieben. Im vorliegenden Bericht zur Endlagerauslegung wurden hingegen bestehende Einlagerungskonzepte überprüft (Streckenlagerung) und modifiziert (Bohrlochlagerung), damit sie den Anforderungen der Rückholbarkeit genügen.

Bei der Variante der Bohrlochlagerung betraf die Modifizierung sowohl den Endlagerbehälter als auch die entsprechende Auslegung des Einlagerungsbohrloches.

### **3.2 Endlagerkonzepte**

Für die Konzeption eines Endlagers für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle und ausgediente Brennelemente wurden in der VSG zwei Varianten (Streckenlagerung und Bohrlochlagerung) betrachtet. Damit sollen systematisch zwei grundsätzlich unterschiedliche Endlagerkonzepte betrachtet und deren Sicherheit (Betriebssicherheit und Langzeitsicherheit) bewertet werden. Kombinationen dieser Grundkonzepte sind prinzipiell möglich und könnten im Rahmen von Optimierungsüberlegungen im Anschluss an das Vorhaben VSG untersucht werden.

Für die hier betrachtete Variante Streckenlagerung wurde zusätzlich die direkte Einlagerung von Transport- und Lagerbehältern als eine Differenzbetrachtung untersucht. Optional wurde darüber hinaus eine abgeschätzte Menge von Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung berücksichtigt. Die im Vorhaben VSG betrachteten Varianten wurden folgendermaßen definiert:

**Streckenlagerung:** Einlagerung aller wärmeentwickelnden radioaktiven Abfälle in Endlagerbehältern mit Abschirmung in horizontalen Strecken (**Variante B1**)

Zusätzlich wurde im Sinne einer Differenzbetrachtung die Einlagerung aller wärmeentwickelnden Abfälle in den zur Zwischenlagerung genutzten Transport- und Lagerbehältern in horizontalen Bohrlöchern untersucht (**Variante B2**).

**Bohrlochlagerung:** Einlagerung aller wärmeentwickelnden radioaktiven Abfälle in tiefen, vertikalen Bohrlöchern (Brennstabkokillen, Triple-Packs) (**Variante C**)

**Kammerlagerung:** Einlagerung von Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung in horizontalen Einlagerungskammern (**Variante A**)

Die BMU-Sicherheitsanforderungen /BMU 10/, die eine Möglichkeit zur Rückholung der Endlagerbehälter in der Betriebsphase fordern, führten dazu, dass für die Bohrlochlagerung (Variante C) ein modifiziertes Einlagerungskonzept zu entwickeln war.

Im Folgenden werden die im Rahmen der Endlagerauslegung vertiefend durchgeführten Planungen und Untersuchungen dargestellt. Dabei wurden für die beiden Hauptvarianten entsprechende Auslegungen des Grubengebäudes durchgeführt. Entscheidende Auslegungsgrundlagen waren die Ergebnisse von thermischen Berechnungen, bergbauliche Erfordernisse und die Einhaltung eines Sicherheitsabstandes von 50 m zu den das Hauptsalz z2HS begrenzenden Gesteinsschichten /MÖN 12/. Damit wurden geometrische Planungsvorgaben für die Dimensionierung von Grubenräumen und von Abständen zwischen Grubenräumen erzeugt. Für beide Varianten wurden auch die Transport- und Einlagerungsprozesse und das Verfüll- und Verschlusskonzept beschrieben, sofern es von den im AP 5-Bericht /BOL 11/ dargestellten Lösungen Abweichungen gab.

Für die Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung wurde zugrunde gelegt, sie in einem räumlich getrennten Bereich des Endlagerbergwerkes einzulagern. Hierfür erfolgte die Auslegung des Grubengebäudes unter Einhaltung der vorgenannten Sicherheitsabstände ausschließlich nach bergtechnischen Erfordernissen, da von diesen Abfällen keine nennenswerte Wärmeentwicklung ausgeht.

### **3.3 Auslegung des Grubengebäudes**

Die grundlegenden Überlegungen zur Auslegung des Grubengebäudes sind im AP 5-Bericht /BOL 11/ beschrieben. Aus sicherheitstechnischen Überlegungen wurde bei der Endlagerauslegung eine räumliche Trennung der Bereiche für die Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung und für die wärmeentwickelnden Abfälle und ausgedienten Brennelemente vorgesehen. Die Felder für wärmeentwickelnde Abfälle wurden nordöstlich von den Schächten, die Felder für Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung südwestlich von den Schächten angeordnet. Insofern wurden die Varianten Streckenlagerung und Bohrlochlagerung immer in Verbindung mit der Kammerlagerung der Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung betrachtet.

Im Folgenden werden für die betrachteten Varianten die Weiterentwicklungen und Optimierungen beschrieben. Dabei orientierte sich in der vorliegenden Arbeit die Optimierung im Wesentlichen an einer Minimierung des unter Tage benötigten Flächen- und Hohlraumbedarfs. Dabei wurde auch untersucht, wie eine einsöhlige Wetterführung realisiert werden kann, damit keine zusätzlichen Hohlräume (z. B. Wetterbohrlöcher zur Erkundungssohle) erstellt werden müssen. In künftigen Optimierungsschritten können sicherheitstechnische Zielstellungen, durch die z. B. eine Minimierung der Temperaturerhöhung im Salzstock oder Salzspiegel oder eine noch schnellere Umschließung der Abfälle erreicht werden soll, von Bedeutung sein.

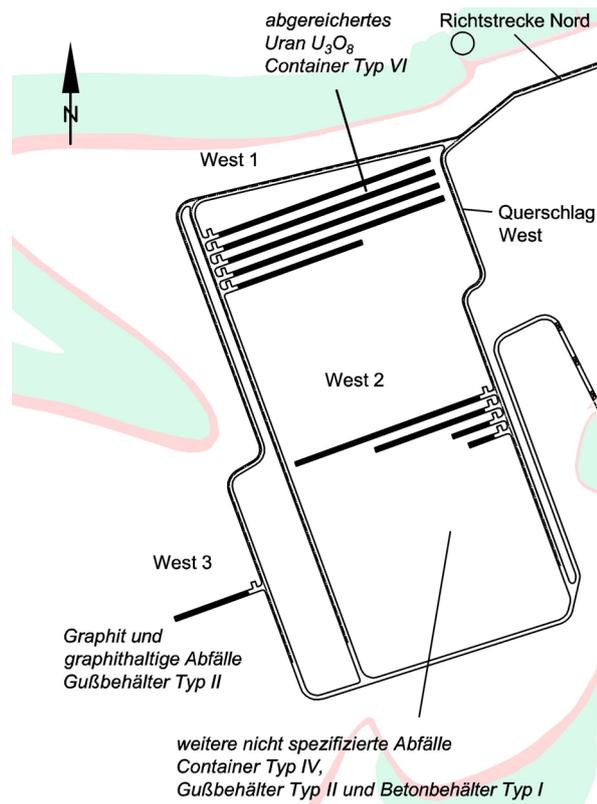
### **3.3.1 Kammerlagerung (Variante A)**

Für radioaktive Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung ist bereits im Abschlussbericht des AP 5 /BOL 11/ ein Konzept zur Einlagerung dieser Abfälle in Kammern – ähnlich wie beim Endlager Konrad – beschrieben worden. Demnach ist im Westflügel des Endlagerbergwerks Gorleben ein optionaler Einlagerungsbereich ausgewiesen worden.

Unter Zugrundelegung des im Kapitel 2.2.5 dargestellten Abfallmengengerüsts und unter Beibehaltung von drei Einlagerungsfeldern

- West 1 für Stahlblechcontainer Typ VI für Uranoxid ( $U_3O_8$ )
- West 2 für Stahlblechcontainer Typ IV, Gussbehälter Typ II ohne Blei-Abschirmung und Betonbehälter Typ I aus Normal- und aus Schwerbeton für bisher nicht spezifizierte vernachlässigbar wärmeentwickelnde Abfälle
- West 3 für Gussbehälter Typ II ohne Blei-Abschirmung für Graphit und graphithaltige Abfälle

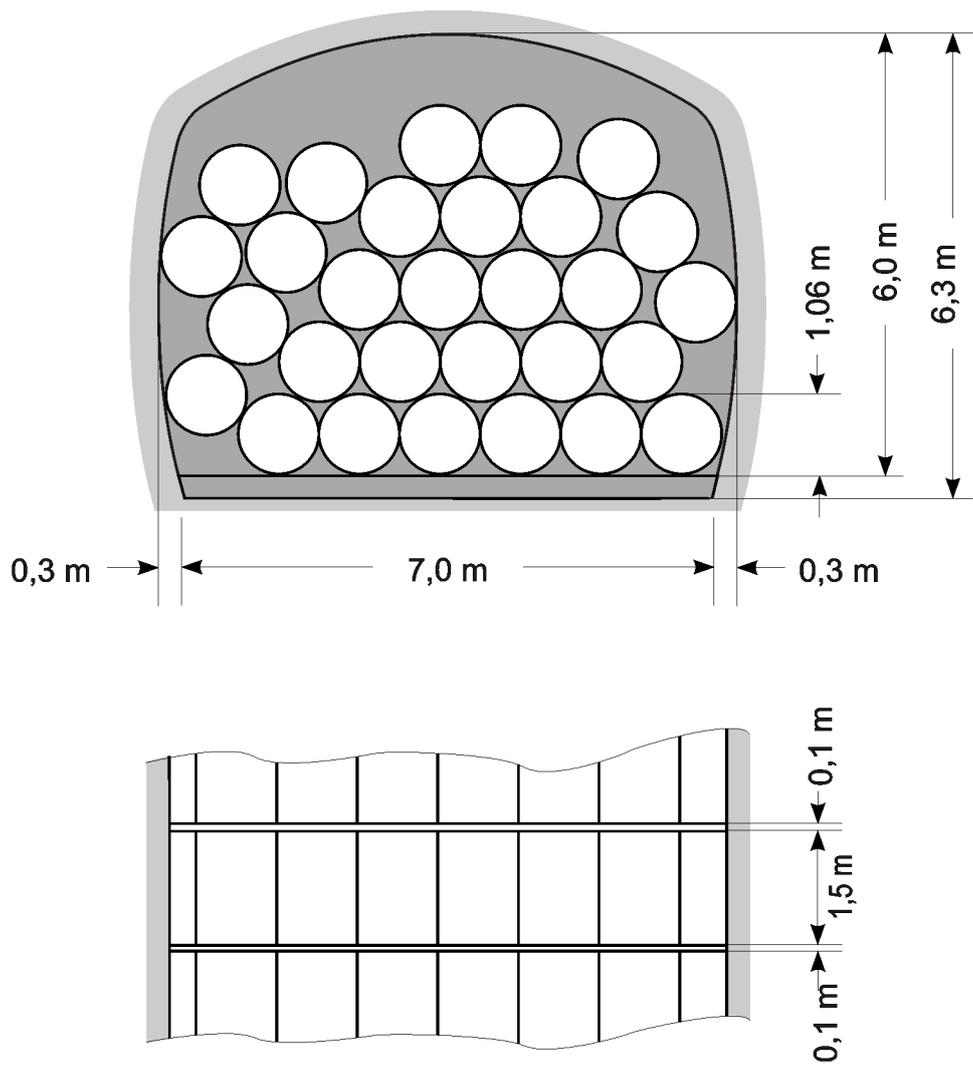
ergibt sich das in Abb. 3.1 dargestellte Grubengebäude. Dieses Grubengebäude wurde für die Modellbildungen und Berechnungen zu den Konsequenzenanalysen genutzt.



**Abb. 3.1** Einlagerungsfelder West für radioaktive Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung

Hinsichtlich der Transport- und Einlagerungstechnik wird auf die Darstellungen in /BOL 11/ verwiesen. Für das dort dargestellte Endlagerkonzept wurde von einer reinen Containerlagerung ausgegangen.

Da auch Rundgebinde (Gussbehälter Typ II, Betonbehälter Typ I) in Kammern eingelagert werden, stellt Abb. 3.2 Profil und Draufsicht der befüllten Einlagerungskammer für Gussbehälter Typ II dar. Der Unterschied zur Draufsicht einer Einlagerungskammer für Betonbehälter Typ I liegt in dem auf 0,19 m erweiterten Abstand der Gebindeabschnitte. Das Einstapeln der Gebinde erfolgt mittels Staplerfahrzeug mit angeschlagenen Gabelzinken.



**Abb. 3.2** Profil und Draufsicht der befüllten Einlagerungskammer (Gussbehälter Typ II)

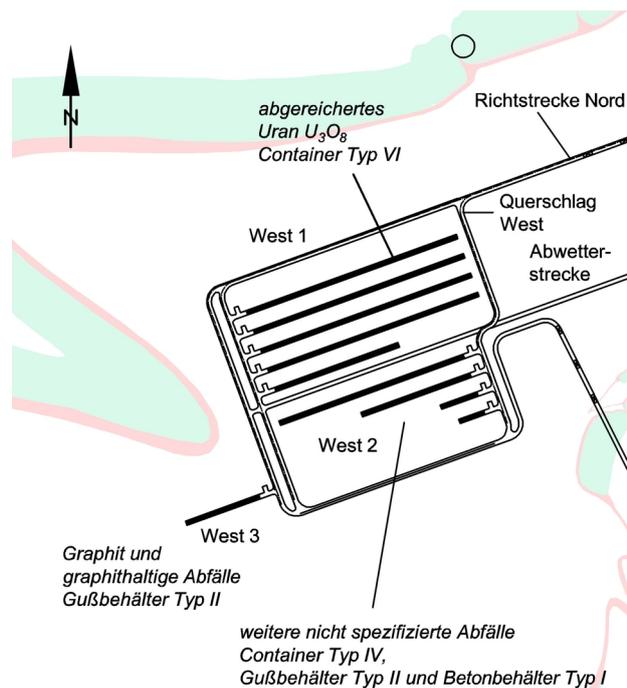
In Tab. 3.1 ist die Belegung der Felder West 1 – 3 dargestellt.

**Tab. 3.1** Belegung der Einlagerungsfelder (Kammerlagerung, Variante A)

Einlagerungsfeld-Nr.	Endlagerbehälter	Anzahl Einlagerungsstrecken	Anzahl Endlagerbehälter pro Strecke	Gesamtanzahl Endlagerbehälter	Streckenabstand [m]	Behälterabstand in Streckenachse [m]
West 1	Container Typ VI					
West 1.1 - 1.4		4	1.575	6.300	22,8	0,1
West 1.5		1	917	917		0,1
Summe West 1				7.217		
West 2						
West 2.1	Container Typ IV	1	1.068	1.068	22,8	0,1
West 2.2	Container Typ IV	1	627	627		0,1
Summe West 2.1 - 2.2				1695		
West 2.3	Gussbehälter Typ II <sup>1)</sup>	1	1.150	1.150	22,8	0,1
West 2.4	Betonbehälter Typ I <sup>1)</sup>	1	800	800		0,2
West 3	Gussbehälter Typ II <sup>1)</sup> ohne Pb	1	2.300	2.300	-	0,1

<sup>1)</sup> 29 Behälter liegend pro Abschnitt

Im Rahmen der Optimierung der Einlagerungsfelder West wurden die einzelnen Einlagerungsfelder auf die zulässige Mindestpfeilerbreite, die mindestens der doppelten lichten Weite der breitesten von zwei Strecken entsprechen muss, komprimiert /STE 96/ (Abb. 3.3). Zusätzlich wurde eine zentrale Abwetterstrecke aus betriebssicherheits-technischen Gründen berücksichtigt (siehe Kapitel 4.2.1).



**Abb. 3.3** Einlagerungsfelder West 1 – 3 für radioaktive Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung (optimiert)

### 3.3.2 Streckenlagerung (Variante B1)

Im Folgenden wird die Endlagerung ausgedienter Brennelemente und wärmeentwickelnder Abfälle in selbstabschirmenden POLLUX<sup>®</sup>-Endlagerbehältern sowie von Brennelement-Strukturteilen in Gussbehältern Typ II in Form der Streckenlagerung beschrieben. Hinsichtlich der Transport- und Einlagerungsprozesse sowie dem Verfüll- und Verschlusskonzept wird auf /BOL 11/ verwiesen. Sofern es Abweichungen von den in /BOL 11/ dargestellten Lösungen gibt, werden diese hier ergänzend dargestellt.

#### 3.3.2.1 Thermische Berechnungen

Das Ziel der Berechnungen ist die thermische Auslegung des Grubengebäudes. Eine rein thermische Berechnung lässt jedoch den Einfluss aus der Salzgruskompanktion unberücksichtigt. Um diesen Teil mitzuerfassen, sind thermomechanisch gekoppelte Berechnungen notwendig, die im Folgenden beschrieben werden.

### 3.3.2.1.1 Berechnungsprogramme

Die Berechnungen wurden mit Hilfe von zwei Programmen durchgeführt: FLAC<sup>3D</sup> in der Version 3.1 /ITA 06/ und LinSour /HAH 88/. Die Notwendigkeit für die Verwendung der beiden unterschiedlichen Programme besteht darin, dass das Modell eines weitgehend vollständigen Endlagers mit seiner großen Anzahl an Behältern eine zu große Anzahl an Freiheitsgraden und der Simulationszeitraum von ca. 10000 Jahren zu viele Zeitschritte erfordert, um so eine Berechnung mit FLAC<sup>3D</sup> auf der momentan verfügbaren Rechnerhardware im gegebenen Zeitrahmen durchführen zu können.

FLAC<sup>3D</sup> ist ein Programm zur Berechnung von dreidimensionalen Multiphysics-Modellen auf der Basis der Finite-Differenzen-Methode. Aktuell ist es in der Lage, thermisch (T), mechanisch (M) und hydraulisch (H) gekoppelte Systeme zu berechnen. Innerhalb der Elemente wird ein linearer Ansatz vergleichbar mit der Finite-Elemente-Methode verwendet. Die Lösung des Gleichungssystems erfolgt auf der Basis eines expliziten Zeitschrittverfahrens. Der Code wird weltweit von unterschiedlichsten Unternehmen für verschiedenste geomechanisch relevante Fragestellungen sowohl kommerziell als auch bei der Bearbeitung von FuE-Themen eingesetzt.

LinSour ist ein Programm zur Berechnung von thermischen Prozessen der Wärmeleitung im dreidimensionalen Raum. Die Lösung erfolgt quasi-analytisch unter Verwendung der Trapezregel. Die sich aus dem Programm heraus ergebenden Besonderheiten sind:

- Linienquellen
- ein einziger, homogener, isotroper und unendlich ausgedehnter Materialbereich
- konstante Materialparameter

LinSour ist die Umsetzung der analytischen Wärmeleitungsgleichung, deren Ansatz und Verifikation in /HAH 88/ und in /MÜL 93/ beschrieben ist.

LinSour erfordert eine Kalibrierung der Materialparameter, um das zustandsabhängige Verhalten der Materialparameter entsprechend komplexerer Modelle annähern zu können. In der Variante B1 ist z. B. das thermische Materialverhalten der Gesteine temperaturabhängig und zusätzlich beim Salzgrus durch dessen Kompaktion indirekt auch zeitabhängig. Die in der Anpassung verwendete Zielfunktion muss sich daher an den

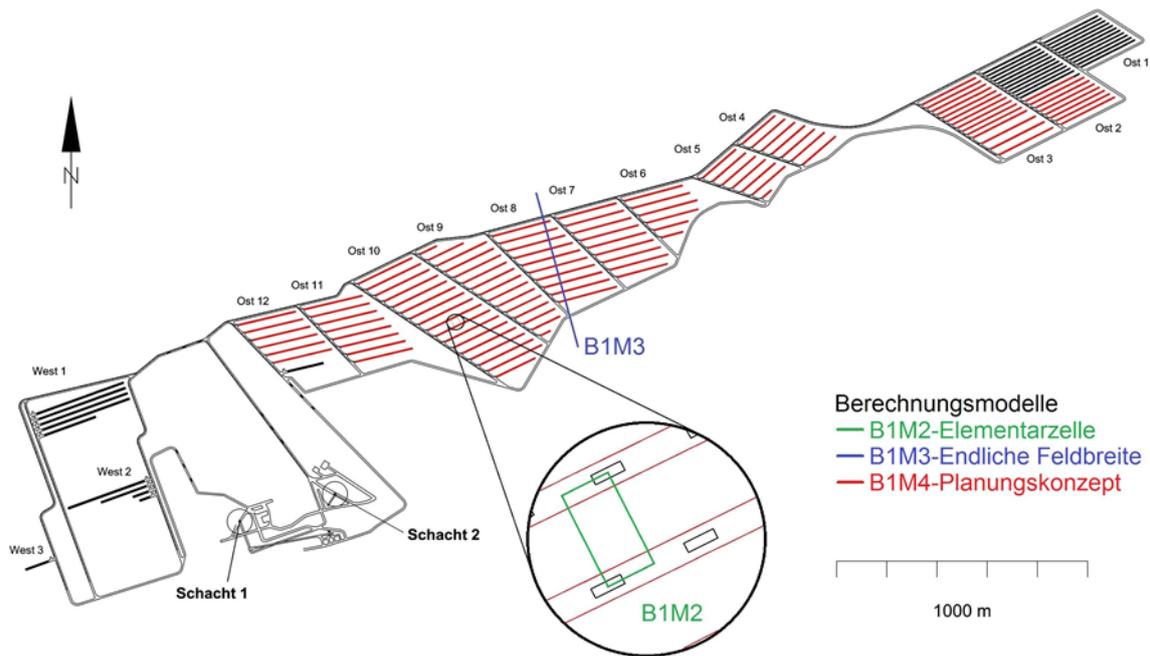
zeitlichen und räumlichen Anforderungen der LinSour-Berechnung orientieren. So führt z. B. eine optimale Anpassung für den Bereich, der räumlich nahe zu den Abfällen ist, zu einer suboptimalen Anpassung im Fernbereich. Ebenso wenig lässt sich das gesamte zeitliche Verhalten in einem Bereich durchgehend optimal anpassen.

### **3.3.2.1.2 Berechnungsmodelle**

Für die thermische Auslegung der Variante B1 werden unterschiedliche Modellkonstellationen verwendet, wobei die Berechnungen an den Modellen B1M1 bis B1M3 mit dem Programm FLAC<sup>3D</sup> durchgeführt werden, die Berechnungen am Modell B1M4 mit dem Programm LinSour. Die einzelnen Berechnungsmodelle zielen darauf, das folgende Systemverhalten zu bestimmen:

- B1M1 – Einzelbehälter: Einlagerung eines einzelnen Behälters
- B1M2 – Elementarzelle: Feld mit sehr großer Ausdehnung in der Feldbreite und Streckenlänge
- B1M3 – Endliche Feldbreite: Feld mit endlicher Streckenanzahl bei sehr großer Streckenlänge, Materialparameteranpassung für LinSour
- B1M4 – Planungskonzept: Feld entsprechend der Endlagerauslegung, Kapitel 3.3.2.2

Eine schematische Darstellung der Berechnungsmodelle B1M2 bis B1M4 ist in Abb. 3.4 dargestellt. Das Berechnungsgebiet des Modells B1M2 ist in Abb. 3.4 in der Draufsicht dargestellt; für B1M3 ist die Schnittspur durch ein Feld mit zehn Einlagerungsstrecken enthalten, vgl. auch Abb. 2.2. Im Berechnungsmodell B1M4 sind von den insgesamt eingelagerten Behältern nur diejenigen Behälter mit den Brennstäben der Leistungsreaktoren und die mit verglastem Abfall in CSD-V berücksichtigt. Die Berechnungsmodelle sind im Detail in Anhang B.4 beschrieben.



**Abb. 3.4** Schematische Darstellung der Berechnungsmodelle B1M2 bis B1M4 in der Variante B1

### 3.3.2.1.3 Berechnungsergebnisse

Nachfolgend werden die Berechnungsergebnisse für die genannten Modellkonstellationen einzeln zusammengefasst.

#### **B1M1 – Einzelbehälter: Einlagerung eines einzelnen Behälters**

In den Berechnungen mit dem Modell B1M1 wird der Einfluss von Modellierungsdetails untersucht und die für den jeweiligen Abfalltyp kürzestmögliche Zwischenlagerzeit in der Variante B1 bestimmt. Sind in den folgenden komplexeren Modellen (B1M2 – B1M4) längere Zwischenlagerzeiten erforderlich, sind sie die Folge des Einflusses einer thermischen Überlagerung benachbarter Behälter.

Der Einfluss eines unterschiedlichen Detaillierungsgrades bei der Behältermodellierung ist an drei unterschiedlichen Modellen untersucht worden:

- Volumenmodell: Der gesamte Behälter wird als homogene Volumenquelle entsprechend /DBE 98/ beschrieben.

- Modell mit Abfallkorb: Die Wärmeproduktion erfolgt ausschließlich im Volumen des Abfallkorbes. Dadurch kann der übrige Behälter als eigener Materialbereich mit vom Abfallkorb unabhängigen Parametern beschrieben werden.
- Referenzmodell: Zusätzlich zum Abfallkorb werden die Moderatorbereiche im Behältertorus und in den Kopf- und Fußbereichen als separate Materialgruppen ausgeführt.

Mit dem Referenzmodell wurde eine Maximaltemperatur von 210 °C bestimmt. Im Vergleich mit den beiden vereinfachten Modellen lässt sich feststellen, dass das Volumenmodell mit einer Maximaltemperatur von 200 °C eine um ca. 10 K geringere Temperatur ausweist, während das etwas detailliertere Modell mit geeigneten Materialparametern entsprechend Tab. B.4 das Temperaturverhalten des Referenzmodells mit guter Übereinstimmung abbildet und keine signifikante Abweichung in der Maximaltemperatur aufweist. Dieses Detailmodell stellt einen guten Kompromiss zwischen numerischem Aufwand und Genauigkeit der Berechnungsergebnisse dar und wird in den folgenden Berechnungen B1M1 bis B1M3 verwendet.

Der relevante Auswertepunkt für die thermische Bewertung der Berechnungsvarianten ist der Behälteraufpunkt. Dies ist der Punkt oben auf dem Behälter in der vertikalen Schnittebene auf Höhe der halben Behälterlänge quer zur Behälterachse. Der Behälterfußpunkt ist der tiefste Punkt dieser Schnittebene in der Behälteraufstandsfläche. Er weist durch die höhere Wärmeleitfähigkeit des unverritzten Steinsalzes eine etwas geringere Temperatur auf.

Die Behälterleistung hängt vom Abfallinventar ab und sinkt aufgrund des Zerfalls der Radionuklide. In Tab. 3.2 sind die minimale Zwischenlagerzeit  $t_{ZL,min}$  und die Behälterleistung zum Zeitpunkt der minimalen Zwischenlagerzeit für die Einlagerung eines einzelnen POLLUX<sup>®</sup>-Behälters in Abhängigkeit von seiner Beladung für die unterschiedlichen Abfalltypen angegeben.

**Tab. 3.2** Charakteristische thermische Einlagerungsgrößen eines beladenen POLLUX®-Behälters, Berechnungsergebnisse aus B1M1 – Einzelbehälter und B1M2 – Elementarzelle

Abfalltyp	DWR UO <sub>2</sub>	DWR mix 89/11	DWR mix 90/10	WWER	SWR UO <sub>2</sub>	SWR mix 90/10	CSD-V
B1M1: Minimale Zwischenlagerzeit $t_{ZLZ,min}$ [a]	24	34	33	<5	17	23	23
B1M1: Behälterleistung $P_{t,ZLZ,min}$ [kW]	7,8	7,7	8,0	>4,5	7,9	7,9	7,9
B1M2: Erforderliche Zwischenlagerzeit $t_{ZLZ,mid}$ [a]	33	49	48	<5	23	33	28
B1M2: Wärmemenge $Q_{t,ZLZ,mid}$ [GWh]	1,5	1)	2,0	1)	1,3	1,5	1,1

<sup>1)</sup> in dieser Modellvariante nicht bestimmt

Das Einlagerungskonzept (Streckenlagerung) ist in den Berechnungsvarianten von B1M1 identisch. Das unterschiedliche Niveau in der thermischen Leistung der einzelnen Abfalltypen, Abb. 2.4, führt zu den unterschiedlichen in Tab. 3.2 angegebenen minimalen Zwischenlagerzeiten. Da das Temperaturmaximum nach weniger als einem Jahr auftritt, wird nur die Behälterleistung zum Einlagerungszeitpunkt in der Tabelle angegeben und nicht die abgegebene Wärmemenge zwischen Einlagerungszeitpunkt und Zeitpunkt des ersten Temperaturmaximums. Die Behälterleistung liegt für die einzelnen Abfalltypen bei einem für alle nahezu gleichen Wert von ca. 7,9 kW, womit die Auslegungstemperatur von 200 °C eingehalten wird. Mit der Angabe der Behälterleistung kann für jeden Typ von radioaktiven Abfällen und ausgedienten Brennelementen abgeschätzt werden, welche minimale Zwischenlagerzeit erforderlich ist. So wurde z. B. auch die minimale Zwischenlagerzeit bei der Annahme einer reinen MOX-Beladung bestimmt.

Eine Verkürzung der in Tab. 3.2 angegebenen minimalen Zwischenlagerzeit ist nur durch Änderungen am Einlagerungskonzept möglich.

Die Behälterleistung ist in /PEI 11b/ ab einem Zeitpunkt von fünf Jahren nach Reaktorentnahme der Brennelemente angegeben. Entsprechend lassen sich nur minimale Zwischenlagerzeiten bestimmen, die größer als diese fünf Jahre sind. Die minimale Zwischenlagerzeit für Behälter mit WWER-Abfall liegt aufgrund der geringen Wärmeleistung unterhalb dieser fünf Jahre.

Würde ein POLLUX-Behälter vollständig mit den Brennstäben von MOX-BE beladen werden, würde sich eine minimale Zwischenlagerzeit von ca. 150 Jahren ergeben. Das Einlagerungskonzept ist daher dahin weiter entwickelt worden, dass die Behälter zwar vollständig, aber gemischt mit Brennstäben der MOX- und UO<sub>2</sub>-BE beladen werden. Die Beladung besteht zum überwiegenden Anteil aus den Brennstäben der UO<sub>2</sub>-BE und zu einem geringen Anteil aus Brennstäben der MOX-BE. Mit DWR mix 90/10 wird ein Mischungsverhältnis in der Behälterbeladung bezeichnet, welches zu 90 % aus den Brennstäben von DWR-UO<sub>2</sub>-BE und zu 10 % aus denen von DWR-MOX-BE besteht. Dieses Mischungsverhältnis resultiert noch aus dem Planungsstadium mit den Abfallcharakteristika, die sich aus dem Beschluss zur Laufzeitverlängerung ergeben hatte. Gegenüber diesem Mischungsverhältnis ist der MOX-Anteil im Mischungsverhältnis DWR mix 89/11 um 1 % auf nun 11 % erhöht worden. Hintergrund ist, dass durch die verkürzte Laufzeit der MOX-Anteil in der Gesamtmenge höher ausfällt, vgl. /PEI 11a/ und /PEI 11b/. Im Vergleich der beiden unterschiedlichen Mischungsverhältnisse des DWR mix zeigt sich der starke Einfluss des MOX-Brennstoffs, indem sich bereits durch den Tausch von einem Prozent des Inhalts von UO<sub>2</sub> in MOX eine um ca. ein Jahr verlängerte minimale Zwischenlagerzeit ergibt. Die Beladung DWR mix 90/10 dient hier lediglich zu Vergleichszwecken und wird im Folgenden nicht weiter verfolgt. Die ebenfalls in der Tabelle enthaltene erforderliche Zwischenlagerzeit ist das Ergebnis einer räumlichen Platzierung der Abfallbehälter und wird im Zusammenhang mit den Ergebnissen des Modells B1M2 erläutert.

### **B1M2 – Elementarzelle: Feld mit sehr großer Ausdehnung in der Feldbreite und Streckenlänge**

Das Modell B1M2 repräsentiert ein in seiner horizontalen Ausdehnung sehr großes Einlagerungsfeld und zwar sowohl in Richtung der Feldbreite als auch in Richtung der Streckenlänge. Daher wird dieses Modell als Elementarzelle bezeichnet. Auf Grund der angesetzten Randbedingungen findet kein Wärmeabfluss in horizontaler Richtung statt. Dieses Modell stellt daher eine konservative Abschätzung dar, wobei hier berücksichtigt werden muss, dass die räumliche Ausprägung des Modells, das sind der Behälter- und der Streckenabstand, das zeitliche Verhalten, das ist die erforderliche Zwischenlagerzeit, beeinflusst. Grundsätzlich wäre auch die Umkehrung möglich, sie ist jedoch im Rahmen dieser Arbeit nicht behandelt worden, indem vor dem Hintergrund der Ergebnisse aus B1M1 für eine vorgegebene Zwischenlagerzeit die Abhängigkeit zwischen Behälter- und Streckenabstand bestimmt wird.

Eine Einlagerung mit der unter B1M1 bestimmten minimalen Zwischenlagerzeit und den in /BOL 11/ angegebenen Abständen zwischen den Behältern und den Strecken führt zu einer signifikanten Überschreitung der Auslegungstemperatur des Steinsalzes. Um diese Auslegungstemperatur bei der Einlagerung mehrerer Behälter einhalten zu können, sind Änderungen am Einlagerungskonzept, den Behälter- und Streckenabständen oder der Zwischenlagerzeit erforderlich. Die Zielstellung der Berechnungen war es, das Konzept und die Abstände beizubehalten, so dass eine verlängerte Zwischenlagerzeit die einzige veränderbare Größe ist. Die in Tab. 3.2 aufgeführte erforderliche Zwischenlagerzeit gibt die Zwischenlagerzeit an, die bei Beibehaltung der Endlagerkonzepte und der Abstände erforderlich würde. Soll diese geringer sein, ist das nur mit einer Abstandsänderung möglich. Auf die darüber hinaus in Tab. 3.2 mitenthaltene Wärmemenge wird im Folgenden noch näher eingegangen.

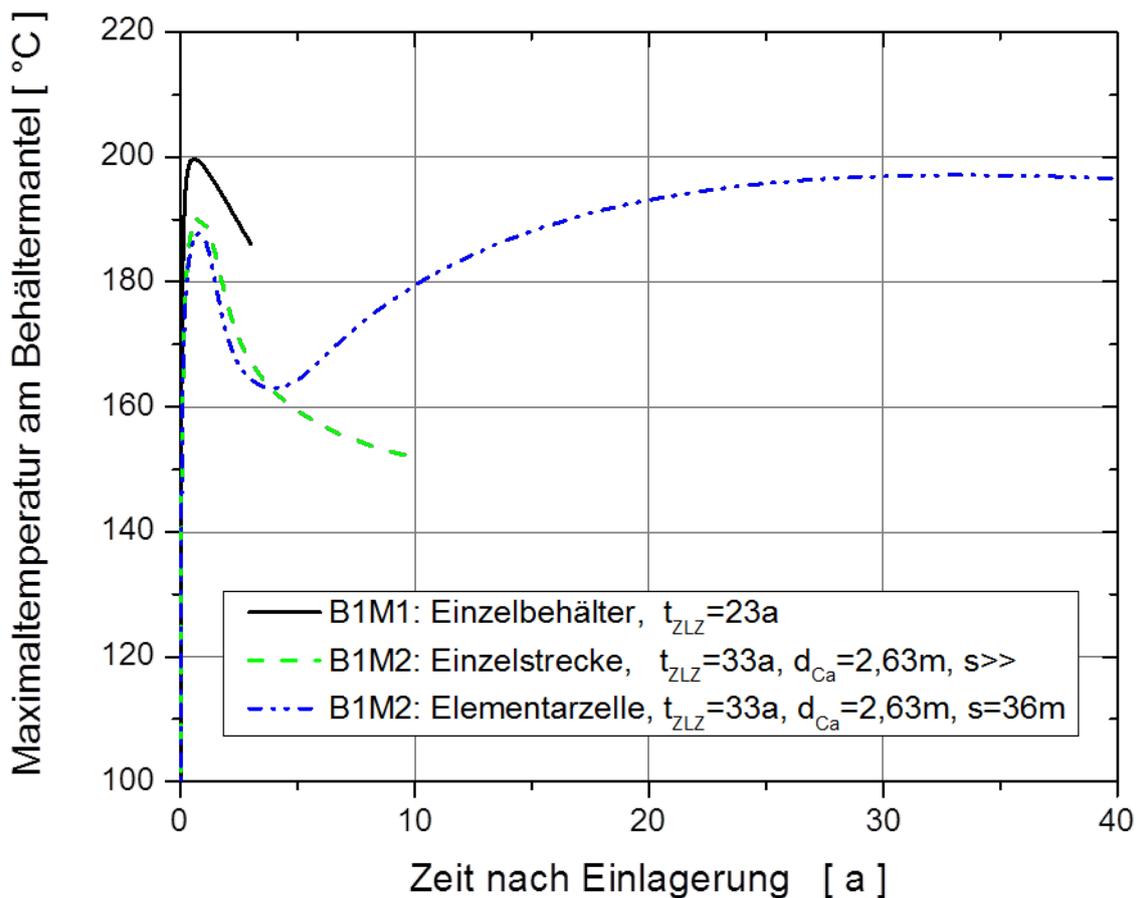
Der Energieeintrag aus den mit WWER-Abfällen beladenen Behältern ist auch unter den Bedingungen einer Elementarzelle zu gering, um die Auslegungstemperatur zu erreichen.

In Abb. 3.5 ist der Einfluss räumlich geringer Abstände und die damit notwendigerweise verlängerte Zwischenlagerzeit auf die zeitliche Entwicklung der Temperatur am Auslegungspunkt dargestellt. Der Temperaturverlauf des Einzelbehälters B1M1 basiert auf der minimalen Zwischenlagerzeit von 23 Jahren. Die beiden Varianten des Modells B1M2 berücksichtigen die erforderliche Zwischenlagerzeit von 33 Jahren. Die Einlagerung von Behältern innerhalb einer Strecke erfolgt mit einem Behälterzwischenraum von 2,63 m. In der Berechnungsvariante B1M2-Einzelstrecke ist der Streckenabstand so groß, dass keine Rückwirkung von diesem entfernten Rand auf das System erfolgt. Daher erreicht die Temperatur innerhalb des ersten Jahres ihr Maximum und fällt in der Folgezeit wieder. Das mit ca. 190 °C niedrigere maximale Temperaturniveau im Zeitraum des ersten Jahres in der Berechnungsvariante B1M2-Einzelstrecke gegenüber B1M1-Einzelbehälter resultiert aus der zehn Jahre längeren Zwischenlagerzeit. Die Berechnungsvariante B1M2-Elementarzelle weist einen Streckenabstand von 36 m auf und ist aufgrund der Symmetrieränder die Elementarzelle eines sehr großen Feldes mit einer sehr großen Anzahl an Behältern. Es gibt nur einen geringen Unterschied im Temperaturmaximum des ersten Jahres zwischen den beiden Modellen B1M2.

Durch die etwas schnellere Salzgruskompaktion im Modell B1M2-Elementarzelle fällt das Temperaturmaximum bei ca. einem Jahr um ca. 3 K auf ca. 187 °C ab. Aufgrund des in horizontaler Richtung behinderten Wärmeabflusses im Modell B1M2-

Elementarzelle fällt die Temperatur jedoch nicht wie in den beiden vorangehenden Modellen B1M1-Einzelbehälter und B1M2-Einzelstrecke in der gesamten Folgezeit kontinuierlich ab, sondern es kann ein weiteres Tempermaximum auftreten. Dieses zeitlich spätere Temperaturmaximum wird daher im Folgenden als zweites Temperaturmaximum bezeichnet, während das bislang behandelte Temperaturmaximum, welches zeitlich etwa im ersten Jahr auftritt, als erstes Temperaturmaximum bezeichnet wird. Es hängt vom Streckenabstand ab, in welchem Umfang das zweite Temperaturmaximum auftritt. Bei der Einlagerung des DWR-Abfalls und den in Abb. 3.5 gegebenen Abständen des Modells B1M2-Elementarzelle tritt es nach ca. 30 Jahren auf. Für diese Auslegung mit einem Streckenabstand von 36 m ist nicht mehr das erste Temperaturmaximum sondern mit einer Temperatur von ca. 197 °C das zweite Temperaturmaximum auslegungsbestimmend.

Im Vergleich der Ergebnisse der beiden Berechnungsvarianten B1M2 zeigt sich, wie durch die Nähe weiterer Strecken das Kompaktionsverhalten des Salzgrus beschleunigt wird. In der Variante B1M2-Einzelstrecke wird keine weitere Strecke berücksichtigt, bei B1M2-Einzelstrecke befindet sie sich in einer Entfernung von 36 m. Mit der beschleunigten Kompaktion steigt die Wärmeleitfähigkeit früher an, so dass die Wärme besser abgeführt wird. Als Folge stellt sich in der Berechnungsvariante B1M2-Elementarzelle ein etwas niedrigeres erstes Temperaturmaximum ein. Dieses Verhalten würde sich bei einem weiter verkürzten Streckenabstand fortsetzen. Allerdings würde dann die Auslegungstemperatur im zweiten Temperaturmaximum überschritten werden.



**Abb. 3.5** Zeitlicher Verlauf der Temperatur am thermischen Auslegungspunkt des Behälters für unterschiedliche Modellvarianten (POLLUX<sup>®</sup>-10, DWR- UO<sub>2</sub>)

In Tab. 3.2 ist die Wärmemenge angegeben, die von einem einzigen Behälter im Zeitraum zwischen seiner Einlagerung und dem Erreichen des zweiten Temperaturmaximums abgegeben wird. Während bei Modell B1M1 eine geringe Streubreite der Behälterleistung festgestellt wurde, ergibt sich eine wesentlich größere Bandbreite in der Wärmemenge, die in den Berechnungsvarianten des Modells B1M2 bis zum Zeitpunkt des zweiten Temperaturmaximums abgegeben wird. Im Fall des mit CSD-V beladenen Endlagerbehälters kann die Ursache gegenüber den mit Brennelementen beladenen Endlagerbehältern in dem abweichenden Behälter- und Streckenabstand und dem unterschiedlichen zeitlichen Verhalten in der Wärmeproduktion des Abfalls gesehen werden, Abb. 2.4. In der Folge tritt das zweite Temperaturmaximum bei mit CSD-V beladenen Behältern bereits nach ca. 23 Jahren auf. Bei den weiteren Varianten kann die Bestimmung des Zeitpunktes des zweiten Temperaturmaximums mit Unsicherheiten behaftet sein.

Wird die erforderliche Zwischenlagerzeit mit dem Alter der Abfälle entsprechend der zugrunde gelegten Einlagerungsabfolge, Tab. B.7, verglichen, zeigt sich, dass bei einigen Abfalltypen Reserven bei der Auslegung bestehen. Die hierin enthaltenen Möglichkeiten sind Optimierungsaufgaben und können in einer späteren Planungsphase berücksichtigt werden. Andererseits zeigen die Ergebnisse aber auch, dass das thermische Potenzial einer Einlagerung von DWR mix im Steinsalz unter den hier angenommenen geometrischen Bedingungen ausgeschöpft ist. Soll eine frühere Einlagerung realisiert werden, sind Änderungen am Einlagerungskonzept oder den Abständen erforderlich. Eine Maßnahme dabei kann die Ausnutzung der Feldrandlagen für die Einlagerung von Behältern mit einem höheren Wärmestrom sein, während im zentralen Teil Behälter mit geringerem Wärmestrom angeordnet würden.

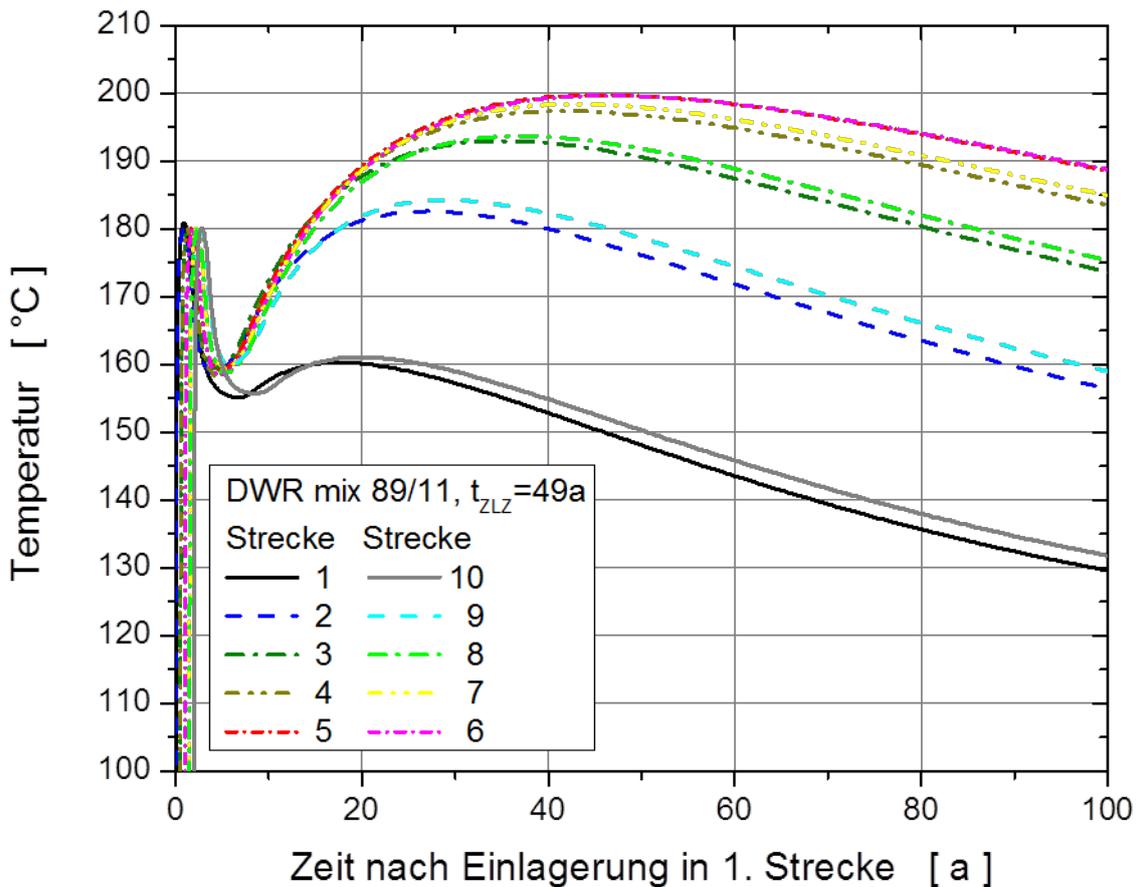
### **B1M3 – Endliche Feldbreite: Feld mit endlicher Streckenanzahl bei sehr großer Streckenlänge**

Mit dem Modell B1M3 wird die im Modell B1M2 enthaltene Konservativität auf ein realistischeres Maß abgebaut. Das Modell B1M3 repräsentiert ein Modell mit sehr langen Einlagerungsstrecken bei gegebener Streckenanzahl.

Der Einfluss der endlichen Streckenanzahl ist in Abb. 3.6 dargestellt. In der Abbildung ist der Temperaturverlauf an den Behälteraufpunkten des Modells aus Abb. B.6, einer Berechnungsvariante mit insgesamt zehn Einlagerungsstrecken, dargestellt. Die Einlagerung erfolgt zeitgleich in jeweils zwei benachbarten Strecken. Wie in Abb. 3.6 zu erkennen ist, hat die gestaffelte Einlagerung zwei Effekte auf den Temperaturverlauf der Strecken in der zweiten Feldhälfte (Strecken 6 bis 10). Durch die frühere Einlagerung in der ersten Hälfte (Strecken 1 bis 5) und der daraus resultierenden thermischen Expansion des Gesteinskörpers bauen sich Zwangsspannungen auf, die bei den später aufgefahrenen Strecken der zweiten Hälfte zu einer geringfügig erhöhten Streckenkongruenz und damit schnelleren Kompaktion des Salzgrus führt. Dadurch fällt das erste Temperaturmaximum in den später aufgefahrenen Strecken etwas geringer aus. Der zweite Effekt ist die Auswirkung auf das zweite Temperaturmaximum. Die bereits erfolgte Erwärmung des Gebirgsbereichs führt bei den später befüllten Strecken der zweiten Hälfte zu einem etwas höheren zweiten Temperaturmaximum.

Das wesentliche Element in der Temperaturentwicklung bei gegebener Streckenanzahl ist der Einfluss der Randlage der Strecken. Der Unterschied im zweiten Temperaturmaximum beträgt zwischen den vier zentralen Strecken (Strecken 4 bis 7) 2 K, da-

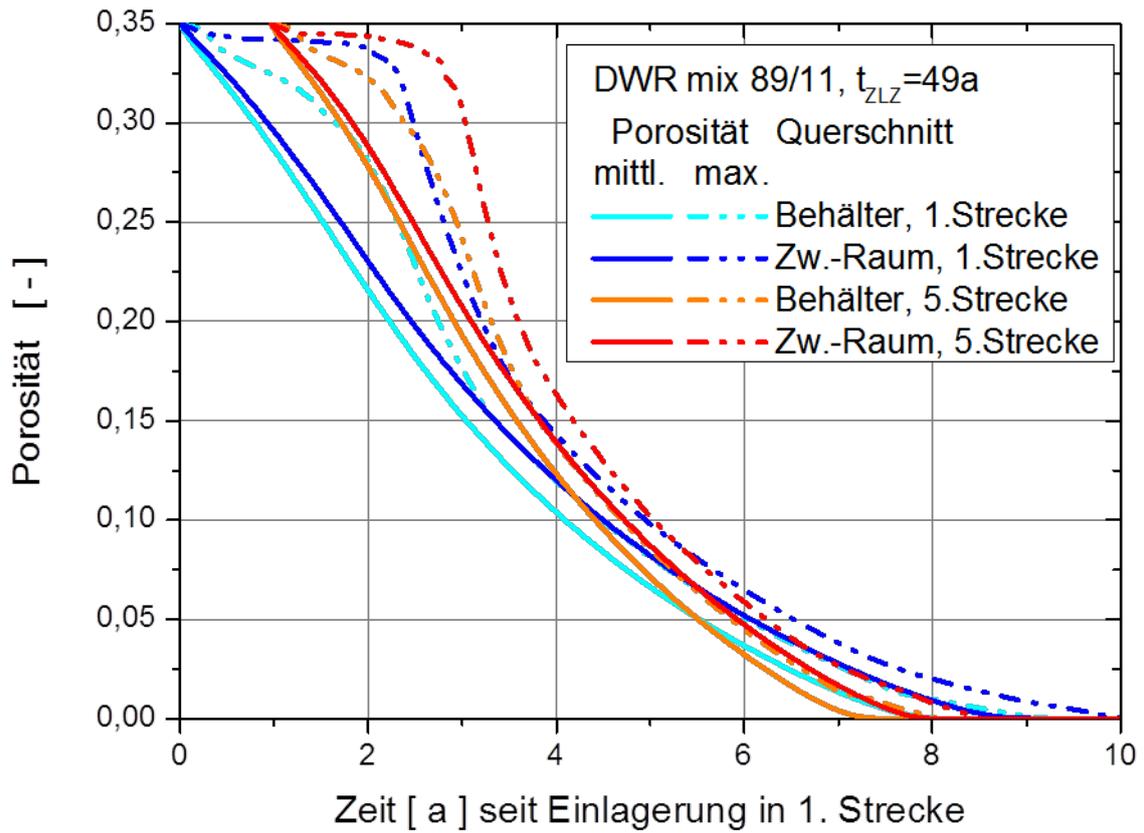
gegen beträgt der Temperaturunterschied zwischen dem zentralen Bereich und den äußeren Randstrecken 40 K. Bei einer Berechnungsvariante mit 16 Einlagerungsstrecken und einer Behälterbeladung mit DWR-UO<sub>2</sub>-BE ergibt sich eine Bandbreite in der Maximaltemperatur der zentralen Strecken 4 bis 13 von ca. 2,5 K. In Feldern mit mehr als zehn Strecken kommt es daher zu keinem weiteren signifikanten Anstieg in der Maximaltemperatur, dagegen macht sich der Wärmeabfluss über die seitlichen Feldgrenzen in Feldern mit weniger als zehn Strecken in einem niedrigeren Wert des zweiten Temperaturmaximums bemerkbar.



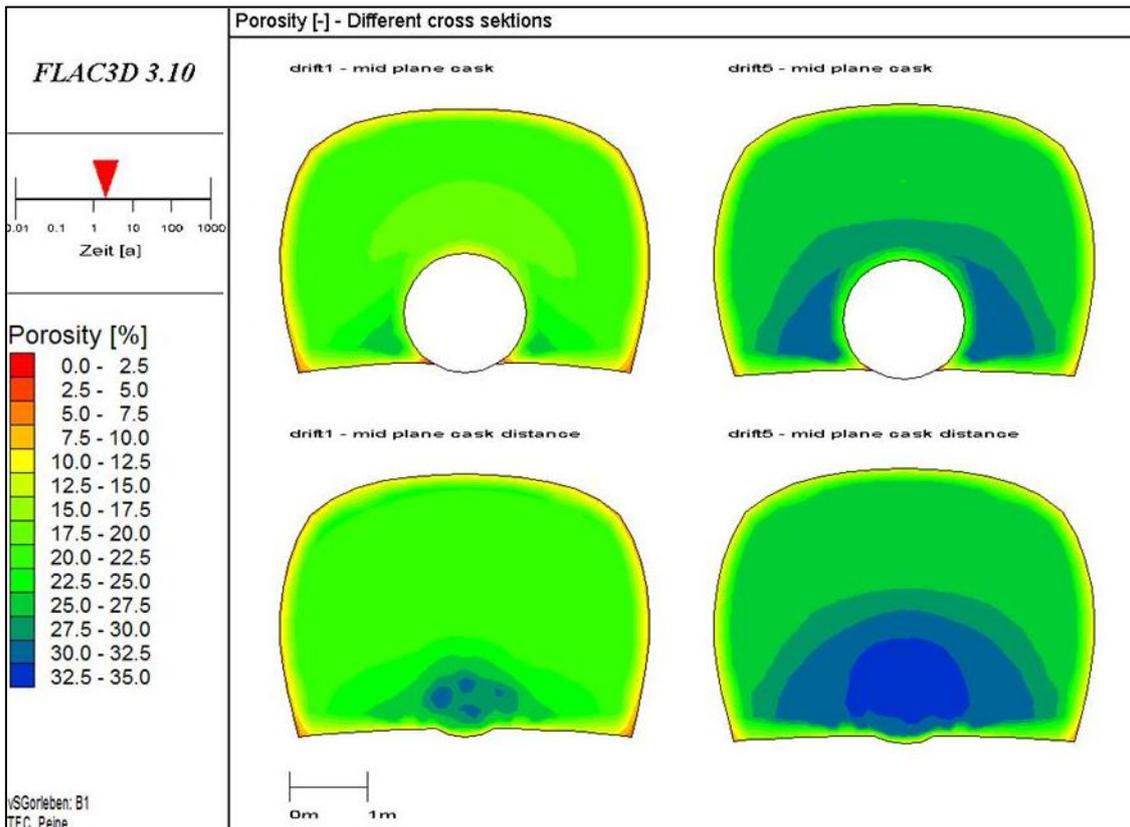
**Abb. 3.6** Zeitlicher Verlauf der Temperatur am thermischen Auslegungspunkt der Behälter in den einzelnen Strecken, B1M3: POLLUX<sup>®</sup>-10, DWR mix 89/11, 49a ZLZ, zehn Strecken, zeitgleiche Einlagerung in jeweils zwei Strecken

In Abb. 3.7 ist der Porositätsverlauf von Salzgrus für je zwei ausgewählte Querschnitte der ersten und fünften Einlagerungsstrecke in Abhängigkeit von der Zeit dargestellt. In Abb. 3.8 ist die Porositätsverteilung zum Zeitpunkt von ca. zwei Jahren nach Einlagerungsbeginn für diese Querschnitte dargestellt. Ausgewählt sind die Querschnitte entlang der Behältermitte und der Versatzmitte zwischen den Behältern sowohl für eine

Randstrecke (Strecke 1) als auch für eine Strecke aus dem zentralen Bereich (Strecke 5). Innerhalb von zehn Jahren sind die hier ausgewählten Querschnitte vollständig kompaktiert. Angemerkt sei, dass ein Querschnitt in Feldecklage durch die geringere Gebirgserwärmung gegenüber der Randlage etwas langsamer konvergieren wird. Die Kompaktion erfolgt nicht gleichmäßig über den gesamten Querschnitt (Abb. 3.8). Durch die Formgebung der Einlagerungsstrecke erfolgt die Salzgruskompaktion in stärkerem Maß in vertikaler Richtung durch die Sohlhebung und Firstsenkung als in horizontaler Richtung durch die Stoßwanderung. Entsprechend zeigt sich oberhalb des Behälters ein zonaler Bereich mit etwas geringerer Porosität, seitlich des Behälters mit höherer Porosität. Die hohe Kompaktion unmittelbar oberhalb des Behälters ist das Ergebnis des Wärmeeintrags durch den Behälter. Im Streckenquerschnitt „Mitte Behälterabstand“ macht sich bei dem hier vorliegenden geringen Behälterabstand die abschirmende Wirkung des Behälters bemerkbar. Obwohl Strecke 5 im Zentralteil des Einlagerungsfeldes liegt und Strecke 1 eine Randstrecke ist, weist Strecke 1 eine höhere Kompaktion aus. Hier macht sich der zeitliche Vorsprung in der Einlagerung von ca. einem Jahr in Strecke 1 gegenüber der in Strecke 5 bemerkbar (vgl. Abb. 3.7). Wegen der lokalen Verteilung der Kompaktion ist zusätzlich zum Mittelwert der Porosität im jeweiligen Querschnitt auch der Wert der maximalen Porosität in einem Element des jeweiligen Querschnitts in Abb. 3.7 angegeben. Gegenüber dem Mittelwert der Porosität im Querschnitt ergibt sich eine zeitliche Verzögerung von ca. einem Jahr bis zum Erreichen der weitgehend vollständigen Kompaktion in dem am langsamsten kompaktierenden Element.



**Abb. 3.7** Zeitlicher Verlauf der Porosität von Salzgrus in den Querschnitten „Behältermitte“ und „Mitte Behälterabstand“ in den Strecken 1 und 5, B1M3: POLLUX<sup>®</sup>-10, DWR mix 89/11, 49a ZLZ, zehn Strecken, zeitgleiche Einlagerung in jeweils zwei Strecken



**Abb. 3.8** Porositätsverlauf von Salzgrus in den Querschnitten „Behältermitte“ (oben) und „Mitte Behälterabstand“ (unten) in der Einlagerungsstrecke 1 (links) und der Einlagerungsstrecke 5 (rechts) zum Zeitpunkt von ca. zwei Jahren nach Einlagerung, B1M3: POLLUX®-10, DWR mix 89/11, 49a ZLZ, zehn Strecken, zeitgleiche Einlagerung in jeweils zwei Strecken

Vergleicht man die experimentellen und numerischen Untersuchungen aus dem in-situ Versuch „Thermische Simulation der Streckenlagerung (TSS)“ in der Asse zur Porositätsentwicklung (BAMBUS-Projekt) /DRO 01/, /BEC 04/ mit der Prognose für den Standort Gorleben, so zeigt sich bei Letzterer eine sehr viel schnellere Kompaktion des Salzgrus. Während der ca. 8,5-jährigen Versuchsdauer (BAMBUS) in der Asse wurde ein Porositätsrückgang von anfangs ca. 36 % auf ca. 25 % im heißen Bereich der unmittelbaren Behälterumgebung festgestellt. Die Berechnungen für den Standort Gorleben weisen in diesem Zeitraum dagegen die nahezu vollständige Kompaktion des Salzgrus aus. Die wesentlichen Ursachen für dieses für den Standort Gorleben berechnete stark beschleunigte Verhalten sind in Tab. 3.3 zusammengestellt.

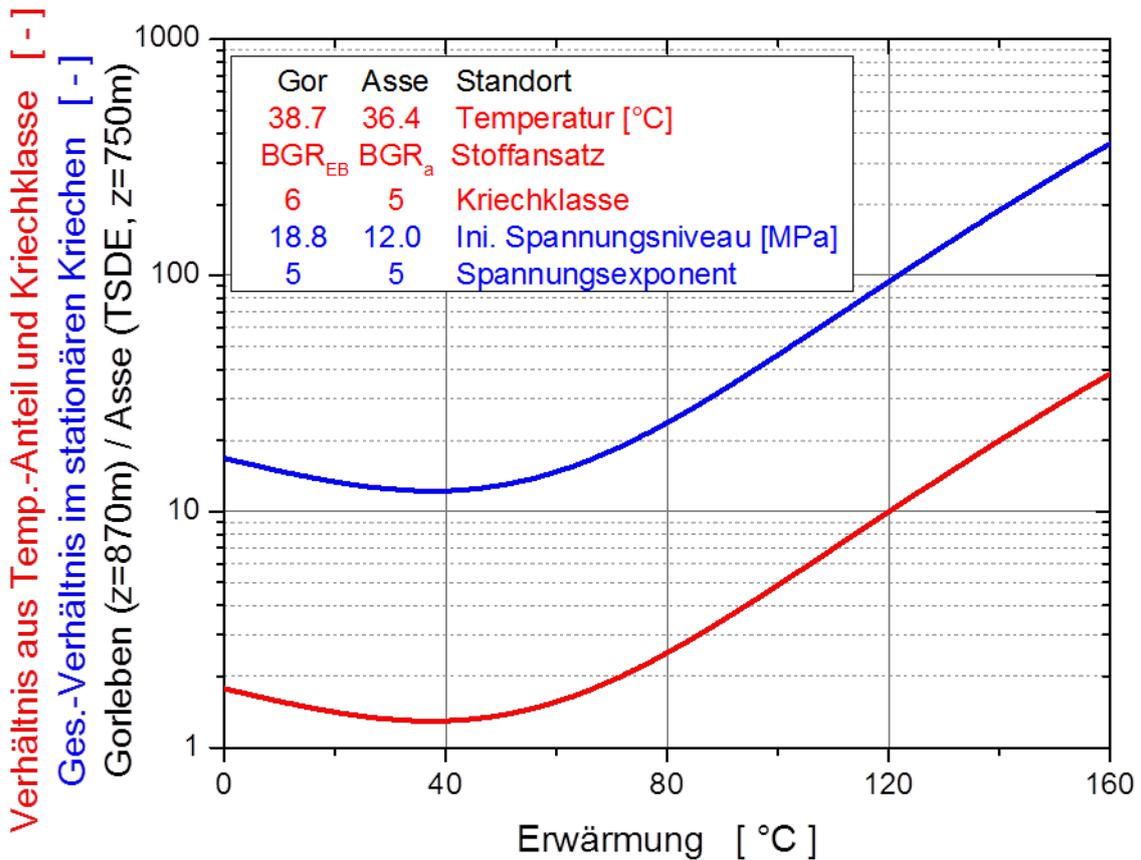
**Tab. 3.3** Vergleich der Bedingungen im TSS-Versuch und den VSG-Prognose-rechnungen

	<b>TSS-Versuch</b>	<b>Prognose Gorleben</b>
Behälteranordnung	2 Strecken; 3 Behälter je Strecke	Einlagerungsfelder
Grundspannungszustand	12 MPa	18,8 MPa
Ausgangstemperatur	36,4 °C	38,7 °C
Kriechklasse	5	6
Stoffansatz	BGR <sub>a</sub>	BGR <sub>EB</sub>

Der Einfluss der vier Aspekte (Grundspannungszustand, Ausgangstemperatur, Kriechklasse, Stoffansatz) lässt sich analytisch abschätzen. Wird allein der Einfluss dieser Aspekte betrachtet, ergibt sich das in Abb. 3.9 dargestellte Verhältnis der stationären Konvergenzrate am Standort Gorleben zu der am Standort des TSS-Versuchs in der Asse in Abhängigkeit von der Erwärmung. Die beiden verwendeten Stoffansätze BGR<sub>a</sub> und BGR<sub>EB</sub> sind zusammen mit ihren Parametern in Tab. B.5 in Anhang B aufgeführt.

Beide Stoffansätze setzen sich multiplikativ aus einem Vorfaktor zur Anpassung an die Kriechklasse, einem Temperaturanteil inkl. Strukturanteil und einem Spannungsanteil zusammen. Die um eine Stufe höhere Kriechklasse am Standort Gorleben ergibt eine Verdoppelung der Kriechgeschwindigkeit. In den beiden vorgenannten Stoffansätzen wird der Temperaturanteil unterschiedlich berücksichtigt. In Abb. 3.9 ist für die Anteile der Kriechklasse und der Temperatur das Verhältnis zwischen dem Standort Gorleben und dem TSS-Versuchsfeld der Asse in Abb. 3.9 rot dargestellt. Die blaue Kurve berücksichtigt zusätzlich noch den Einfluss der Spannungen. Während in der rot dargestellten Kurve eine Verdoppelung in der Kriechgeschwindigkeit festzustellen ist, macht sich der Unterschied im thermischen Teil der beiden Stoffansätze ab einer Erwärmung um ca. 70 K bemerkbar, d. h. ab einer Temperatur von ca. 105 °C. Dann aber steigt der Unterschied exponentiell auf bis zum Faktor 30 bei einer Erwärmung um 160 K an.

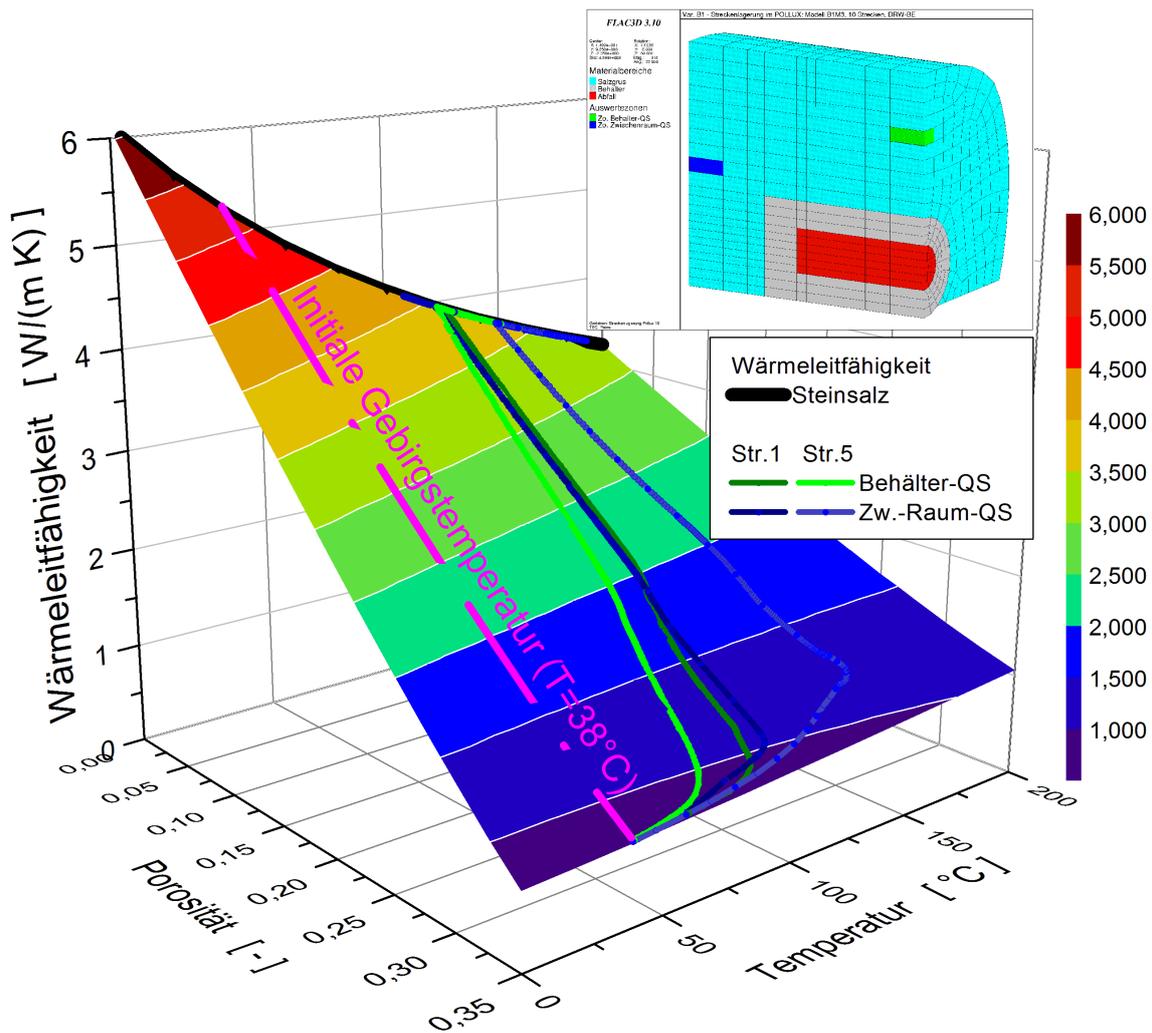
Ein Unterschied in den Spannungsexponenten zwischen den beiden Stoffansätzen besteht nicht. Wie in Abb. 3.9 dargestellt, resultiert alleine aus dem unterschiedlichen Grundspannungsniveau zwischen den beiden Standorten eine Erhöhung der Kriechrate um etwa eine Größenordnung.



**Abb. 3.9** Vergleich des Anteils aus Kriechklasse und Temperatur an der stationären Kriechrate (rot – Standort Gorleben, VSG) und der stationären Kriechrate (blau – Standort Asse, TSS-Versuchsfeld) in Abhängigkeit von der Erwärmung

Wie sich die Porosität in einem einzelnen Querschnitt (Abb. 3.7) entwickelt, ist in Abb. 3.10 als Funktion von der Wärmeleitfähigkeit und Temperatur für ausgewählte Zonen dargestellt. Die Zeit ist in der hier gewählten Darstellung implizit enthalten, indem mit Fortschreiten der Zeit auch der Kompaktionsprozess des Salzgrus voranschreitet. Bei Einlagerungsbeginn beträgt die Anfangstemperatur ca. 40 °C und die Anfangsporosität 35 %. Das erste Temperaturmaximum tritt nach knapp einem Jahr auf. In der Kurve für die Zone im Behälterzwischenraumquerschnitt der fünften Strecke ist dieses Maximum mit einer Temperatur von ca. 150 °C und einer Porosität von 30 % erkennbar. Durch den Abstand zum Behälter fällt das Temperaturmaximum zu diesem Zeitpunkt und an dieser Stelle bereits wesentlich geringer aus als im Behälteraufpunkt. In den weiteren hier betrachteten Punkten ist das erste Temperaturmaximum nicht mehr erkennbar. Die Darstellung in Abb. 3.10 verdeutlicht die Notwendigkeit der thermomechanisch gekoppelten Berechnung. Die Kompaktion ist ein dynamischer Prozess, in dessen Verlauf sich kontinuierlich die für die thermische Auslegung relevanten

Materialparameter ändern. Für die beiden hier ausgewählten Zonen der Strecke 1 erfolgt die Kompaktion in einem Zeitraum von ca. acht Jahren, im Anschluss daran liegt aus thermischer Sicht der Zustand des festen Steinsalzes vor, und der Zustand in den einzelnen Zonen bewegt sich nur noch entlang der Kennlinie des Steinsalzes. Die Einlagerung in Strecke 5 erfolgt ca. ein Jahr später. Wie in Abb. 3.7 bereits dargestellt, verläuft der Prozess jedoch schneller, so dass es ca. fünf Jahre bzw. sieben Jahre dauert, bis der Zustand des festen Steinsalzes erreicht ist.



**Abb. 3.10** Verlauf der Wärmeleitfähigkeit in ausgewählten Querschnitten der Strecken 1 und 5 in Abhängigkeit von der Porosität und der Temperatur

### B1M3 – Materialparameteranpassung für LinSour

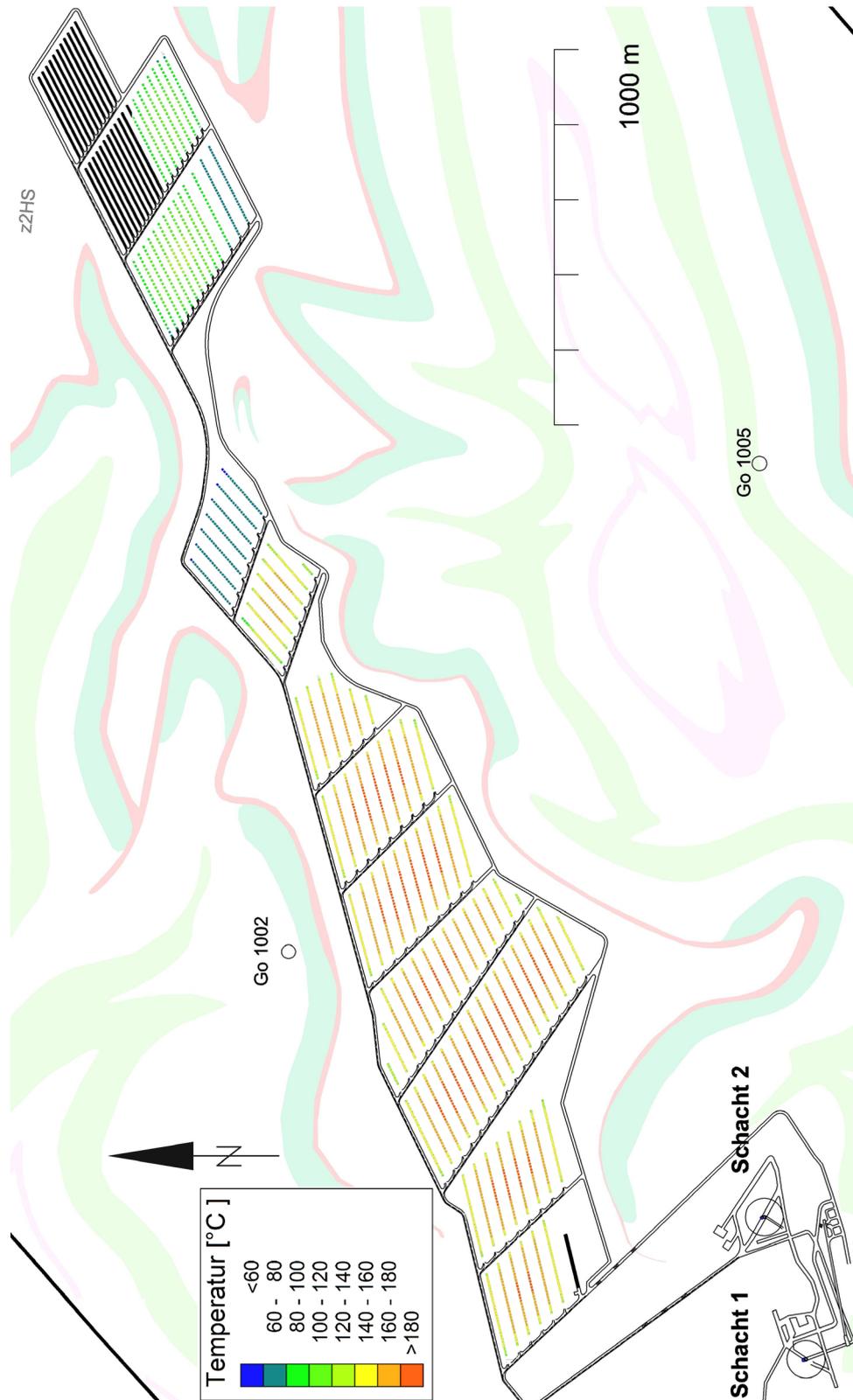
Das Berechnungsmodell B1M3 wurde auch für Vergleichsrechnungen zwischen dem Programm FLAC<sup>3D</sup> und LinSour verwendet. Im Ergebnis folgt aus der Anpassung für LinSour eine Wärmeleitfähigkeit von 3,8 W/(m·K) und eine Wärmekapazität von

836 J/(kg·K). Im Vergleich zu der in /DBE 92/ getroffenen Parameterwahl mit einer Wärmeleitfähigkeit von 3,6 W/(m·K) und einer Wärmekapazität von 864 J/(kg·K) besteht nur ein geringer Unterschied. Die Ergebnisse der Vergleichsrechnung und Anmerkungen zur Bewertung sind in Anhang B.5 zusammengestellt.

#### **B1M4 – Planungskonzept: Behälter mit Brennstäben aus Leistungsreaktoren und CSD-V**

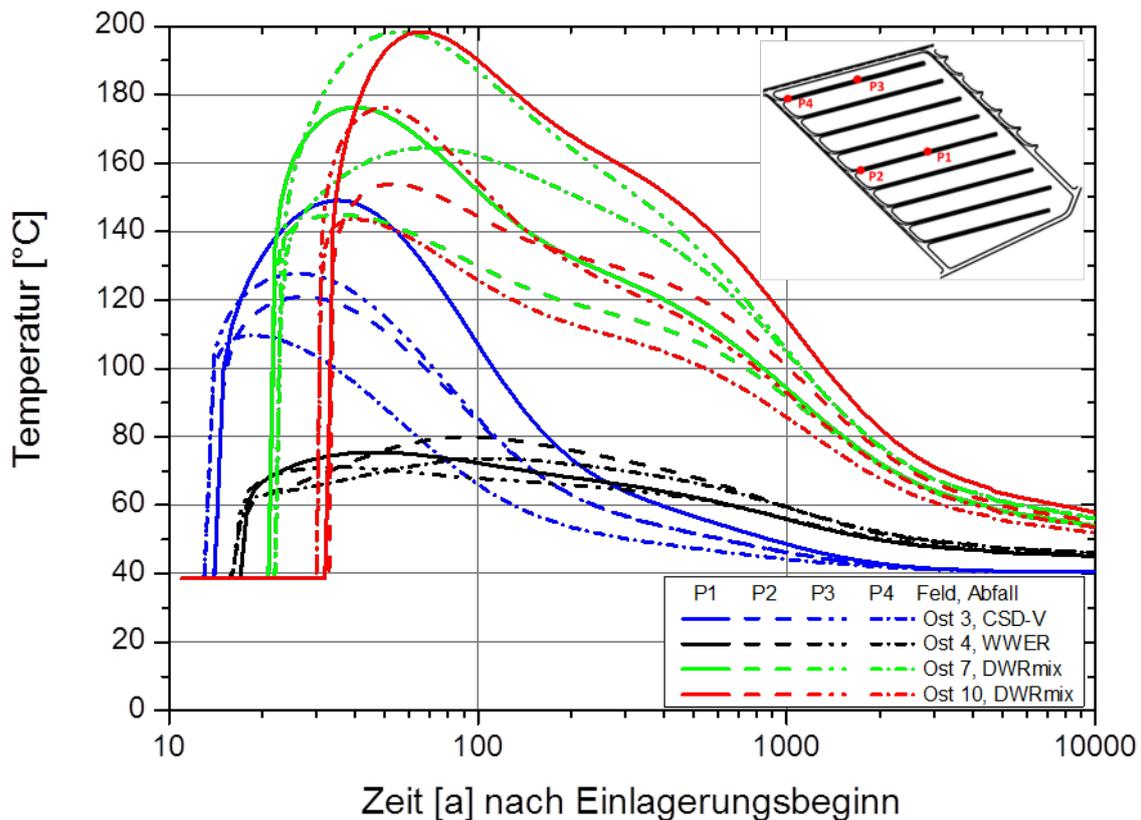
Die Einflüsse einer gegenseitigen thermischen Beeinflussung benachbarter Behälter und aus Randlagen auf das Temperaturverhalten sind in den vorangegangenen Modellen dargestellt worden. Im Modell B1M4 wird das thermische Verhalten einer Behälteranordnung entsprechend dem Planungskonzept untersucht. In dem Modell B1M4 sind alle Behälter mit ausgedienten Brennelementen aus Leistungsreaktoren und verglasten Abfällen in CSD-V jeweils separat mit ihrer abfallspezifischen Wärmeleistung und ihrer Zwischenlagerzeit sowie ihrem individuellen Einlagerungszeitpunkt berücksichtigt. Die Aufgrund ihrer geringen Wärmeleistung blieben Abfälle der Forschungsreaktoren und die Strukturteile der ausgedienten Brennelemente der Leistungsreaktoren unberücksichtigt. Strecken und Teilstrecken mit diesen Abfällen sind in Abb. 3.11 schwarz gekennzeichnet.

Die Berechnungen mit dem Modell B1M4 ermöglichen eine Aussage zur Temperaturverteilung im gesamten Endlager. In Abb. 3.11 ist der Zustand zum Zeitpunkt von 70 Jahren nach Einlagerungsbeginn dargestellt. Am Temperaturfeld sind die drei unterschiedlichen Abfallarten erkennbar (Behälter mit CSD-V im NE, daran anschließend der kältere Teil mit WWER, und ab dem Einlagerungsfeld Ost 5 die mit DWR mix befüllten Einlagerungsfelder).



**Abb. 3.11** Temperaturverteilung der Behälter im Endlager zum Zeitpunkt 70 Jahren nach Einlagerungsbeginn, B1M4: Behälter mit Brennstäben aus Leistungsreaktoren und CSD-V

In Abb. 3.12 bis Abb. 3.16 ist der Temperaturverlauf in Abhängigkeit von der Zeit an unterschiedlichen Stellen des Endlagers dargestellt. In Abb. 3.12 ist der Einfluss des Abfalltyps und der Position des Abfallbehälters in den Einlagerungsfeldern Ost 3 (CSD-V), Ost 4 (WWER), Ost 7 (DWR mix) und Ost 10 (DWR mix) dargestellt. Für die einzelnen Abfalltypen wurde stets die Oberflächentemperatur des Behälters bei jeweils der gleichen relativen Position im Einlagerungsfeld ausgewertet (P1 bis P4). Die folgenden Einlagerungsfelder wurden ausgewählt (Abfalltyp): Ost 3 (CSD-V), Ost 4 (WWER), Ost 7 (DWR mix) und Ost 10 (DWR mix). Bei dem Feld mit Behältern mit CSD-V beschränkt sich diese Feldeinteilung nur auf die mit diesem Abfall beladenen Strecken. Während die mit DWR-Abfall beladenen Strecken sich aufgrund ihrer Größe und Einbettung im gesamten Endlager nur geringfügig unterscheiden, sind bei dem Feld der CSD-V-Abfälle deutlich die thermische Randlage des gesamten Feldes und das Potenzial für verbesserte Behälter- und Streckenabstände erkennbar. Angemerkt sei, dass die WWER-Abfälle bei den hier gewählten Bedingungen aus thermischer Sicht nur geringe Anforderungen an ein Endlager für stark wärmeentwickelnde Abfälle stellen.

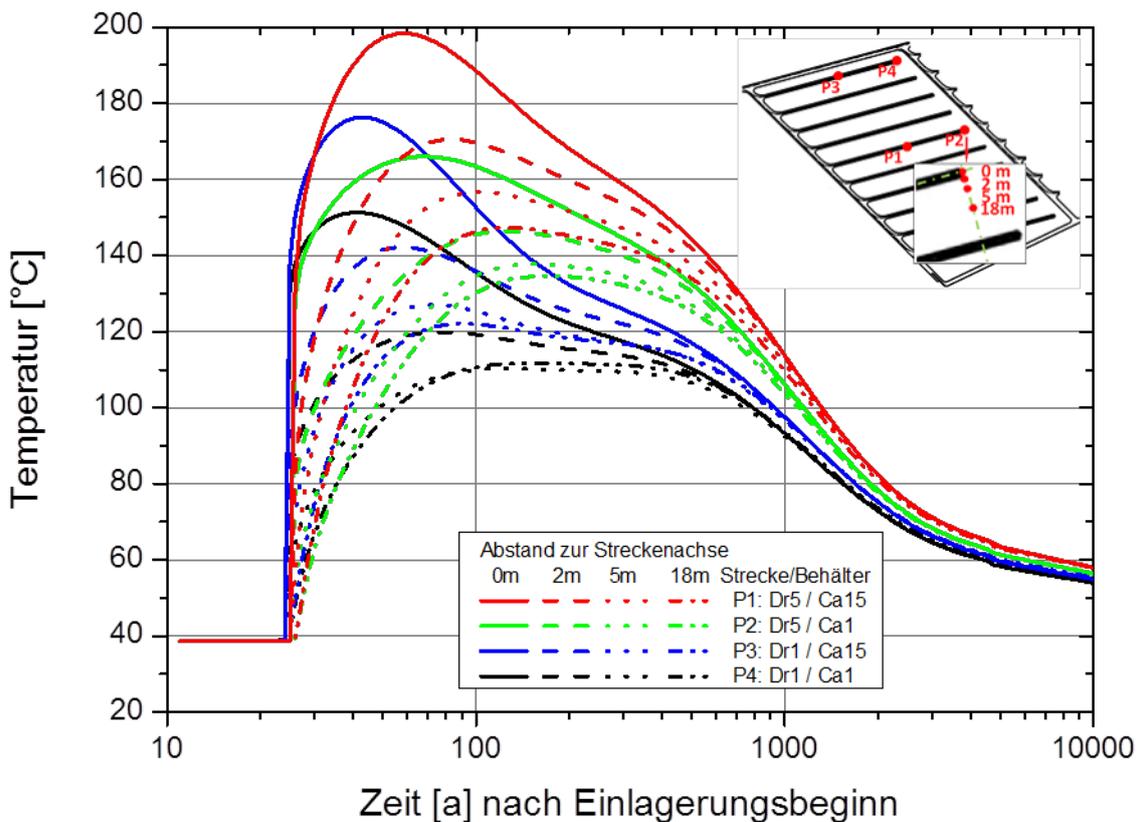


**Abb. 3.12** Zeitlicher Verlauf der Temperatur an der Oberfläche ausgewählter Behälter in den Einlagerungsfeldern Ost 3 (CSD-V), Ost 4 (WWER), Ost 7 (DWR mix 89/11) und Ost 10 (DWR mix 89/11), B1M4

Das Einlagerungsfeld Ost 8 ist repräsentativ für alle größeren Einlagerungsfelder, Abb. 3.13. Die Maximaltemperatur erreicht nicht ganz die Auslegungstemperatur. Zusätzlich zur Temperatur am Auslegungspunkt auf den einzelnen Behältern ist der Temperaturverlauf für unterschiedliche seitliche Abstände zu den Behältern mit angegeben. Der Abstand von 2 m entspricht in etwa dem Abstand zum seitlichen Streckenstoß, der Abstand von 5 m ist ein Abstand, wie er dem äußeren seitlichen Stoß einer neben den Behältern neu aufzufahrenden Strecke bei der Rückholung (Kapitel 3.3.2.6) entspricht, und der Streckenabstand von 18 m entspricht der Pfeilermitte. Die Höhe der Auswertepunkte liegt auf der Höhe der Mittelebene durch die Behälter.

Vom Behälter ausgehend fällt die Temperatur im erwärmten Gebirge in Richtung auf die Pfeilermitte, um bei Annäherung an den nächsten Behälter in der benachbarten Strecke wieder anzusteigen. Im Zusammenhang mit der Rückholung und Bergung ist diese Gebirgstemperatur das Niveau, das für die dabei anstehenden Arbeiten beherrscht werden muss. Die Temperatur im Abstand von 2 m zum Behälter und die

Temperatur am Behälter verdeutlichen die Bandbreite, die in etwa in einem Streckenquerschnitt vorliegt und die bei der Betrachtung der ablaufenden physikalischen und chemischen Prozesse zu betrachten ist. Wenn für die Betriebsdauer und die Verschlusszeit ein Zeitraum von 60 bis 80 Jahre angenommen wird, lässt sich feststellen, dass sich das gesamte Steinsalz innerhalb des Einlagerungsfeldes bereits innerhalb dieser Zeitspanne auf mindestens 110 °C aufgeheizt hat, in großen Teilen des Einlagerungsfeldes auch deutlich höher, und dieses Temperaturniveau auch bis ca. 600 Jahre nach Betriebsbeginn hält.

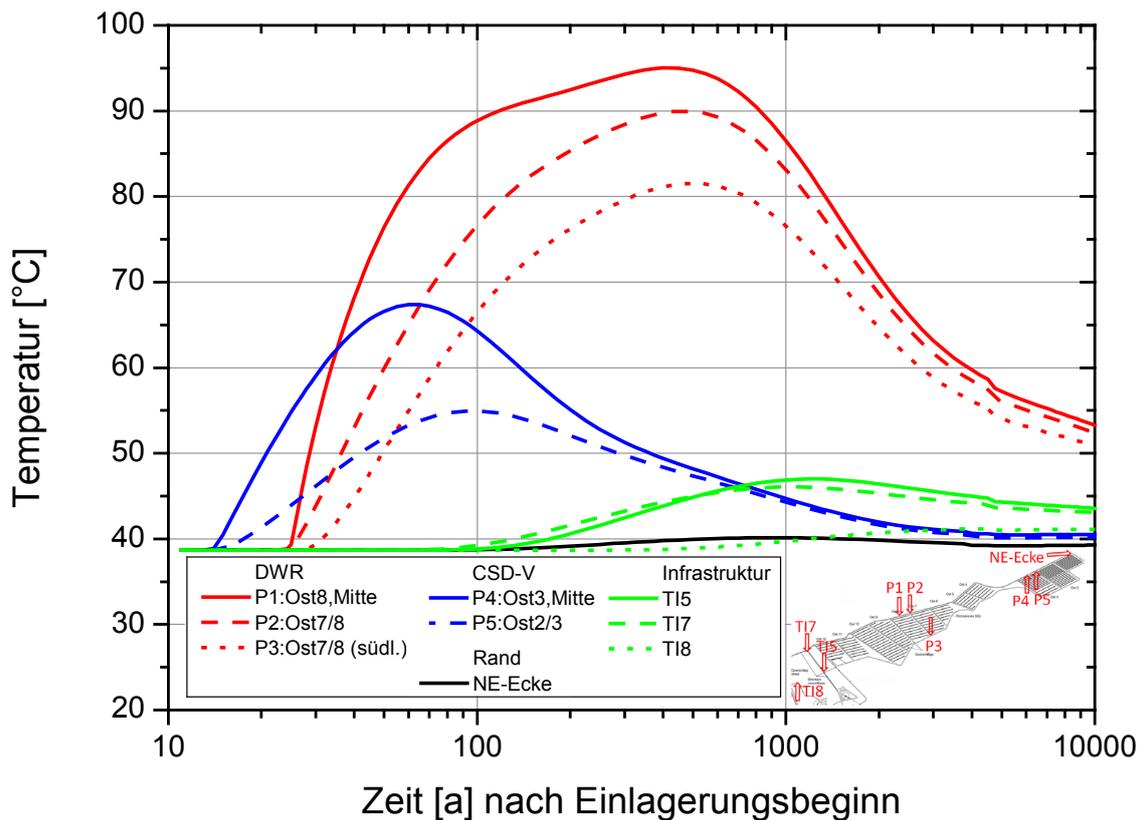


**Abb. 3.13** Zeitlicher Verlauf der Temperatur im Einlagerungsfeld Ost 8 (DWR mix 89/11), B1M4

In Abb. 3.14 ist das Temperaturverhalten entlang der Umfahrungen und im Infrastrukturbereich dargestellt. Der kompaktierte Salzgrus in den Umfahrungsstrecken ist ein wesentliches Element für den sicheren Einschluss der Abfälle im Langzeitverhalten. Die Kompaktion des Salzgrus hängt wesentlich vom Temperaturniveau des Gebirges ab. Zwar sind nur Positionen in den Umfahrungsstrecken ausgewählt, die Abbildung verdeutlicht jedoch bereits die räumliche Abhängigkeit des Temperaturfeldes und den Einfluss der unterschiedlichen Abfalltypen. Die Nordostecke der Umfahrung liegt in ei-

nem Bereich, in dem die Abfälle der Forschungs- und Versuchsreaktoren eingelagert werden. Diese Abfälle sind in der hier vorgenommenen Berechnung unberücksichtigt geblieben. Hier ist zwar damit zu rechnen, dass sich dieser Bereich erwärmen wird, das Niveau wird jedoch wegen des geringen Wärmeeintrags sehr niedrig bleiben. Werden zum Vergleich die Felder herangezogen, in denen Behälter mit den stärker wärmeentwickelnden Brennstäben der WWER-Reaktoren eingelagert werden, ergibt sich in der Südwestecke der Umfahrung von Ost 3 und der Nordostecke der Umfahrung von Ost 4 eine maximale Temperatur von knapp unter 50 °C.

Die mit TI5 und TI7 gekennzeichneten Punkte des Infrastrukturbereichs sind die dem Ostteil des Endlagers am nächsten liegenden Punkte. Hier wird ein Niveau erreicht, das die 50 °C-Marke kaum überschreitet. Der Auswertepunkt TI8 kann stellvertretend für den Einfluss der Einlagerungsfelder des Ostflügels auf die des Westflügels gesehen werden. In dem hier gewählten Betrachtungszeitraum von 10.000 Jahren erwärmt sich der Infrastrukturbereich gegenüber seiner Anfangstemperatur um 2,5 K.

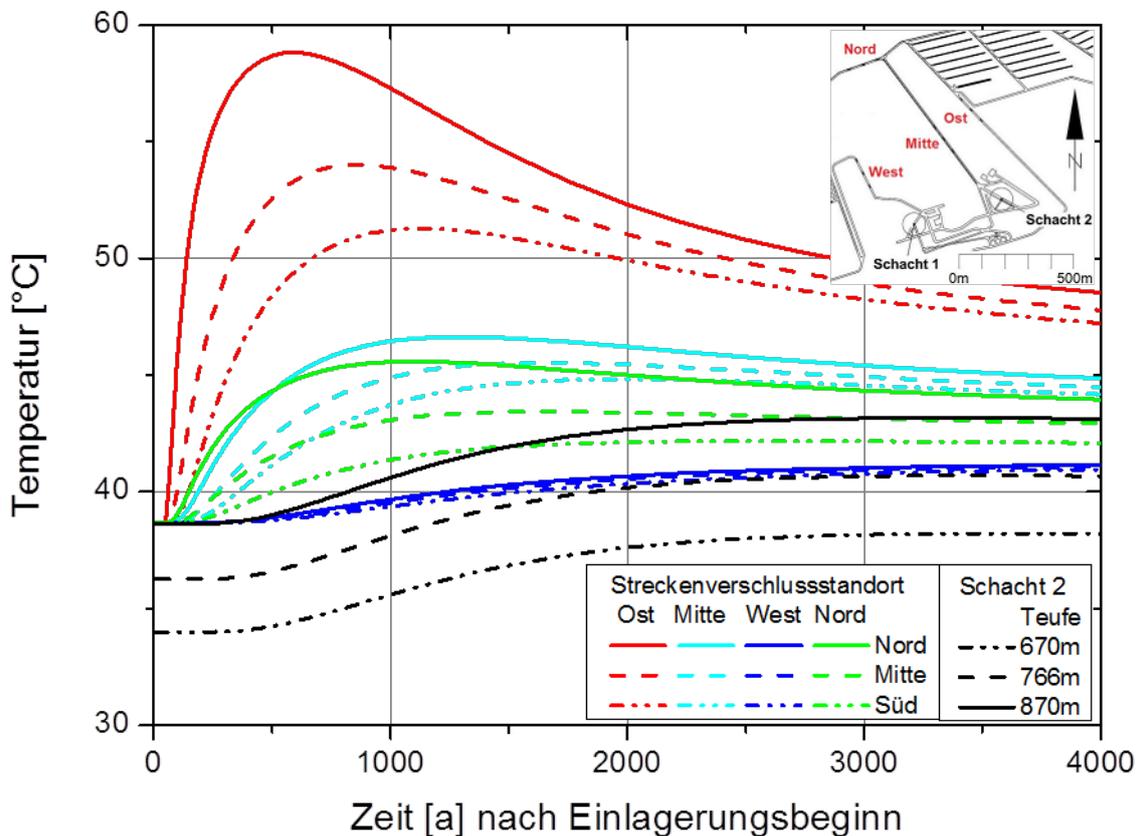


**Abb. 3.14** Zeitlicher Verlauf der Temperatur entlang der Umfahrung und im Infrastrukturbereich, B1M4

Das Temperaturverhalten für die Streckenverschlüsse ist aus geomechanischer Sicht in Bezug auf die thermische Belastung und ggf. für chemische Prozesse von Bedeutung. In Abb. 3.15 ist die Bandbreite im zu erwartenden Temperaturverlauf an den einzelnen Standorten dargestellt. Zusätzlich ist für Schacht 2 der Temperaturverlauf in drei unterschiedlichen Teufen dargestellt. In Abb. 3.15 ist die Bandbreite im zu erwartenden Temperaturverlauf an den einzelnen Standorten dargestellt. Zusätzlich ist für Schacht 2 der Temperaturverlauf in drei unterschiedlichen Teufen dargestellt. Die Streckenverschlussstandorte sind mit Ost, Mitte, West und Nord bezeichnet und jedes Verschlussbauwerk wird mit drei Temperaturverläufen charakterisiert, den mit Nord und Süd bezeichneten Enden der Bauwerke und der Mitte.

Bei Schacht 2 wirkt sich im Vergleich zum Verschlussstandort West bzw. zu TI8, Abb. 3.14, die unterschiedliche Position im Endlager aus. Alle drei Standorte sind in etwa gleich weit von den Feldgrenzen der Einlagerungsfelder entfernt, der Schacht liegt jedoch mehr im Einflussbereich der seitlichen Ränder und weniger in dem der Stirnflächen. Daher ergibt sich für den Schacht eine stärkere Erwärmung als am Ver-

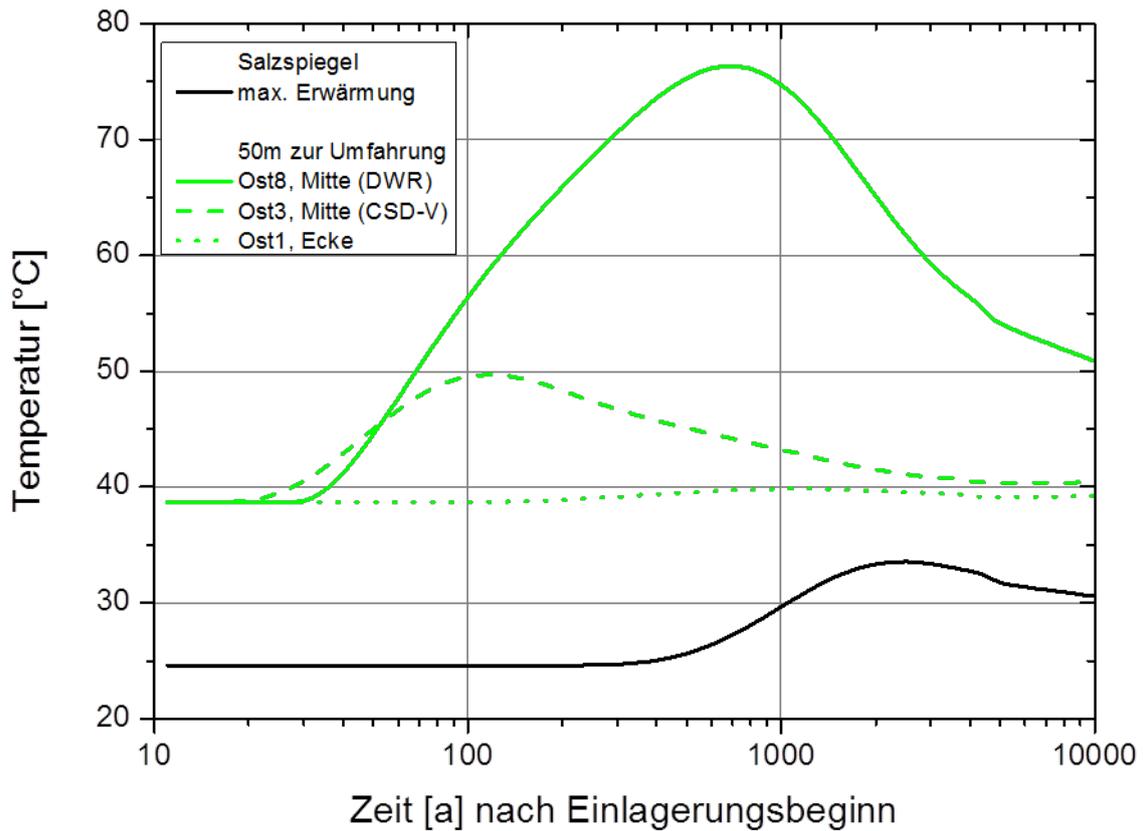
schlussstandort West bzw. T18. Die maximale Temperatur von ca. 60 °C entwickelt sich aufgrund seiner Nähe zu den Einlagerungsfeldern am Verschlussstandort Ost, während die weiter entfernt liegenden Verschlüsse geringeren Temperaturen ausgesetzt sind.



**Abb. 3.15** Zeitlicher Verlauf der Temperatur an den geplanten Verschlussstandorten und entlang der Schachtachse, B1M4

Das Temperaturverhalten für Bewertungspunkte im Sicherheitsabstand von 50 m zur Umfahrung ist in Abb. 3.16 dargestellt. Als Maximaltemperatur ergibt sich ein Wert von ca. 75 °C. Auch im Abstand von 50 m zur Umfahrung, das ist ca. 75 m zum eingelagerten Abfall in der randnächsten Strecke, macht sich der unterschiedliche Wärmeeintrag der jeweiligen Abfalltypen bemerkbar.

Zusätzlich ist die Temperaturentwicklung am Salzspiegel enthalten. Als Auswertepunkt für den Salzspiegel ist der Punkt ausgewählt, der rechnerisch mit ca. 33,5 °C das höchste Temperaturniveau erreicht. Bei einer Ausgangstemperatur von ca. 24,6 °C ergibt sich damit eine maximale Erwärmung am Salzspiegel von 9 K.



**Abb. 3.16** Zeitlicher Verlauf der Temperatur im Abstand von 50 m zur Umfahrung und am Salzspiegel, B1M4

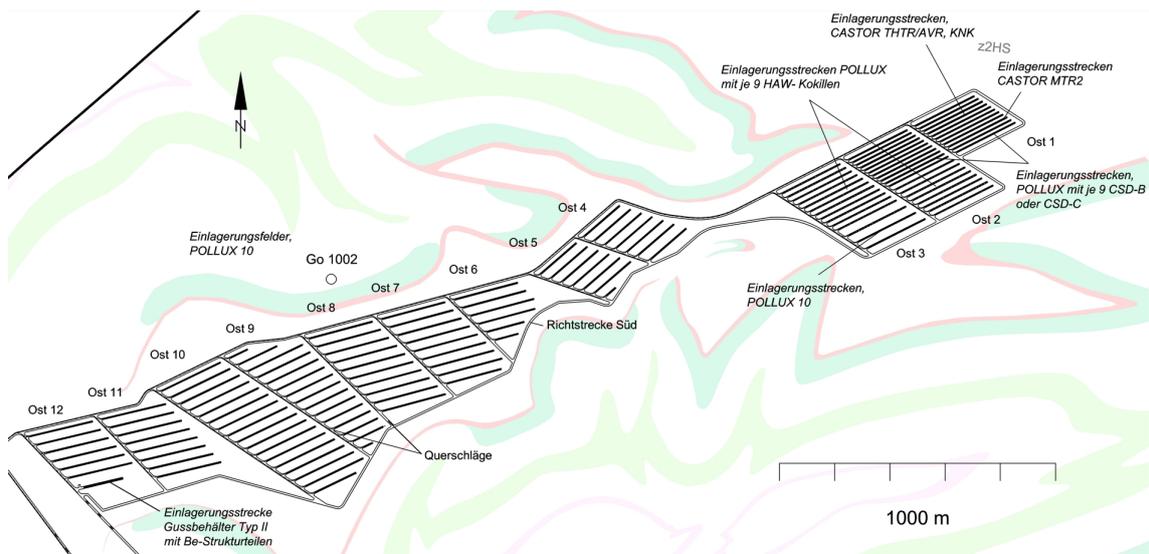
### 3.3.2.2 Planungen der Einlagerungsfelder

Im Rahmen von Forschungs- und Entwicklungsarbeiten wurden von der DBE bereits in den 1990er Jahren generische Endlagerplanungen für ein HAW-Endlager in Salz durchgeführt. Dies beinhaltete zum einen die technische Planung des Endlagerbergwerkes und der dafür notwendigen Transport- und Einlagerungstechniken sowie zum anderen thermische Auslegungsberechnungen. Die FuE-Arbeiten zu den Transport- und Einlagerungstechniken wurden soweit geführt, dass als Ergebnis im Maßstab 1:1 erprobte und von Sachverständigen überprüfte Komponenten bereitstanden. Im Bereich der thermischen Berechnungen wurden durch kontinuierliche Weiterentwicklung von Stoffgesetzen und Rechenprogrammen qualifizierte Werkzeuge geschaffen, die auch in internationalen Benchmarktests bestehen mussten. Diese grundlegenden Kenntnisse und Erfahrungen wurden erstmals standortbezogen angewandt bei der Planung „Aktualisierung des Konzepts Endlager Gorleben“ /DBE 98/.

Für die direkte Endlagerung ausgedienter Brennelemente, wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle und Brennelement-Strukturteile ist ebenfalls in /BOL 11/ bereits ein Konzept zur Einlagerung dieser Abfälle in Form der Streckenlagerung beschrieben worden. Demnach wurden im Ostflügel des Endlagerbergwerks Gorleben Einlagerungsfelder für die Streckenlagerung ausgewiesen. Unter Zugrundelegung eines verringerten Abfallmengengerüsts und den vorgenannten Ergebnissen der thermischen Auslegungsrechnungen werden zwölf Einlagerungsfelder mit selbstabschirmenden Endlagerbehältern benötigt. In dem dafür ausgelegten Grubengebäude sind dies:

- Ost 1 mit CASTOR<sup>®</sup>-THTR/AVR/KNK, CASTOR<sup>®</sup> MTR 2 und POLLUX<sup>®</sup>-CSD-B/C
- Ost 2 mit POLLUX<sup>®</sup>-CSD-B/C und POLLUX<sup>®</sup>-9
- Ost 3 mit POLLUX<sup>®</sup>-9 und POLLUX<sup>®</sup>-10
- Ost 4 bis 11 mit POLLUX<sup>®</sup>-10 und
- Ost 12 mit POLLUX<sup>®</sup>-10 und Gussbehältern Typ II

In Abb. 3.17 ist der östlich der beiden Schächte angelegte Teil des Grubengebäudes mit allen Einlagerungsfeldern für wärmeentwickelnde Abfälle dargestellt.



**Abb. 3.17** Einlagerungsfelder Ost – Streckenlagerung für ausgediente Brennelemente, wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle sowie Brennelement-Strukturteile

Da die Transport- und Einlagerungstechnik von POLLUX<sup>®</sup>-Behältern unverändert bleibt, kann auf die Darstellung im AP 5 verwiesen werden. In Tab. 3.4 ist die Belegung der Einlagerungsfelder streckengenau dargestellt.

**Tab. 3.4** Belegung der Einlagerungsfelder (streckengenau, Variante B1)

Einlagerungs-feld- und Einlagerungs-strecken-Nr. <sup>1)</sup>	Endlager-behälter	Anzahl Einlage-rungs-strecken	Anzahl Endlager-behälter pro Strecke	Gesamt-anzahl Endlager-behälter	Strecken-abstand [m]	Behälter-abstand in Strecken-achse [m]
Ost 1						
Ost 1.1	CASTOR <sup>®</sup> - THTR/AVR/KNK	1	61	61	15,3	1
Ost 1.2 - 1.7	CASTOR <sup>®</sup> - THTR/AVR/KNK	6	61	366		
Ost 1.8 a	CASTOR <sup>®</sup> - THTR/AVR/KNK	1	34	34		
Ost 1.8 b	CASTOR <sup>®</sup> - MTR2 <sup>2)</sup>		42	42		
Ost 1.9 a	CASTOR <sup>®</sup> - MTR2 <sup>2)</sup>	1	8	8		
Ost 1.9 b	POLLUX <sup>®</sup> -CSD-B/C		32	32		
Ost 1.10	POLLUX <sup>®</sup> -CSD-B/C	1	35	35		

<b>Einlagerungs- feld- und Einlagerungs- strecken-Nr.<sup>1)</sup></b>	<b>Endlager- behälter</b>	<b>Anzahl Einlage- rungs- strecken</b>	<b>Anzahl Endlager- behälter pro Strecke</b>	<b>Gesamt- anzahl Endlager- behälter</b>	<b>Strecken- abstand  [m]</b>	<b>Behälter- abstand in Strecken- achse  [m]</b>
Ost 1.11	POLLUX® -CSD- B/C	1	35	35		
Ost 2						
Ost 2.1 - 2.11	POLLUX® -CSD- B/C	11	35	385	15,3	1
Ost 2.12 a	POLLUX® -CSD- B/C	1	4	4	21	5,5
Ost 2.12 b	POLLUX® -9		18	18		
Ost 2.13 - 2.19	POLLUX® -9	7	21	147		
Ost 3						
Ost 3.1 - 3.11	POLLUX® -9	11	21	231	21	5,5
Ost 3.12 a	POLLUX® -9	1	19	19	36	
Ost 3.12 b	POLLUX® -10		2	2		2,63
Ost 3.13 - 3.14	POLLUX® -10	2	28	56		
Ost 4	POLLUX® -10	7	20	140	36	2,63
Ost 5	POLLUX® -10			125		
Ost 5.1 - 5.6	POLLUX® -10	6	20	120	36	2,63
Ost 5.7	POLLUX® -10	1	5	5	36	
Ost 6	POLLUX® -10			135		
Ost 6.1 - 6.3	POLLUX® -10	3	28	84	36	2,63
Ost 6.4	POLLUX® -10	1	25	25	36	
Ost 6.5	POLLUX® -10	1	16	16	36	
Ost 6.6	POLLUX® -10	1	10	10	36	
Ost 7	POLLUX® -10			248		
Ost 7.1 - 7.8	POLLUX® -10	8	28	224	36	2,63
Ost 7.9	POLLUX® -10	1	24	24	36	
Ost 8	POLLUX® -10	10	28	280	36	2,63
Ost 9	POLLUX® -10			274		
Ost 9.1	POLLUX® -10	1	8	8	36	2,63
Ost 9.2	POLLUX® -10	1	18	18	36	
Ost 9.3	POLLUX® -10	1	26	26	36	

Einlagerungs- feld- und Einlagerungs- strecken-Nr. <sup>1)</sup>	Endlager- behälter	Anzahl Einlage- rungs- strecken	Anzahl Endlager- behälter pro Strecke	Gesamt- anzahl Endlager- behälter	Strecken- abstand  [m]	Behälter- abstand in Strecken- achse  [m]
Ost 9.4	POLLUX®-10	1	25	25	36	
Ost 9.5	POLLUX®-10	1	24	24	36	
Ost 9.6	POLLUX®-10	1	22	22	36	
Ost 9.7	POLLUX®-10	1	22	22	36	
Ost 9.8	POLLUX®-10	1	21	21	36	
Ost 9.9	POLLUX®-10	1	20	20	36	
Ost 9.10	POLLUX®-10	1	19	19	36	
Ost 9.11	POLLUX®-10	1	18	18	36	
Ost 9.12	POLLUX®-10	1	17	17	36	
Ost 9.13	POLLUX®-10	1	16	16	36	
Ost 9.14	POLLUX®-10	1	14	14	36	
Ost 9.15	POLLUX®-10	1	4	4	36	
Ost 10	POLLUX®-10			468		
Ost 10.1 - 10.16	POLLUX®-10	16	28	448	36	2,63
Ost 10.17	POLLUX®-10	1	20	20	36	
Ost 11	POLLUX®-10	8	28	224	36	2,63
Ost 12						
Ost 12.1 - 12.6	POLLUX®-10	1	28	168	36	2,63
Ost 12.7	Gussbehälter Typ II	1	2.620	2.620	36	0,10

<sup>1)</sup> Numerisch = Feld/Strecke, Alphabetisch = Abfallsortenteilstrecke

<sup>2)</sup> Behältereinlagerung, stehend; Behälterdurchmesser 1,43 m

### 3.3.2.3 Betrieblicher Strahlenschutz

#### 3.3.2.3.1 Geltendes Regelwerk

Die für den Betrieb eines Endlagers geltenden Schutzziele werden durch das Atomgesetz (AtG) /ATG 11/ und die Strahlenschutzverordnung (StrlSchV) /SSV 11/ vorgegeben. Das wesentliche Schutzziel der Strahlenschutzgesetzgebung ist nach § 1 AtG /ATG 11/:

*Leben, Gesundheit und Sachgüter vor den Gefahren der Kernenergie und der schädlichen Wirkung ionisierender Strahlung zu schützen.*

In § 6 StrlSchV /SSV 11/ sind die zum Erreichen des o. g. Schutzzieles dienenden Strahlenschutzgrundsätze formuliert:

- 1. Wer eine Tätigkeit [...] plant oder ausübt, ist verpflichtet, jede unnötige Strahlenexposition oder Kontamination von Mensch und Umwelt zu vermeiden.*
- 2. Wer eine Tätigkeit [...] plant oder ausübt, ist verpflichtet, jede Strahlenexposition oder Kontamination von Mensch und Umwelt unter Beachtung des Standes von Wissenschaft und Technik und unter Berücksichtigung aller Umstände des Einzelfalles auch unterhalb der Grenzwerte so gering wie möglich zu halten.*

Über die Festlegungen im AtG /ATG 11/ und in der StrlSchV /SSV 11/ hinausgehend sind weitere Vorschriften zu beachten. Dazu zählen z. B.:

- Die Richtlinie zur Emissions- und Immissionsüberwachung kerntechnischer Anlagen (REI) /REI 06/
- Empfehlungen von Expertengruppierungen wie z. B. der Strahlenschutzkommission (SSK)
- Regeln, Normen, Beschlüsse, wie z. B. die sicherheitstechnischen Regeln des kerntechnischen Ausschusses (KTA), die Normen des Deutschen Institutes für Normung (DIN), die Bestimmungen der Berufsgenossenschaften und anderer Fachorganisationen (z. B. UVV) und die Weisungsbeschlüsse der TÜV-Leitstelle bei der VdTÜV

### **3.3.2.3.2 Maßnahmen des betrieblichen Strahlenschutzes**

Im Folgenden werden die Maßnahmen des betrieblichen Strahlenschutzes bei der Variante B1 beschrieben. Zu diesen Maßnahmen gehören die Einteilung des Endlagers in Strahlenschutzbereiche und die radiologische Überwachung. Die Einteilung des Endlagers in Strahlenschutzbereiche und die radiologische Überwachung von Räumen, Bereichen und Arbeitsplätzen ist aufgrund der Strahlung sowie einer möglichen Kontamination bzw. Freisetzung von Radionukliden aus den Endlagerbehältern erforderlich. Sie sind wichtige Instrumente des Strahlenschutzes, um die Anforderungen des

§ 6 StrlSchV /SSV 11/ (Vermeidung einer unnötigen Strahlenexposition und Dosisreduzierung) zu erfüllen.

#### **3.3.2.3.2.1 Einteilung des Endlagers in Strahlenschutzbereiche**

Die Einteilung der Strahlenschutzbereiche ist im § 36 StrlSchV /SSV 11/ geregelt. Demnach wird je nach Höhe der Strahlenexposition zwischen Überwachungsbereichen, Kontrollbereichen und Sperrbereichen unterschieden. Dabei sind äußere und innere Strahlenexposition zu berücksichtigen.

Die drei Strahlenschutzbereiche werden im § 36 StrlSchV /SSV 11/ wie folgt definiert:

- 1. Überwachungsbereiche sind nicht zum Kontrollbereich gehörende betriebliche Bereiche, in denen Personen im Kalenderjahr eine effektive Dosis von mehr als 1 mSv [...] erhalten können.*
- 2. Kontrollbereiche sind Bereiche, in denen Personen im Kalenderjahr eine effektive Dosis von mehr als 6 mSv [...] erhalten können.*
- 3. Sperrbereiche sind Bereiche des Kontrollbereichs, in denen die Ortsdosisleistung höher als 3 mSv/h sein kann.*

Kontrollbereiche und Sperrbereiche sind abzugrenzen und deutlich sichtbar und dauerhaft zu kennzeichnen. Sperrbereiche sind darüber hinaus so abzusichern, dass Personen auch mit einzelnen Körperteilen nicht unkontrolliert hineingelangen können.

Bei der Einteilung der Strahlenschutzbereiche wird sowohl den Anforderungen des Strahlenschutzes als auch des Betriebes Rechnung getragen, indem der Auffahr- vom Einlagerungs- und Versatzbetrieb räumlich und wettertechnisch getrennt und die Strahlenschutzbereiche zusammenhängend eingerichtet werden.

#### **Kontrollbereiche**

Im übertägigen Bereich des Endlagers gehören alle Räume und Bereiche, in denen die Endlagerbehälter gehandhabt bzw. gelagert werden, zum Kontrollbereich (KB). Dazu zählen die Entladehalle für die Endlagerbehälter, die Bereitstellungs- und Transporthalle einschließlich Übergabebereich, die Pufferhalle für die Endlagerbehälter, die Technikbereiche für die Endlagerbehälter, der Raum für Sonderbehandlung (z. B. für die

Dekontamination von Abfallgebinden/rückgeführten Transferbehältern/Tausch- und Transportpaletten und die Reparatur von Gebinden/Behältern und Ausrüstung) und die Schachthalle für Schacht 2. Darüber hinaus zählen zum übertägigen Kontrollbereich die Werkstatt, die Räume zur Sammlung fester und flüssiger radioaktiver Betriebsabfälle sowie für deren Aufbereitung, die Wäscherei für Wäsche aus dem Kontrollbereich, das Strahlenschutzlabor, das Labor für chemische und radiochemische Analysen, die Räume für Personendekontamination und die Lüftungsanlage für die Abluft aus dem übertägigen Kontrollbereich sowie der Wetterkanal und die Innenseite des Kamins.

Zum untertägigen Kontrollbereich bei der Variante B1 gehören die Schachtröhre von Schacht 2, der Füllort von Schacht 2, die Transportstrecken für den Transport der Endlagerbehälter, die Einlagerungsstrecke und teilweise die Einlagerungsfelder, die Wetterstrecken, die die Abwetter aus den oben genannten Bereichen führen und die Grubenräume im Infrastrukturbereich wie z. B. die Werkstätten und Dekontaminationsräume.

In den Einlagerungsfeldern ist mit fortschreitender Befüllung der Felder eine Verschiebung der Kontrollbereichsgrenze durchzuführen.

Neben den bereits genannten Bereichen können „temporäre Kontrollbereiche“ überall dort eingerichtet werden, wo zeitweise ein erhöhter Strahlenpegel vorliegt und im Sinne des Strahlenschutzes dies für notwendig erachtet wird. Dies kann z. B. dort vorkommen, wo beladene Anlieferungsfahrzeuge parken.

### **Überwachungsbereiche**

Überwachungsbereiche (ÜB) können nach Bedarf ausgewiesen werden.

### **Sperrbereiche**

Bei der Variante B1 ist bislang kein Sperrbereich vorgesehen.

#### **3.3.2.3.2.2 Radiologische Überwachung**

Gemäß dem § 39 StrISchV /SSV 11/ ist eine messtechnische Überwachung der Strahlenschutzbereiche erforderlich:

In Strahlenschutzbereichen ist in dem für die Ermittlung der Strahlenexposition erforderlichen Umfang jeweils einzeln oder in Kombination

1. *Die Ortsdosis oder die Ortsdosisleistung oder*
2. *die Konzentration radioaktiver Stoffe in der Luft oder*
3. *die Kontamination des Arbeitsplatzes*

zu überwachen.

Um die messtechnische Überwachung im erforderlichen Umfang gewährleisten zu können, sind vom Strahlenschutz die folgenden Maßnahmen durchzuführen:

- Gebindeeingangskontrolle
- Kontaminationskontrolle
- Überwachung der Ortsdosis und Ortsdosisleistung
- Überwachung der Raumluft und der Wetter
- Personenüberwachung
- Emissions-/Immisionsüberwachung

### **Gebindeeingangskontrolle**

Bei der Gebindeeingangskontrolle werden die Ortsdosisleistung der Endlagerbehälter direkt an der Oberfläche und in 1 m (zylindrisch) bzw. 2 m (kubisch) Abstand und die nicht festhaftende Oberflächenkontamination der Endlagerbehälter gemessen. Nur bei Unterschreiten von festgelegten betrieblichen Bezugswerten (Annahmebedingungen) werden die Endlagerbehälter zur Einlagerung im Endlager angenommen.

### **Kontaminationskontrolle**

Gemäß dem § 44 StrlSchV /SSV 11/ ist beim Vorhandensein offener radioaktiver Stoffe in Strahlenschutzbereichen festzustellen, ob Kontaminationen durch diese Stoffe vorliegen. An Personen, die den Kontrollbereich verlassen, ist zu prüfen, ob diese kontaminiert sind. Wird hierbei eine Kontamination festgestellt, so sind unverzüglich Maßnahmen zu treffen, die geeignet sind, weitere Strahlenexpositionen und eine Weiterverbreitung radioaktiver Stoffe zu verhindern.

Beim Verlassen des Kontrollbereiches sind Kontaminationsmessungen an Personen und Gegenständen durchzuführen. Diese Messungen werden bei den Kontrollbereichsübergängen mittels festinstallierten Messgeräten wie z. B. Ganzkörpermonitoren oder mit mobilen Kontaminationsmessgeräten durch das Strahlenschutzpersonal durchgeführt.

Um eine Kontaminationsverschleppung zu verhindern, ist eine Überwachung der Kontamination von Oberflächen notwendig. Deshalb ist eine mögliche Kontamination so früh wie möglich am Entstehungsort zu detektieren. Um dies zu ermöglichen, sind in festgelegten Räumen und Bereichen mit erhöhtem Kontaminationsrisiko regelmäßige Kontaminationskontrollen mittels Wischtest durchzuführen.

Um zu verhindern, dass eventuell kontaminierte Wetter aus dem Kontrollbereich (Einlagerungsbereich) in den Überwachungsbereich (Auffahrungsbereich) gelangen, ist es erforderlich, zwischen den Bereichen eine zum Kontrollbereich gerichtete Strömung aufrecht zu erhalten oder eine wettertechnische Trennung durch Wetterbauwerke sicher zu stellen.

### **Überwachung der Ortsdosis und Ortsdosisleistung**

Die Räume und Arbeitsplätze, bei denen eine signifikante Ortsdosis bzw. Ortsdosisleistung nicht ausgeschlossen werden kann, sind mit festinstallierten Messgeräten auszustatten. Die Geräte sollen auf einem Display den aktuellen Wert anzeigen und mit einem akustischen und optischen Warnsignal, das bei Erreichen eines festgelegten Grenzwertes ausgelöst wird, ausgestattet sein. Die Messungen der Ortsdosis bzw. Ortsdosisleistung sind mit der Umgebungs-Äquivalentsdosis  $H^*(10)$  auszuwerten.

### **Überwachung der Raumluft und Wetter**

Die Räume und Arbeitsplätze, in denen eine signifikante Konzentration an Radionukliden und Aerosolen in der Luft nicht ausgeschlossen werden kann, sind zu überwachen. Dabei können je nach Art der zu überwachenden Radionuklide Sammler für Edelgase, Jod, Kohlenstoff-14, Tritium (H-3) und/oder Aerosole verwendet werden.

### **Personenüberwachung**

Gemäß § 40 StrlSchV /SSV 11/ ist bei Personen, die sich im Kontrollbereich aufhalten, die Körperdosis zu ermitteln. Im § 41 StrlSchV /SSV 11/ ist festgelegt, dass zur Ermitt-

lung der Körperdosis die Personendosis gemessen wird. Die Personendosis ist mit einem Dosimeter zu ermitteln, das bei einer Messstelle anzufordern ist oder mit einem Dosimeter, dessen Messwert ausgewertet wird und dessen Verwendung nach Zustimmung einer Messstelle von der zuständigen Behörde gestattet wurde.

Personen, die den Kontrollbereich betreten, sind mit einem solchen amtlichen Dosimeter auszustatten. Darüber hinaus erhalten diese Personen ein elektrisches Dosimeter, auf dessen Display die Dosis direkt abgelesen werden kann und das über ein akustisches Signal bei Überschreitung eines vorher festgelegten Dosiswertes bzw. einer vorher festgelegten Ortsdosisleistung warnt.

### **Emissions-/Immissionsüberwachung**

Die Emissions-/Immissionsüberwachung von Endlagern ist in der REI /REI 06/ geregelt. Demnach sind für die Emissionsüberwachung bestimmte radioaktive Stoffe wie Tritium, Kohlenstoff 14, Radon 222, Radioisotope des Thoriums, des Urans und der Transurane sowie Spalt- und Aktivierungsprodukte maßgebend. Diese radioaktiven Stoffe sind mit kontinuierlichen Messungen der Kaminfortluft und des Abwassers und kontinuierlichen oder diskontinuierlichen Probeentnahmen in der Kaminfortluft und im Abwasser zu überwachen und zu bilanzieren.

Um dies gewährleisten zu können, sind Messgeräte für die entsprechenden Messungen und Probenahmen vorzuhalten.

#### **3.3.2.4 Bewetterung**

Die Sicherheitsanforderungen des BMU /BMU 10/ verlangen im Rahmen der Endlagerauslegung Durchörterungen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich (ewG) zu minimieren. Um dieser Anforderung gerecht zu werden, soll das Endlagerbergwerk mit Hilfe einer einsöhligen Bewetterung mit frischen Wettern versorgt werden.

Das Konzept der einsöhligen Bewetterung sieht vor, während der Betriebszeit und Verschlussphase nur die vorhandenen Grubenbaue der Einlagerungssohle zur Bewetterung zu nutzen. Die wettertechnische Nutzung der über dem Einlagerungsniveau liegenden Erkundungssohle ist nicht vorgesehen. Eine mögliche Rückholung und die daraus resultierenden Randbedingungen für das Bewetterungskonzept werden gesondert betrachtet.

Durch das gewählte Bewetterungskonzept entsteht im Grubengebäude eine rückläufige Wetterführung. Die frischen Wetter ziehen über den einziehenden Schacht (Schacht 1) der Doppelschachanlage in das Grubengebäude. Hier teilt sich der Wetterstrom in drei Teilströme. Der Einlagerungsbereich der Streckenlagerung, der Einlagerungsbereich der optionalen Variante A und der Infrastrukturbereich werden jeweils mit einem Teilstrom versorgt. Aus den Regelungen des betrieblichen Strahlenschutzes ergibt sich für das Bewetterungskonzept die Anforderung, das Grubengebäude in die Strahlenschutzbereiche Überwachungs- und Kontrollbereich zu gliedern. Der Teilstrom zur Versorgung der Streckenlagerung zieht über die Richtstrecke Süd durch den Überwachungsbereich (ÜB) zum Einlagerungsort. Im Kontrollbereich (KB) zieht der Wetterstrom über die Richtstrecke Nord wieder zurück zum Schachtbereich und verlässt das Grubengebäude über den Schacht 2. Der Übergang beider Strahlenschutzbereiche liegt im jeweiligen Einlagerungsquerschlag. Eine wetterdichte Trennung ist nicht vorgesehen. Der gerichtete Wetterstrom ist als Abgrenzung ausreichend. Der beschriebene Wetterzug wird vom übertägig, am Schacht 2 installierten Hauptgrubenlüfter erzeugt. Abb. 3.18 verdeutlicht das beschriebene prinzipielle Wetterungskonzept und die Strömungsrichtungen im Grubengebäude für die Streckenlagerung (Variante B1) und Kammerlagerung (Variante A).

Die Durchführbarkeit der einsöhligen Bewetterung beruht, neben der nachzuweisenden technischen Machbarkeit, auf der Annahme, dass die einzulagernden Behälter gemäß den Anforderungen, die an sie gestellt werden, dicht sind und im Normalbetrieb sowie im Störfall keine Gase oder Aerosole abgeben /BMU 10/.

Um die Machbarkeit der einsöhligen Bewetterung unter den gegebenen Bedingungen nachzuweisen, erfolgt die Simulation des Wetternetzes des Endlagerbergwerkes mit Hilfe der Planungssoftware NetzCAD (siehe Anhang A). Die Varianten Streckenlagerung (B1 und B2) und Bohrlochlagerung (C) werden jeweils in Kombination mit der Variante A (Einlagerung von Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung) betrachtet.

Die für die Modellbetrachtungen gewählten klimatischen Bedingungen an der Tagesoberfläche entsprechen den Bedingungen am Standort Gorleben und der näheren Umgebung. Der Wetterbedarf des Endlagerbergwerkes ergibt sich aus den Wettermengen, die benötigt werden, um alle im Grubengebäude vorhandenen Verbraucher ausreichend zu versorgen. Für den Infrastrukturbereich wird ein maximaler Wetterbedarf von 10.000 m<sup>3</sup>/min ermittelt. Der Wetterbedarf des Infrastrukturbereiches resultiert

aus den Verbrauchern in den einzelnen Werkstätten, Lagern und sonstigen Grubenbauen und wurde bereits in früheren Planungen bestimmt /DBE 98/.

Der Wetterbedarf innerhalb der Einlagerungsfelder der Streckenlagerung gibt sich aus der Art und der Anzahl der aktiven Betriebspunkte. Die benötigten Wettermengen der wesentlichen Arbeitsprozesse sind in Tab. 3.5 zusammengestellt.

**Tab. 3.5** Arbeitspunkte und Wetterbedarf der Variante B1

<b>Arbeitspunkt</b>	<b>Wetterbedarf [m³/min]</b>	<b>Verbraucher</b>
Vortrieb	1.200	Belegschaft, Teilschnittmaschine, Fahrlader, Entstaubungsanlage
Gleisbau	800	Belegschaft, Fräse, Fahrlader, Transportfahrzeug
Einlagerung	800	Belegschaft, Einlagerungsmaschine
Versatz	600	Belegschaft, gleisgebundenes Versatzfahrzeug, Entstaubungsanlage

Zusätzlich zu diesen Arbeiten sind Wetter für Nebenarbeiten nötig. Zu den Nebenarbeiten zählen zum Beispiel Anker- und Beraubarbeiten oder auch der Fahrbahnbau. Da diese Tätigkeiten nicht ständig stattfinden, können sie zu einem Verbraucher mit einem Wetterstrom von 600 m³/min zusammengefasst werden. Beim Einsatz jeweils eines Betriebspunktes im Einlagerungsbereich der Variante B1 ergibt sich ein Wetterbedarf von 2.600 m³/min im Überwachungsbereich und 2.000 m³/min im Kontrollbereich. Grundsätzlich wird zur Optimierung der Wetterqualität eine zeitliche Trennung der Tätigkeiten in ÜB und KB angestrebt. Mit dieser Maßnahme wird verhindert, dass Verbraucher im KB mit bereits abgasbelasteten Wettern des ÜB konfrontiert werden.

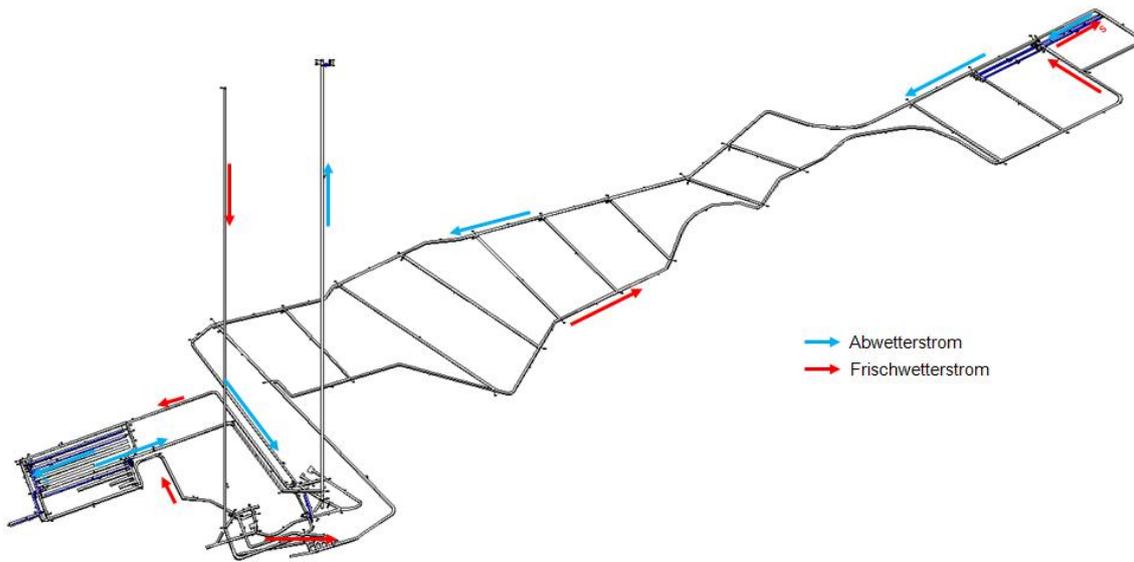
### **Einbindung der Variante A in die Streckenlagerungsvariante**

Bei der optional betrachteten Einlagerung von Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung im Einlagerungsbereich der Variante A wurde eine Einlagerung der Endlagerbehälter mit Hilfe dieselbetriebener Stapelfahrzeuge angenommen. Die wesentlichen Verbraucher sind in Tab. 3.6 aufgeführt.

**Tab. 3.6** Arbeitspunkte und Wetterbedarf der optionalen Variante A

<b>Arbeitspunkt</b>	<b>Wetterbedarf [m<sup>3</sup>/min]</b>	<b>Verbraucher</b>
Vortrieb	1.200	Belegschaft, Teilschnittmaschine, Fahrlader, Entstaubungsanlage
Gleisbau	800	Belegschaft, Fräse, Fahrlader, Transportfahrzeug
Einlagerung	800	Belegschaft, Einlagerungsmaschine
Versatz	600	Belegschaft, gleisgebundenes Versatzfahrzeug, Entstaubungsanlage

Zur Versorgung der Betriebspunkte im Grubenteil der Variante A wird ein Mindestvolumenstrom von 3.000 m<sup>3</sup>/min berücksichtigt. Die Bewetterung des Grubenteils der Variante A unterscheidet sich von dem bisher beschriebenen Konzept. Die einzulagernden Behälter der optionalen Variante A entsprechen nach /BOL 11/ im Wesentlichen Behältertypen, die für das Endlager Konrad vorgesehen sind (z. B. Konrad-Container Typ IV und VI). Bei diesen Behältern kann eine Freisetzung von Aerosolen und Gasen nicht ausgeschlossen werden. Unter der Anforderung, eine mögliche Belastung für die Belegschaft so gering wie möglich zu halten, muss das einschlägige Bewetterungskonzept an die Bedingungen in diesem Grubenteil angepasst werden. Aus diesem Grund wird der Einlagerungsbereich der Variante A mit einem Drei-Strecken-System erschlossen. Durch das gegenüber /BOL 11/ veränderte Mengengerüst verringert sich die Anzahl der Einlagerungsstrecken in den Einlagerungsfeldern West 1 und 2. Als zusätzliche Optimierungsmaßnahme wurde die Streckenführung im Westflügel an die veränderten Rahmenbedingungen angepasst. Dieses optimierte Grubengebäude wurde beim Modell zur Wetterberechnung zugrunde gelegt (siehe Abb. 3.18).



**Abb. 3.18** Modell des Grubengebäudes für die Streckenlagerung (Variante B1) und die Kammerlagerung (Variante A) mit Wetterströmen

In diesem Grubengebäude führen die nördliche und die südliche Richtstrecke des Westflügels die frischen Wetter zu den Einlagerungsfeldern. Die nördliche Richtstrecke schließt, wie bereits in /BOL 11/ beschrieben, an die Verbindungsstrecke zwischen Infrastrukturbereich und nördlicher Richtstrecke des Ostflügels an. Die Frischwetterversorgung dieser Richtstrecke des Westflügels wird über eine Luttenleitung vom Infrastrukturbereich aus realisiert. In den einzelnen Einlagerungsstrecken werden die verbrauchten Wetter aus dem hinteren Teil der Strecken abgezogen und über eine saugende Luttenleitung zu einer Abwetterstrecke geführt (siehe Abb. 3.18), die planarisch zwischen den Einlagerungsfeldern West 1 und West 2 angelegt wurde und über die Querschläge der Einlagerungsfelder West 1 und West 3 an das Grubengebäude angebunden ist. Am Übergang des Querschlages West 2 wird ein Wetterkreuz errichtet. Hier werden die Abwetter am Querschlag West 2 vorbei geführt. Mit dieser Maßnahme kann eine strikte Trennung des Frisch- und Abwetterstromes und damit der Strahlenschutzbereiche erreicht werden. Die Luttenführung des Einlagerungsfeldes West 2 wird je nach Ausführung des Wetterkreuzes z. B. über eine Verbindungsbohrung zwischen beiden Strecken realisiert. Von den Einlagerungsfeldern für nichtwärmeeentwickelnde radioaktive Abfälle führt die Abwetterstrecke parallel zur nördlichen Richtstrecke zum Schacht 2. Der Anschluss der Strecke an den Schacht kann ober- oder unterhalb der Einlagerungssohle erfolgen. Die zu überwindende Höhendifferenz führt zu einer Steigung oder einem Gefälle der Strecke von rund 2°.

## Modellbetrachtungen

Während der Betriebszeit erfolgt die Einlagerung der wärmeentwickelnden Abfälle im Rückbau, beginnend vom östlichsten Einlagerungsfeld (Ost 1). Durch die wechselnden Betriebspunkte und das sich ständig verkleinernde Grubengebäude aufgrund verfüllter und abgeworfener Einlagerungsstrecken und -felder ändern sich die wettertechnischen Bedingungen und Anforderungen während der gesamten Betriebszeit. Zur Beschreibung der verschiedenen Zustände des Endlagerbergwerkes wurden verschiedene Modelle konstruiert. Die Modelle bilden Referenzmodelle für die Bedingungen am Anfang der Betriebszeit (Modell Ost 1), in der Mitte (Modell Ost 5) und gegen Ende der Betriebszeit (Modell Ost 12). In allen Modellen ist die optionale Variante A mit berücksichtigt. Da der Grubenteil der Variante A deutlich kleiner ist, wurde hier auf eine schrittweise Reduzierung verzichtet und stattdessen jeweils der gesamte Grubenteil berücksichtigt.

In den Modellen erfolgten Untersuchungen zu verschiedenen Zuständen, die im laufenden Bergwerksbetrieb auftreten können. Der jeweilige Wetterbedarf des gesamten Endlagerbergwerkes ergibt sich aus der zeitgleichen Versorgung des Infrastrukturbereichs mit 10.000 m<sup>3</sup>/min sowie mehrerer aktiver Betriebspunkte in den Einlagerungsbereichen der Variante B1 und Variante A. Dazu wurde jeweils die Versorgung des ÜB simuliert, da hier die größten Wetterverbraucher zu erwarten sind. Die betrachteten Betriebszustände im Einlagerungsbereich der Variante B1 sind:

- Arbeiten in zwei aktiven Querschlägen (Wettermenge B1 4.600 m<sup>3</sup>/min)
- gleichzeitiger Einsatz von zwei Teilschnittmaschinen in zwei Querschlägen (Wettermenge B1 5.200 m<sup>3</sup>/min)
- Auswirkungen von hohen und tiefen Außentemperaturen (Sommer und Winter)

Die Wetterbewegung wird vom übertägig, am ausziehenden Schacht (Schacht 2) aufgestellten Hauptgrubenlüfter erzeugt (siehe Abb. 3.19). Als Hauptgrubenlüfter wurde gemäß dem Volumen- und Druckbedarf eine Kennlinie aus einem für axiale Grubenventilatoren typischen Kennfeld ausgewählt. Der benötigte Gesamtvolumenstrom zur Versorgung der Teilströme (Variante B1, A und Infrastrukturbereich) beträgt in allen Modellen rund 22.000 m<sup>3</sup>/min. Der über die Betriebszeit weitgehend konstante Volumenstrom begründet sich daraus, dass zwar das Grubengebäude stetig verkleinert wird, die Betriebsabläufe und somit die benötigten Wettermengen aber bestehen blei-

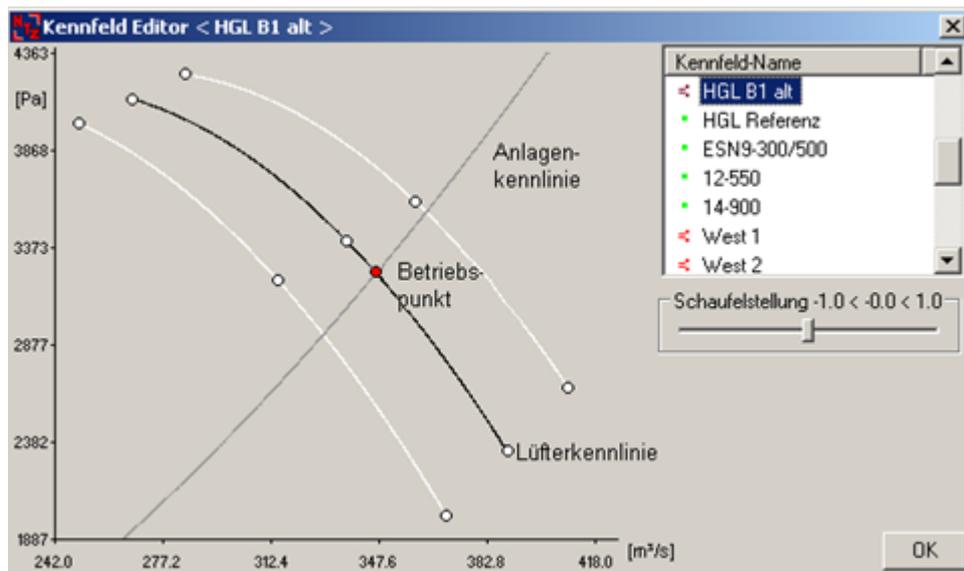
ben. Die Verkleinerung des Grubengebäudes führt zu einer Reduzierung des Druckbedarfes von rund 3.000 Pa (Ost1) auf rund 2.000 Pa (Ost12). Der genaue Druckbedarf ist abhängig vom Grubengebäude, dem zu bewegenden Volumenstrom und dessen Verteilung.

Die erstellten Modelle zeigen, dass unter den gewählten Parametern und Lüftern die einsöhlige Bewetterung des Endlagerbergwerkes in ausreichendem Maß realisiert werden kann (Tab. 3.7). Alle in den Modellen installierten Betriebspunkte können mit den geforderten Mengen an frischen Wettern versorgt werden. Die Modelle zeigen außerdem, dass auch größere Wettermengen innerhalb der Grubenteile beherrscht werden können. Die errechneten Mindestwettermengen sowie die Wettergeschwindigkeiten entsprechen den allgemeinen, bergbehördlichen Vorgaben /ABV 12/, /ABU 66/.

**Tab. 3.7** Vergleich wettertechnischer Sollwerte und berechneter Ist-Werte an unterschiedlichen Betriebspunkten

<b>Kennwert</b>	<b>Soll</b>	<b>Ist Ost 1</b>	<b>Ist Ost 5</b>	<b>Ist Ost 12</b>
Erzeugter Volumenstrom am Lüfter [m <sup>3</sup> /min]		22.000	22.000	23.000
Erzeugter Unterdruck am Lüfter [Pa]		3.100	2.700	2.000
Wettergeschwindigkeit Schacht 2 [m/s]		8,1	8,1	8,4
Wettergeschwindigkeit Richtstrecke Süd [m/s]	≤ 6	4,1	4,2	1,5
Volumenstrom Einlagerungsquerschlag [m <sup>3</sup> /min]	2.400	2.900	3.100	3.600
Wettergeschw. Einlagerungsquerschlag [m/s]	≤ 6	2,0	2,2	2,5
Volumenstrom Vortriebsstrecke [m <sup>3</sup> /min]	1.200	1.940	1.800	1.800
Wettergeschw. Vortriebsstrecke [m/s]	≤ 6	2,0	1,9	1,9

Die ermittelten Kenngrößen der Anlagen- und Lüfterkennlinien können für nachfolgende Planungen zur Auswahl konkreter Geräte und Anlagenteile herangezogen werden. Abb. 3.19 zeigt beispielhaft den Arbeitsbereich des verwendeten Grubenlüfters zur Erzeugung des Hauptwetterstromes. Im dargestellten Fall liegt die Lüfterleistung (ohne Berücksichtigung des Motorwirkungsgrades) bei rund 1,1 MW.



**Abb. 3.19** Beispiel Lüfter B1

Zur Steuerung der Wetter ist es nötig, die aufgefahrenen, aber noch nicht befüllten Querschläge mit Wettertüren oder -schleusen zu versehen. Diese Wetterbauwerke ermöglichen einen Übergang vom ÜB in den KB und im Notfall auch umgekehrt. Gleichzeitig ist eine Regulierung der Wetterströme möglich. Mit Hilfe der eingebauten Schieber/Drosseln lassen sich so beispielsweise die für Nebenarbeiten nötigen Wetterströme einstellen.

Nichtdurchschlägige Grubenbaue, in denen Arbeiten stattfinden, sind mit Hilfe von Wetterleiteinrichtungen mit einer ausreichenden Wettermenge zu versorgen. Die Sonderbewetterungsanlagen bestehen aus einem Axiallüfter und einem Luttenstrang entsprechenden Durchmessers. In den Modellen benötigen jeweils die Betriebspunkte in den Einlagerungsstrecken und die Versatzorte in den Richtstrecken und Querschlägen der bereits eingelagerten Felder Sonderbewetterungsanlagen.

Im östlichen Grubenteil der Streckenlagerung wurden die Sonderbewetterungen in blasierender Betriebsweise ausgelegt. Eine Ausnahme bilden Entstaubungsanlagen in den Vortriebs- und Versatzstrecken. Diese Anlagen arbeiten in saugender Betriebsweise. Die Planungswerkzeuge des Programms NetzCAD zeigen, dass alle zu erwartenden Sonderbewetterungslängen durch entsprechende Lüfter/Lutten-Kombinationen beherrscht und die jeweiligen Strecken mit ausreichenden Wettermengen versorgt werden können. Die gewählten Lutten Durchmesser sind 1,0 m (Einlagerung, Gleisbau) und 1,2 m (Vortrieb). Für die einzelnen Einlagerungsstrecken wurde immer die größtmögliche Länge, entsprechend der Endlagerauslegung von maximal 250 m, angenommen.

Leckagen, Biegungen und Reibungsfaktoren der Lutteneleitungen wurden mit berücksichtigt.

Für die Grubenteile der optionalen Variante A wurden die Sonderbewetterungsanlagen in saugender Betriebsweise konzipiert. Der gewählte Luttendurchmesser beträgt 1,2 m. Es entstehen Luttenstränge bis 500 m Länge. Auch hier zeigen die durchgeführten Berechnungen und die Planungswerkzeuge der Software, dass eine ausreichende Versorgung möglich ist.

Nach Klimabergverordnung wird die Arbeitszeit untertage im Salzbergbau ab einer Trockentemperatur der Wetter, d. h. einer am trockenen Thermometer gemessenen Lufttemperatur, von 46 °C auf 6,5 h beschränkt. Ab einer Trockentemperatur von 52 °C besteht ein Beschäftigungsverbot /KBV 83/.

Während des Durchströmens des Grubengebäudes erwärmt sich der Wetterstrom. Die höchsten natürlich auftretenden Temperaturen sind in schachtfernen und wenig bewetterten Grubenbauen zu erwarten. Die Wetter würden sich damit bis auf die Gebirgstemperatur von rund 38 °C erwärmen. Der Wärmeeintrag der Maschinen führt darüber hinaus zu einer weiteren Erhöhung der Temperatur und ggf. zu einer Grenzwertüberschreitung. Die Begrenzung der Arbeitszeit aufgrund der Temperaturen wurde bereits bei der Betrachtung der Betriebsabläufe eingeplant. Eine Überschreitung der Maximaltemperatur muss aber auf jeden Fall vermieden werden.

Grundsätzlich ist – technologiebedingt – in den sonderbewetterten Einlagerungsstrecken, vor allem im Streckenvortrieb, mit Temperaturen im Bereich der oberen Grenzwerte (zwischen 46 °C und 52 °C) zu rechnen. Eine Beeinflussung der Temperatur durch eine Veränderung (Steigerung) der Wetterströme ist möglich. Zusätzliche Maßnahmen zur Wetterkühlung können zum Beispiel Streckenkühler darstellen. Zum Schutz der Belegschaft ist es außerdem möglich, klimatisierte Fahrzeugkabinen zu installieren. Beispiele für diese und andere Kühlmaßnahmen finden sich im konventionellen Steinkohle-, Kali- und Steinsalzbergbau.

### 3.3.2.5 Verfüll- und Verschlussmaßnahmen

#### Zielsetzung und Sicherheitskonzept

Grundlage des Verfüll- und Verschlusskonzeptes ist das Sicherheitskonzept, das im Rahmen der Erarbeitung des Sicherheits- und Nachweiskonzeptes /MÖN 12/ entwickelt wurde. Dort ist als übergeordnetes Ziel formuliert, dass mit dem Sicherheitskonzept die in den Sicherheitsforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder Abfälle /BMU 10/ definierten Schutzziele erreicht und die Sicherheitsprinzipien eingehalten werden. In den nachfolgenden Kapiteln werden die für das Verfüll- und Verschlusskonzept relevanten Ziele für die Betriebsphase und die Phase nach der Stilllegung nochmals zusammengestellt, auch wenn sie so in /BOL 11/ bereits hergeleitet und die technischen Maßnahmen zur Umsetzung des Sicherheitskonzeptes beschrieben wurden.

Die für das Verfüll- und Verschlusskonzept maßgeblichen Sicherheitsprinzipien lauten:

- Die radioaktiven und sonstigen Schadstoffe in den Abfällen müssen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich (ewG) konzentriert und eingeschlossen werden und damit möglichst lange von der Biosphäre ferngehalten werden (Sicherheitsprinzip 4.1).
- Die Endlagerung muss sicherstellen, dass Freisetzungen radioaktiver Stoffe aus dem Endlager langfristig die aus der natürlichen Strahlenexposition resultierenden Risiken nur sehr wenig erhöhen (Sicherheitsprinzip 4.2).
- Das Endlager ist so zu errichten und zu betreiben, dass für den zuverlässigen langfristigen Einschluss der radioaktiven Abfälle im ewG in der Nachbetriebsphase keine Eingriffe oder Wartungsarbeiten erforderlich werden (Sicherheitsprinzip 4.6).

Aus diesen Sicherheitsprinzipien wurden für die Betriebsphase konkrete Zielsetzungen abgeleitet, von denen für das Verfüll- und Verschlusskonzept folgende relevant sind:

- Nach Einlagerung werden die Einlagerungsorte durch Maßnahmen wie Versatz, Streckenabmauerung oder auch Verschlüsse derart abgeschirmt, dass aus radiologischen Gesichtspunkten in den verbleibenden Grubenbauen ein uneingeschränkter Betrieb möglich ist.
- Die Einlagerung der Abfälle hat im Rückbau zu erfolgen, d. h. das vom Schacht entfernteste Einlagerungsfeld ist zuerst mit Endlagerbehältern zu belegen und der verbleibende Hohlraum mit Salzgrus zu versetzen.

Für die Phase nach der Stilllegung des Endlagers werden ebenfalls konkrete Zielsetzungen aus den Sicherheitsprinzipien abgeleitet. Relevant für das Verfüll- und Verschlusskonzept sind Folgende:

- schnelles Umschließen der eingelagerten Abfälle mit Steinsalzversatz
- bei den als weniger wahrscheinlich eingestuften möglichen Entwicklungen des Endlager-Systems soll es allenfalls zu Zutritt von geringen Lösungsmengen zu den Abfällen kommen
- Begrenzung der Gasdruckaufbaurrate in den verfüllten Grubenbauen des Endlagerbauwerks, so dass kein singulärer Frac mit großer Reichweite über den ewG hinaus im intakten Salzgestein entsteht
- Behinderung und Verzögerung des Transports von Schadstoffen aus dem ewG für den Fall, dass es zu einer Mobilisierung von Schadstoffen kommt

Die während der Erstellung des Endlagerbergwerkes aufgefahrenen Zugangs- und Richtstrecken sowie die beiden Tagesschächte stellen eine Durchörterung der geologischen Barriere dar. Im Sicherheitskonzept, dessen Leitgedanke neben der sicheren Betriebsführung des Endlagerbergwerkes der sichere Einschluss der radioaktiven Abfälle ist, wird deshalb eine schnelle und wirksame Abdichtung dieser Strecken und Schächte gefordert, um langfristig die Integrität der geologischen Barriere wieder herzustellen.

Für die Variante B1 (Streckenlagerung) ist dazu folgendes Sicherheitskonzept vorgesehen:

- Die Einlagerung der Endlagerbehälter beginnt am vom Schacht entferntesten Punkt im Einlagerungsfeld Ost 1.
- Direkt nach der Einlagerung eines Endlagerbehälters wird der verbleibende Streckenraum um den Behälter mit trockenem Versatzmaterial verfüllt.
- Richtstrecken werden mit leicht angefeuchtetem Versatz verfüllt (ca. 0,6 Gew-%).
- Die Zugangsstrecken in Schachtnähe werden mit Streckenverschlüssen abgedichtet.
- Die Tagesschächte werden mit Schachtverschlüssen abgedichtet.

Diese Maßnahmen werden grundsätzlich auch für die Variante C (Bohrlochlagerung) und B2 (Differenzbetrachtung zur Einlagerung von Transport- und Lagerbehälter) angewendet.

Die Beschreibung dieser Maßnahmen erfolgt zunächst für die Variante B1 (Streckenlagerung) inkl. der für alle Varianten optional zu berücksichtigenden Einlagerung von radioaktiven Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung (Variante A). Abweichungen davon oder ergänzende Maßnahmen im Verfüll- und Verschlusskonzept für die Variante B2 (Transport- und Lagerbehälter) und die Variante C (Bohrlochlagerung) werden in den folgenden Kapiteln aufgeführt.

Die Umsetzung des Sicherheitskonzeptes für Variante B1 beginnt in der Betriebsphase mit dem Verfüllen von nicht mehr genutzten Grubenbauen mit Salzgrus. Das betrifft Strecken, die mit Endlagerbehältern befüllt sind, oder Strecken und Grubenbaue, die für den weiteren Betrieb des Endlagers nicht mehr benötigt werden und im Hinblick auf ihre Funktion zur langfristigen Isolation der radioaktiven Abfälle entsprechend zu verfüllen sind.

### **Verfüll- und Verschlussmaßnahmen für Variante B1**

Die Einlagerungssohle des Endlagerbergwerks in 870 m Teufe ist in zwei Flügel aufgeteilt. Im Nordosten werden die wärmeentwickelnden radioaktiven Abfälle in horizontalen Strecken eingelagert, im Südwesten die Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung in Kammern.

Es ist vorgesehen, dass grundsätzlich die offenen Hohlräume des Endlagerbauwerkes sukzessive, nachdem sie nicht mehr genutzt werden (z. B. Transportstrecken) oder nachdem die Endlagerbehälter eingelagert worden sind (z. B. Einlagerungsstrecken), mit Versatzmaterial verfüllt werden. Als Versatzmaterial wurde Salzgrus ausgewählt – insbesondere, weil es die im Sicherheitsnachweiskonzept gestellten Anforderungen zu erfüllen vermag. Darüber hinaus ist es als arteigenes Material (gebrochenes Salz aus der Streckenauffahrung) in seiner stofflichen Zusammensetzung dem Wirtsgestein gleich, steht in ausreichender Menge ohne weitere Aufarbeitung im Endlagerbergwerk zur Verfügung und kann mit erprobten Verfahren in die Grubenbaue eingebaut werden. Eine Ausnahme bildet der Infrastrukturbereich. Hier ist langzeitstabiles Material mit definiertem Porenraum (Schotter) vorgesehen.

Die funktionalen Anforderungen an Versatzmaterial, so wie diese in /MÖN 12/ und /POP 12/ hergeleitet und beschrieben wurden, können vom Salzgrus erfüllt werden:

- mechanisch die natürliche geologische Barriere stabilisieren
- die Zerfallswärme von den wärmeentwickelnden Abfällen in das Wirtsgestein ableiten
- das Hohlraumvolumen in Grubenräumen reduzieren
- eine hohe Anfangsdichte haben und firstbündig einbaubar sein
- langfristig eine Dichtfunktion wie das Wirtsgestein übernehmen

Damit lassen sich auch die vorgenannten Zielsetzungen des Sicherheitskonzeptes für die Betriebsphase und die Phase nach der Stilllegung erreichen.

Als technisches Konzept der Verfüllung der Grubenbaue ist vorgesehen, dass nach der jeweiligen Einlagerung eines POLLUX<sup>®</sup>-Behälters trockener Salzgrus als Versatzmaterial in die Einlagerungsstrecke eingebracht wird. Das geschieht in Übereinstimmung mit der Zielsetzung, im Rückbau einzulagern, d. h. am entferntesten Punkt vom Schacht mit der Einlagerung zu beginnen. Für die hier betrachtete Variante B1 (Streckenlagerung) bedeutet das, dass der Hohlraum zwischen POLLUX<sup>®</sup>-Behälter und Streckenkontur mit trockenem Salzgrus verfüllt wird. Die Einlagerung von POLLUX<sup>®</sup>-Behältern und das Versetzen mit Salzgrus erfolgt abwechselnd in zwei benachbarten Strecken. Sobald der erste POLLUX<sup>®</sup>-Behälter im Einlagerungsfeld Ost 1 in der ersten Einlagerungsstrecke abgelegt und danach die Einlagerungsmaschine in die benachbarte Strecke umgesetzt wurde, wird Salzgrus eingebracht. Nach jeder weiteren POLLUX<sup>®</sup>-Einlagerung wird in gleicher Weise verfahren, bis die Einlagerungsstrecken vollständig belegt und mit Versatzmaterial verfüllt sind. Danach wird das nächste Streckenpaar in Betrieb genommen. Durch das Versatzmaterial Salzgrus wird der unmittelbar nach der Einlagerung verbleibende Hohlraum reduziert. Mit auflaufendem Gebirge entwickelt sich durch die Konvergenz des Salzgesteins im Versatz ein Gegendruck, der zur Stabilisierung des Gesamtendlagersystems beiträgt. Durch die Verwendung ausschließlich trockenen Versatzmaterials in den Einlagerungsfeldern (die initiale Salzfeuchte liegt in einer Größenordnung von ca. 0,02 Gew.-%), wird die Korrosion der POLLUX<sup>®</sup>-Behälter soweit wie möglich reduziert. Die Querschläge werden, nachdem alle Strecken eines Einlagerungsfeldes gefüllt und mit Salzgrus versetzt wurden, ebenfalls vollständig mit trockenem Versatz verfüllt.

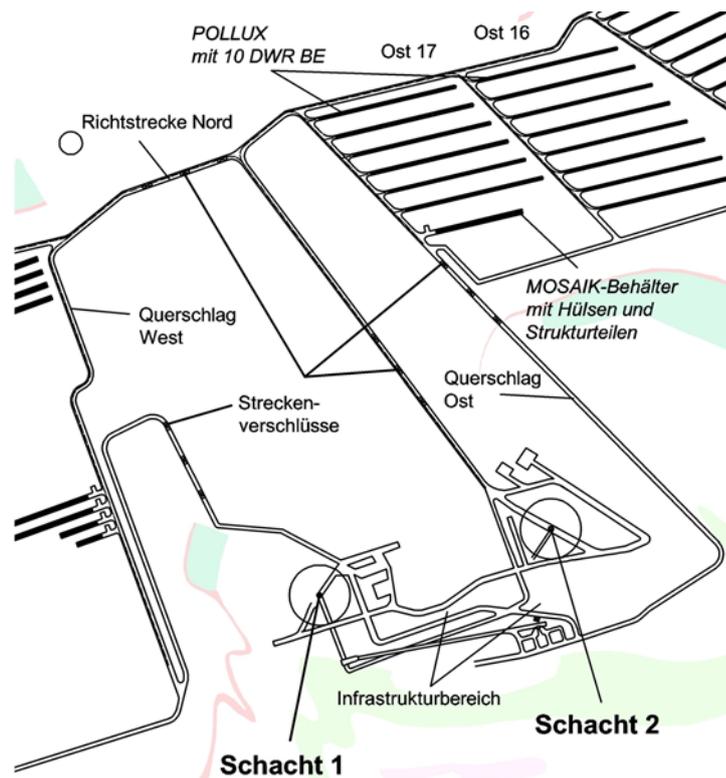
Zur Beschleunigung der Kompaktion des Versatzkörpers ist vorgesehen, dem Salzgrus für die Richt- und Transportstrecken eine geringe Menge Lösung beizugeben (maximal 0,6 Gew.-%  $MgCl_2$ -gesättigte Lösung). An der Grenze zwischen angefeuchtetem Salzgrus und trockenem Salzgrus wird das jeweilige Ende der Querschläge in Richtung nördlicher und südlicher Richtstrecke durch einen ca. 10 m langen Pfropfen aus Sorel-beton A1 /BOL 11/ verschlossen. Sorel-beton hat sich in Untersuchungen als langzeitbeständig gegenüber salinaren Lösungen erwiesen und entfaltet eine zusätzliche Dichtwirkung, die unmittelbar da ist.

Als Einbringtechnik für das Salzgrusmaterial, das aus dem aufgefahrenen Haufwerk durch Absieben von Körnungen > 65 mm genommen wird, kommen sowohl Schleuder- als auch Blasversatztechnik in Betracht. Im Rahmen eines FuE-Vorhabens wurden unter in situ Bedingungen beide Verfahren der Versatzeinbringung in eine POLLUX<sup>®</sup>-Einlagerungsstrecke verglichen /DBE 87/. Dabei wurde festgestellt, dass die damit erzeugte Versatzkörperrgüte (Dichte und Verteilung der Dichte über Streckenhöhe) annähernd gleich war, ebenso die Staubentwicklung. Die Schleuderversatztechnik zeigte sich jedoch als beträchtlich flexiblere Methode. Mit einem Schleuderversatzfahrzeug konnte der Salzgrus gezielt neben oder auch oberhalb des POLLUX<sup>®</sup>-Behälters eingebracht werden. Deshalb wird für die Variante B1 die Schleuderversatztechnik gewählt. In größeren Kammern, wie sie für die Einlagerung von Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung vorgesehen sind (Variante A), könnte die Blasversatztechnik Vorteile haben. Hier muss nicht unmittelbar nach Einlagerung eines jeden Behälters Versatz eingebracht werden. Ein abschnittsweises Verfüllen ist technisch sinnvoller. Mit entsprechend positionierten, vormontierten Blasleitungen werden auch die Hohlräume zwischen der Kammerfirste und den Containern versetzt. Deshalb wird hierfür die Blasversatztechnik vorgeschlagen. Im Rahmen von weiterführenden Planungen im Anschluss an das Vorhaben VSG können Betrachtungen zu optimierten Verfahren und Techniken angestellt werden.

Um die für die Phase nach Stilllegung des Endlagers gestellten Ziele des Sicherheitskonzeptes zu erreichen, sind geotechnische Barrieren (Strecken- und Schachtverschlüsse) an ausgewählten Punkten im Endlagerbergwerk vorgesehen. Die beiden Tagesschächte Gorleben 1 und 2 werden mit langzeitstabilen Materialien verfüllt und mit einem gestaffelten System von Trag- und Abdichtelementen gebaut. Die Konzeption, Auslegung und Nachweisführung dafür erfolgt im Rahmen der Arbeiten im AP 9 /MÜL 12/.

Darüber hinaus werden als weitere geotechnische Barrieren sowohl auf der Erkundungssohle (840 m Teufe) als auch im Einlagerungshorizont (870 m Teufe) Streckenverschlüsse in den Zugangsstrecken zu den Schächten vorgesehen. Auf der Erkundungssohle sind dies der Querschlag West 1 und Ost 1, auf der Einlagerungsstrecke die Bergbautransportstrecken (Ost und West) sowie die Gebindetransportstrecke (Querschlag Mitte). Die Position der Streckenverschlüsse ist im älteren Steinsalz in möglichst kurzer Distanz zu den Schächten vorgesehen, jedoch mit hinreichendem Abstand der entsprechenden Abdichtelemente zu möglichen Störzonen (z. B. Anhydrit, Kaliflöz). In Abb. 3.20 sind die ausgewählten Positionen der Streckenverschlüsse für den Einlagerungshorizont (870 m Teufe) dargestellt.

Aufgrund der Forderung, dass die optional mit zu berücksichtigenden Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung (Variante A) aus Gründen der Langzeitsicherheit vollständig von den wärmeentwickelnden Abfällen getrennt werden sollen, ist ein zusätzlicher Streckenverschluss in der nördlichen Verbindungsstrecke zwischen dem West- und dem Ostflügel des Endlagerbergwerks vorgesehen. Die Streckenverschlüsse bestehen aus einer Kombination von Dichtelementen und statischen Widerlagern, die die Lagestabilität der Dichtelemente sichern sollen. Die Konzeption, Auslegung und Nachweisführung für die Streckenverschlüsse erfolgt ebenfalls im Rahmen der Arbeiten im AP 9 /MÜL 12/.



**Abb. 3.20** Position Streckenverschlüsse auf der 870 m-Sohle

Als wenig wahrscheinlich eingeschätzte Endlagerentwicklungen in der Nachbetriebsphase ist ein partieller Ausfall der Dichtfunktion der Schachtverschlüsse nicht auszuschließen. Damit könnten in einem solchen Fall gesättigte Lösungen über den Infrastrukturbereich bis zum Einlagerungshorizont vordringen. Diese Lösungen sollen an einem Vordringen zu den Streckenverschlüssen gehindert werden. Deshalb ist vorgesehen, den Infrastrukturbereich in der Nähe der beiden Schächte 1 und 2 als mögliche Speicher für zutretende Lösungen einzurichten. Diese Grubenbaue werden deshalb – abweichend vom grundsätzlichen Prinzip des Verfüllens mit Salzgrus – mit langzeitstabilem Material (Serpentinit- oder Basaltschotter) verfüllt, so dass ein definierter Porenraum dauerhaft offen bleibt und als Pufferspeicher dienen kann. Die Standsicherheit des Bergwerkes wird dadurch nicht beeinträchtigt. Zum Infrastrukturbereich gehören alle größeren Grubenbaue in Schachtnähe, die während der Erkundung und des Endlagerbetriebs als Werkstätten, Lagerräume, Umschlagseinrichtungen (am Füllort), als Versatzbunker oder ähnliches genutzt wurden.

In der Tab. 3.8 sind für die zu verfüllenden Grubenbaue und für die Verschlussbauwerke vorläufig vorgesehene Materialien aufgeführt. Für Detailangaben zu den Materialien wird zum Teil auf weitere Literatur in /MÜL 12/ verwiesen. Die Mengenermittlung für

die zu verfüllenden Hohlraumvolumina des Grubengebäudes sind für die Variante B1 (Streckenlagerung) und Variante C (Bohrlochlagerung) im Detail ermittelt worden. Bei der Variante B1 sind im Einlagerungshorizont des Ostflügels des Endlagerbergwerkes inkl. der Querschläge rund 585.000 m<sup>3</sup> Streckenhohlraum mit trockenem Salzgrus und rund 210.000 m<sup>3</sup> Hohlraum in den Richtstrecken mit angefeuchtetem Versatz zu versetzen. Für den Westflügel (Variante A) beträgt das mit trockenem Salzgrus zu versetzende Hohlraumvolumen rund 120.000 m<sup>3</sup>. Hinzu kommen rund 36.000 m<sup>3</sup> feuchter Salzgrusversatz zum Verfüllen der Richtstrecken im Westflügel. Während des Einlagebetriebes werden stetig neue Hohlräume aufgefahren.

Das gelöste Haufwerk kann nach dem Einstellen der geforderten Kornverteilung für den Versatzprozess genutzt werden. Zur Homogenisierung, Dosierung und Pufferung der Massenströme wird im Infrastrukturbereich der Einlagerungssohle, nahe dem Schacht 1, ein Bunker mit einer Kapazität von 10.000 m<sup>3</sup> errichtet. Vom Bunker aus kann überschüssiges Haufwerk nach über Tage gefördert werden. Gleichzeitig können die benötigten Versatzmengen bedarfsgerecht abgerufen werden. Aufgrund des Erfordernisses, auf der Einlagerungssohle Infrastrukturräume sowohl für den Überwachungsbereich als auch für den Kontrollbereich vorzusehen (Vermeidung zusätzlicher Verbindungsfahrwege zwischen Erkundungs- und Einlagerungssohle), sind dafür 2 x 110.000 m<sup>3</sup> Hohlraum geplant. Die Verfüllung der Infrastrukturräume und des Bunkers (230.000 m<sup>3</sup>) erfolgt mit Schotter.

Die Erkundungssohle umfasst nach vorläufiger Abschätzung der Streckenführung (Richtstrecken und Querschläge) und unter Berücksichtigung bereits bestehender Infrastrukturräume (ca. 110.000 m<sup>3</sup>) ein Hohlraumvolumen von insgesamt rund 600.000 m<sup>3</sup>. Es wird angenommen, dass die Verfüllung aller Hohlräume außer Infrastrukturbereich mit feuchtem Versatz erfolgt. Der Infrastrukturbereich wird wie in der Einlagerungssohle mit Schotter verfüllt, um Speicherraum für potenzielle Lösungszutritte zu schaffen. Die Technik und die Betriebsabläufe für den Streckenversatz sind in /BOL 11/ beschrieben.

Tab. 3.8 Versatz- und Verfüllbaustoffe

Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben AP 6: Endlagerkonzept - Variante B1 Streckenlagerung			
Versatz- und Verfüllbaustoffe			
Ort	Versatzmaterial	Verschlussmaterial	Materialkennndaten
Einlagerungsfelder Ost 1 - Ost 12	Salzgrus, trocken	/.	• Körnung: bis 64mm
Einlagerungsfelder West 1 - West 3	Salzgrus, trocken	/.	• Anfangsporosität: <35%
Querschläge	Salzgrus, trocken	ca. 10m <b>Verschlussprofilen</b> aus <b>Sorelbeton A1</b> vor Übergang zur Richtstrecke	(s. Materialspezifikation AP 9.1.2)
Schächte	/.	<p>Verfüllung von oben nach unten betrachtet:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Filter/Aufsättigungsschicht: Sand/Kies/Basaltspilt</li> <li>- 1. Dichtelemen: Bentonit</li> <li>- Filterschicht: Sand/Kies/Basaltspilt</li> <li>- Widerlager: Salzbeton</li> <li>- Speicher: Basaltshotter</li> <li>- Langzeitdichtung: feuchter Salzgrus</li> <li>- Opferschicht: Salzbeton</li> <li>- fiktives Widerlager: Salzbeton</li> <li>- 2. Dichtelemen: Salzbeton</li> <li>- fiktives Widerlager: Salzbeton</li> <li>- Widerlager/Speicher: Basalt-/Serpentinitschotter, techn. Bischoffit</li> <li>- 3. Dichtelemen: Sorelbeton</li> <li>- Widerlager: Sorelbeton</li> </ul>	s. Materialspezifikation AP 9.1.2
Richtstrecke Nord	Salzgrus, angefeuchtet (0.5 bis 1,0% (Gew. %))	/.	s. a. GRS-Protokoll zur Bepr. (2.11.2010) über Porositäts- und Permeabilitätsbeziehungen
Richtstrecke Süd	Salzgrus, angefeuchtet (0,5 bis 1,0% (Gew. %))	/.	s. a. GRS-Protokoll zur Bepr. (2.11.2010) über Porositäts- und Permeabilitätsbeziehungen
Bergbautransportstrecke (Querschlag Ost)	Salzgrus, angefeuchtet (0.5 bis 1,0% (Gew. %))	Streckenverschluss mit Kerndichtung und Widerlagern aus Sorelbeton A1	s. Materialspezifikation AP 9.1.2
Gebietstransportstrecke (Querschlag Mitte)	Salzgrus, angefeuchtet (0.5 bis 1,0% (Gew. %))	Streckenverschluss mit Kerndichtung und Widerlagern aus Sorelbeton A1	s. Materialspezifikation AP 9.1.2
Bergbautransportstrecke (Querschlag parallel zu Querschlag West)	Salzgrus, angefeuchtet (0.5 bis 1,0% (Gew. %))	Streckenverschluss mit Kerndichtung und Widerlagern aus Sorelbeton A1	s. Materialspezifikation AP 9.1.2
Infrastrukturbereich	Serpentinit - oder Basalt-Schotter vom Schachtfüllort bis zu den Streckenverschlüssen	/.	
Wetterbohrbocher	/.	Sorelbeton A1	s. Materialspezifikation AP 9.1.2

### **3.3.2.6 Rückholungskonzept**

In diesem Kapitel wird das Konzept zur Rückholung von Endlagerbehältern zu Variante B1, Streckenlagerung, skizziert. Neben regulatorischen Vorgaben und Annahmen werden u. a. die Aspekte der Beherrschung der klimatischen Bedingungen sowie der Zeitbedarf für eine Rückholung hergeleitet und beschrieben.

#### **3.3.2.6.1 Anforderungen, Annahmen und Randbedingungen zur Rückholung**

Für die Konzeption der Rückholung von Endlagerbehältern aus einer Streckenlagerung sind regulatorische Aspekte zu beachten sowie projektbezogene Annahmen und Randbedingungen zu formulieren. Im Wesentlichen werden hier jene Punkte benannt, die sich aus den Anforderungen gemäß Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle vom 30. September 2010 /BMU 10/ ergeben.

#### **Anforderungen gemäß Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle**

„Als Rückholbarkeit wird“ gemäß der Sicherheitsanforderungen des BMU „die geplante technische Möglichkeit zum Entfernen der eingelagerten radioaktiven Abfallbehälter aus dem Endlagerbergwerk bezeichnet“ /BMU 10/. Die Rückholung der Endlagerbehälter ist demnach bereits in der Konzeption und Planung des Endlagerbergwerkes zu berücksichtigen. Dies betrifft alle Verfahren und Techniken sowie die zur Einlagerung vorgesehenen Endlagerbehälter.

In Kapitel 1 der Sicherheitsanforderungen /BMU 10/ wird ausgeführt: „Soweit aus anderweitigen Erwägungen auch vernachlässigbar wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle in dieses Endlager eingelagert werden sollen, sind diese Sicherheitsanforderungen unter Einbeziehung dieser Abfälle mit Ausnahme der gemäß Abschnitt 8.6 für Abfallbehälter geltenden Anforderungen einzuhalten.“ Der ausgeschlossene Abschnitt 8.6 der Sicherheitsanforderungen bezieht sich auf die Rückholung und Bergung von Endlagerbehältern. Damit ist eine Rückholung oder Bergung von vernachlässigbar wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen nicht zu betrachten.

In Kapitel 8.2 der Sicherheitsanforderungen /BMU 10/ wird weiterhin gefordert, „die Durchörterung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs mit Schächten, Auffahrungen oder Bohrungen [...] zu minimieren. Bohrungen, Schächte und weitere Auffahrungen

gen sind gebirgsschonend auszuführen und, falls sie nicht mehr gebraucht werden, vor dem Einlagerungsbetrieb so zu verschließen, dass die Barriereeigenschaften des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs und sonstiger sicherheitsrelevanter Barrieren erhalten bleiben.“ Für die Errichtung des Endlagerbergwerkes bestimmt diese Forderung wesentlich die Planung des Grubengebäudes. Unter der Annahme, dass eine Entscheidung zur Rückholung alle Endlagerbehälter mit hochradioaktiven wärmeentwickelnden Abfällen betrifft, sind die in diesem Absatz genannten Anforderungen für das zu konzipierende Grubengebäude nicht zu berücksichtigen. Hintergrund ist, dass die Barriereeigenschaften des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs und sonstiger sicherheitsrelevanter Barrieren im Rückbaubetrieb nicht mehr erhalten bleiben müssen. Strecken und deren Querschnitte können für eine Rückholung optimiert geplant und aufgefahren werden. Eine Minimierung der Durchörterung ist nicht notwendig.

Als Anforderung an die Endlagerbehälter wird in /BMU 10/, Kapitel 8.6, formuliert, dass „unter Berücksichtigung der darin verpackten Abfallprodukte und des sie umgebenden Versatzes folgende Sicherheitsfunktion“ zu erfüllen ist: „In der Betriebsphase bis zum Verschluss der Schächte oder Rampen muss eine Rückholung der Abfallbehälter möglich sein.“ Die Entscheidung für eine Rückholung wird demnach in der Betriebsphase des Endlagerbergwerkes getroffen. Für die Betrachtungen zur Rückholbarkeit werden neben den genannten Schächten auch die über- und untertägigen Anlagen und Betriebsmittel als funktionsfähig angenommen.

„Maßnahmen, die zur Sicherstellung der Möglichkeiten zur Rückholung oder Bergung getroffen werden, dürfen die passiven Sicherheitsbarrieren und damit die Langzeitsicherheit nicht beeinträchtigen“ /BMU 10/. Die planmäßige Rückholung der Endlagerbehälter ist für ein Endlagerkonzept zu berücksichtigen – jedoch dürfen diese Planungen für eine Rückholung nicht das primäre Ziel der langzeitsicheren Endlagerung der Abfälle beeinträchtigen.

### **Projektbezogene Annahmen und Randbedingungen**

Neben den genannten Anforderungen, die sich aus den Anforderungen gemäß Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle /BMU 10/ ergeben, werden die folgenden Annahmen und Randbedingungen formuliert:

Für die VSG wird die Annahme getroffen, dass eine Rückholung nicht partiell erfolgt, sondern alle eingelagerten Endlagerbehälter mit hochradioaktiven wärmeentwickeln-

den Abfällen und ausgediente Brennelemente betrifft. Ein Weiterbetrieb nach Rückholung, d. h. die Einlagerung von Abfällen im selben Endlager, wird demnach nicht unterstellt. Die in /BMU 10/ formulierten Punkte der Minimierung der Hohlräume und des gebirgsschonenden Auffahrens der Hohlräume sind daher für eine Rückholung nicht zu berücksichtigen.

Für die wahrscheinlichen Entwicklungen des Endlagers wird unterstellt, dass die Behälter bei mechanischer Beanspruchung, durch z. B. Beaufschlagung mit Gebirgsdruck oder die spätere Handhabung bei der Rückholung, über den betrachteten Zeitraum formstabil bleiben und ihre mechanische Stabilität uneingeschränkt gewährleistet ist. Die Anschlagmittel der Behälter werden weiterhin als gebrauchstauglich unterstellt (siehe Kapitel 3.3.2.7, Bergung von Endlagerbehältern).

In Kapitel 8.6 der Sicherheitsanforderungen /BMU 10/ wird ausgeführt, dass „die Vermeidung von Freisetzungen radioaktiver Aerosole zu beachten“ ist. Für die Anforderungen an die Endlagerbehälter wird für die VSG formuliert, dass die Endlagerbehälter für die Betriebsphase aerosoldicht auszulegen sind. Weiterhin wird unterstellt, dass die Endlagerbehälter gegen weniger wahrscheinliche Entwicklungen des Endlagers nicht ausgelegt werden. Eine Freisetzung, z. B. aufgrund Spannungsrisskorrosion, ist durch die Endlagerbehälterauslegung auszuschließen.

Die Standzeit der Endlagerbehälter ist für eine etwaige Bergung auf rund 600 Jahre auszulegen. Diese Zeitspanne ergibt sich durch die Aufsummierung der maximalen Dauer der Betriebsphase des Endlagers sowie der Anforderung der Handhabbarkeit für 500 Jahre aus dem stillgelegten Endlager.

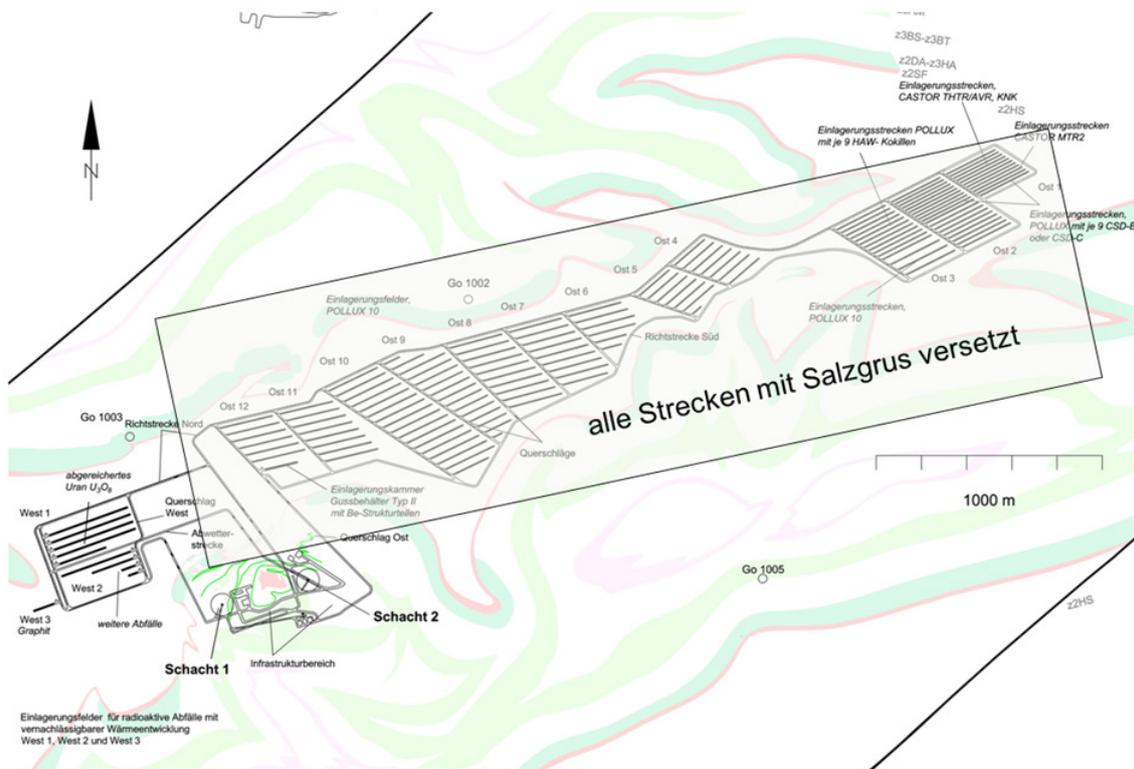
### **3.3.2.6.2 Rückholkonzept**

#### **Zeitpunkt der Rückholung**

Gemäß /BMU 10/ befindet sich das Endlager bei der Entscheidung über die Rückholung in der Betriebsphase. Als zwei eingrenzende Zeitpunkte während der Betriebsphase können definiert werden:

- Frühester Zeitpunkt der Rückholung: Ein Endlagerbehälter wurde eingelagert. Die Einlagerungsstrecken, Querschläge und Richtstrecken wurden nicht mit Salzgrus versetzt.

- Spätester Zeitpunkt: Alle planmäßig einzulagernden Endlagerbehälter wurden eingelagert. Die Einlagerungsstrecken, Querschläge und Richtstrecken wurden versetzt sowie die technischen Barrieren errichtet (siehe Abb. 3.21).



**Abb. 3.21** Wiederaufzufahrender Bereich des Grubengebäudes

Insofern wird für die weiteren Betrachtungen angenommen, dass der Infrastrukturbereich sowie die Schächte zu allen betrachteten Zeitpunkten im betriebsbereiten Zustand sind. Für sämtliche logistischen Einrichtungen für den innerbetrieblichen Transport über und unter Tage wird Betriebsbereitschaft unterstellt.

Um die beschriebenen Zeitpunkte und alle dazwischenliegenden Zeitpunkte in der Konzeption der Rückholung erfassen zu können, wird als abdeckender Fall für den weiteren Verlauf der spätestmögliche Betriebszeitpunkt betrachtet.

### Prozessschritte der Rückholung

Der konzeptionelle Ansatz beinhaltet, dass für die Rückholung der Endlagerbehälter eine weitestgehende Umkehrung des Einlagerungsprozesses zielführend ist. Weiterhin sollen wenn möglich Verfahren und Maschinen eingesetzt werden, die bereits zur Einlagerung Anwendung gefunden haben.

Die Prozessschritte der Rückholung können wie folgt benannt werden:

- Wiederauffahren von Richtstrecken und Querschlägen entsprechend eines vorgegebenen Arbeitsschemas (s. u.)
- Auffahren von durchschlägigen Rückholstrecken
- Kühlung der aufgefahrenen Rückholfelder
- Freilegen der Endlagerbehälter
- Ziehen der Endlagerbehälter auf eine Rückholstrecke
- Transport der Endlagerbehälter unter und über Tage

Die Richtstrecken und Querschläge werden gemäß dem Grubenplan des Endlagerbergwerkes aufgefahren, da hierfür keine oder nur geringe Erkundungsmaßnahmen wie z. B. Vorbohrungen notwendig sind. Der versetzte Salzgrus wird vollständig entfernt, um betriebssichere Strecken zu gewährleisten.

Sind die Richtstrecken und die Querschläge eines Einlagerungsfeldes aufgefahren, werden parallel zu den mit Salzgrus versetzten Einlagerungsstrecken entlang der abgelegten Endlagerbehälter durchschlägige Rückholstrecken aufgefahren. Dies ermöglicht die durchschlägige Bewetterung der Rückholstrecken.

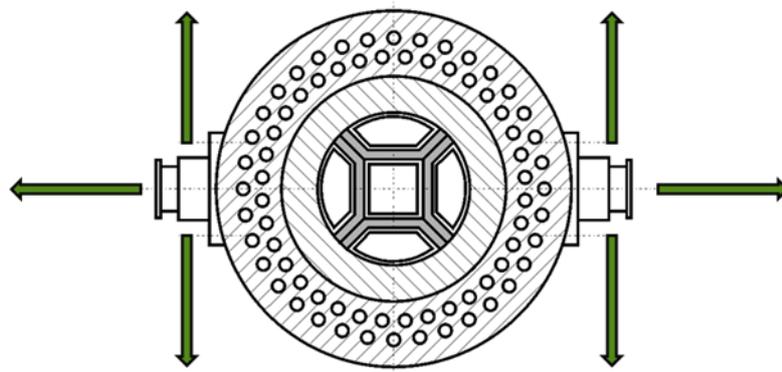
Nach der Auffahrung aller Rückholstrecken eines Feldes wird dem Gebirgskörper über eine definierte Zeit, z. B. ein Jahr, die Wärme entzogen, bevor mit der Freilegung der Endlagerbehälter begonnen wird.

In einem ersten Schritt erfolgt die Freilegung der Endlagerbehälter an einer Längsseite, den Stirnseiten und oberhalb durch eine Teilschnittmaschine.

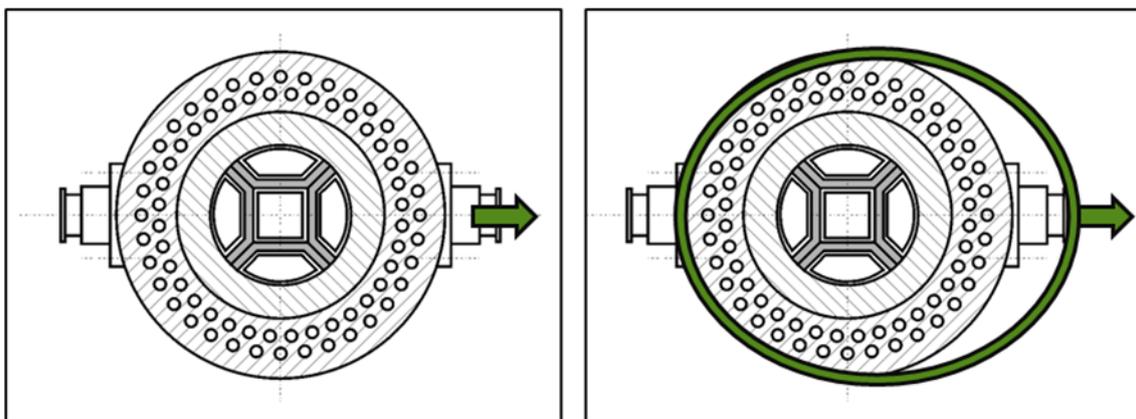
Um Störungen beim Freischneiden der Abfallbehälter im Bereich der Sohle der Strecke zu vermeiden, wurden die bei der Einlagerung der Endlagerbehälter verwendeten Schienen noch vor dem Einbringen des Versatzes wieder entfernt.

In einem weiteren Arbeitsschritt werden die Endlagerbehälter mittels eines Manipulators gereinigt. Dies kann mit Schlagkopf oder einer Bürste erfolgen /ENG 95/. Danach werden Anschlagmittel (z. B. Ziehstangen, Seile) installiert oder die Behälter mit einer Greif- oder Manipulationsvorrichtung gefasst.

Die Endlagerbehälter werden nach dem Freilegen auf die aufgefahrene Rückholstrecke gezogen. Hierzu wird die Sohle der Rückholstrecke plan vorbereitet und ggf. ein leichtes Gefälle zwischen der Auflageebene des Endlagerbehälters und der Sohle der Rückholstrecke geschnitten. Die Endlagerbehälter sind bezüglich der mechanischen Belastbarkeit derart auszulegen, dass ein Ziehen in axialer und radialer Richtung ermöglicht wird (siehe Abb. 3.22 und Abb. 3.23, links). Eine Alternative hierzu ist das Ziehen der Endlagerbehälter, indem über den Umfang des Behälters Anschlagmittel angebracht werden (siehe Abb. 3.23, rechts).



**Abb. 3.22** Beanspruchung der Anschlagpunkte in axialer und radialer Richtung



**Abb. 3.23** Ziehen der Endlagerbehälter mit Ziehstange (links) oder Seil (rechts) in die Rückholstrecke

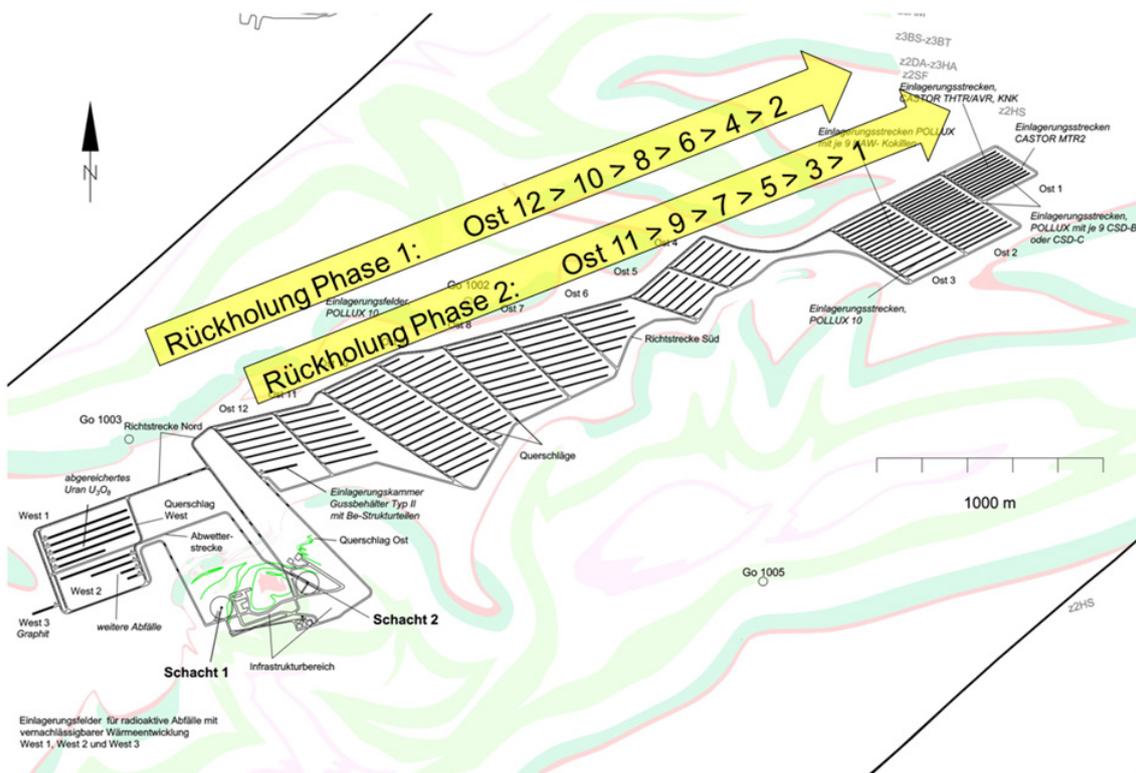
Kann ein Ziehen der Endlagerbehälter aus betrieblichen oder anderen Gründen nicht erfolgen, ist das Auffahren einer zweiten Strecke parallel zur Einlagerungsstrecke möglich, um die Endlagerbehälter von allen Seiten freizulegen. Diese Methodik wurde in /ENG 95/ für die Rückholung betrachtet und als durchführbar bewertet.

Die freigelegten und auf die Rückholstrecke gezogenen Endlagerbehälter können für den Transport unter Tage aufgenommen werden. Dies soll durch eine modifizierte Einlagerungsvorrichtung (= Rückholvorrichtung) erfolgen, welche nicht gleisgebunden agiert, sondern beispielsweise mit einem Raupenfahrwerk ausgerüstet ist.

Der untertägige Transport kann durchgängig mit der genannten Rückholmaschine erfolgen. Eine Übergabe der Endlagerbehälter in den Richtstrecken an eine Gleisförderung ist ebenfalls denkbar. Der Schachttransport sowie der übertägige Transport erfolgen analog zur Einlagerung.

### Schema Streckenauffahrung

Die Einlagerung der Endlagerbehälter erfolgt beginnend in Einlagerungsfeld Ost 1 und bewegt sich im „Rückbau“ bis Einlagerungsfeld Ost 12. Bei der Rückholung wird diese Richtung umgekehrt und das dem Infrastrukturbereich nächste Einlagerungsfeld, Ost 12, zuerst erschlossen (siehe Abb. 3.24).



**Abb. 3.24** Schema Streckenauffahrung

Ein mögliches Auffahr- und Rückholungsschema ist, in einer ersten Phase nacheinander die Endlagerbehälter der Felder Ost 12, 10, 8, 6, 4, 2 zurückzuholen. In der zweiten

Phase würden die Endlagerbehälter der Felder Ost 11, 9, 7, 5, 3, 1 zurückgeholt (siehe Abb. 3.24).

Grundsätzlich erfolgt die Rückholung der Endlagerbehälter pro Einlagerungsfeld in umgekehrter Reihenfolge der Einlagerung. Aus bewetterungstechnischen Gründen erfolgt die Rückholung jedoch alternierend. Ist z. B. das Feld Ost 12 aufgefahren und wird gekühlt, ist der Querschlag zwischen Ost 12 und Ost 11 mit aufgeheizten Abwettern belegt. Von diesem Querschlag aus kann nicht gleichzeitig die Auffahrung des Feldes Ost 11 erfolgen.

Eines von weiteren möglichen Auffahr- und Rückholungsschemata wäre die Zusammenfassung von jeweils zwei Feldern für die Auffahrung, Abkühlung und Rückholung der Endlagerbehälter. Eine vertiefte Betrachtung wäre im Rahmen einer weiteren Sicherheitsanalyse durchzuführen.

Die Streckenverschlüsse, Richtstrecken, Querschläge und Rückholstrecken werden mittels Teilschnittmaschinen (TSM) unter Sonderbewetterung aufgefahren. Begonnen wird ab dem Infrastrukturbereich mit der Wiederauffahrung der Richtstrecken. Dann erfolgt die Auffahrung der Querschläge westlich und östlich des jeweiligen Einlagerungsfeldes. Ist ein Feld durch Richtstrecken und Querschläge erschlossen, werden die Rückholstrecken durchschlägig aufgefahren.

Nach Stand der Technik sind alle benötigten Querschnitte mittels Teilschnittmaschinen herstellbar. Das Salzgestein, die versetzten Strecken und die geotechnischen Barrieren (Sorelbeton) können durch die Teilschnittmaschinen durchörtert werden (siehe Tab. 3.9).

**Tab. 3.9** TSM Klassen /THU 02/, /BIL 05/

<b>Gewichtsklasse</b>	<b>Gewicht</b>	<b>Schneidkopfleistung</b>	<b>Querschnitt</b>	<b>Max. UCS</b>
<b>Leicht</b>	8 - 40 t	50 - 170 kW	25 m <sup>2</sup>	60 - 80 MPa
<b>Mittel</b>	40 - 70 t	160 - 230 kW	30 m <sup>2</sup>	80 - 100 MPa
<b>Schwer</b>	70 - 110 t	250 - 300 kW	40 m <sup>2</sup>	100 - 120 MPa
<b>Überschwer</b>	über 100 t	350 - 400 kW	45 m <sup>2</sup>	120 - 140 MPa

UCS = Einachsiale Druckfestigkeit

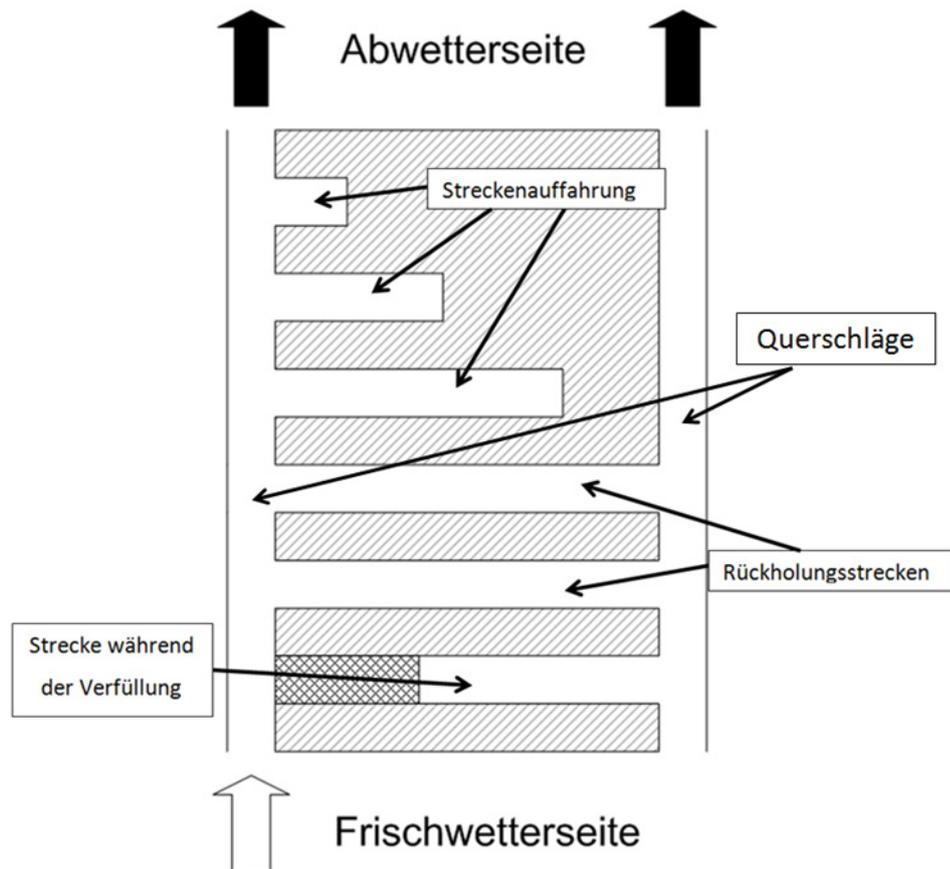
## **Abschätzung und Beherrschung der im Falle der Rückholung im Grubengebäude herrschenden klimatischen Bedingungen**

Ausgehend von den thermischen Annahmen, dass im Einlagerungsbereich maximale Gebirgstemperaturen von 200 °C zu erwarten sind, wurde eine rechnerische Abschätzung durchgeführt, mit welchen Wettermengen und Wettertemperaturen die Vorschriften der Klimabergverordnung einzuhalten sind /KBV 83/. Diese besagen, dass bei Trockentemperaturen über 52 °C oder Feuchtttemperaturen über 27 °C keine Personen mehr in diesen Bereichen arbeiten dürfen.

### **Wetterquantität**

Mit den derzeit geplanten zwei Tagesschächten von jeweils 7,5 m Durchmesser beträgt die Kapazität des Hauptwetterstroms ca. 26.500 m<sup>3</sup>/min, unter Annahme der für Förderschächte üblichen Wettergeschwindigkeit von 10 m/s. Bei einem durchschnittlichen Streckenquerschnitt von 24 m<sup>2</sup> und einer Wettergeschwindigkeit von ca. 6 m/s kann rechnerisch die gleichzeitige Bewetterung von sechs Rückholungsstrecken ermöglicht werden. Um diesen Volumenstrom bei den in Strecken üblichen maximalen Wettergeschwindigkeiten von 6 m/s bewältigen zu können, werden bei einem durchschnittlichen Streckenquerschnitt von 24 m<sup>2</sup> zusätzliche Strecken oder eine Vergrößerung der Streckenquerschnitte benötigt. Somit könnte sich das wettertechnische Konzept einer Detailplanung derart gestalten, dass jeweils sechs Rückholungsstrecken gleichzeitig in Betrieb sind. Vorstellbar hierbei ist ein Rückholungsfeld bestehend aus zwei Rückholungsstrecken, aus denen Endlagerbehälter zurückgeholt werden, sowie drei Rückholungsstrecken, die zu dem betrachteten Zeitpunkt aufgefahren werden, und einer Strecke, die sich schon wieder in der Phase der Verfüllung befindet (siehe Abb. 3.25).

Die Verfüllung erfolgt vorwiegend aus prozesstechnischen Gründen, um das bei der Auffahrung gewonnene Haufwerk unter Tage belassen zu können, und nicht aufgrund sicherheitstechnischer Anforderungen.



**Abb. 3.25** Mögliches Konzept der Auffahrung und Bewetterung von Parallelstrecken in einem Einlagerungsfeld

### Wetterqualität

Für eine erste Abschätzung wurde zunächst eine Klimavorberechnung nach „Temperaturverlauf in trockenen Strecken nach /VOß 81/ für eine durchgehend bewetterte, vollständig aufgefahrne Strecke von 300 m Länge erstellt. Die Berechnung geschah unter der Annahme, dass sich das Gebirge um die Strecke mit zunehmenden Streckenalter abkühlt, die exemplarisch untersuchten Gebirgstemperaturen zu Beginn der Rückholung wurden mit 150 °C und 200 °C gewählt. Diese zunächst vorherrschenden Gebirgstemperaturen verringern sich aufgrund des Wärmeentzugs durch den Wetterstrom. Die Auswirkung dieser Abkühlung wird in Bezug auf die Streckenaustrittstemperatur und die damit verbundene Temperaturerhöhung der Wetter wiederum bei unterschiedlichen Eintrittstemperaturen untersucht.

Um die Eintrittstemperatur der Wetter in die Rückholungstrecken abschätzen zu können, wurden zunächst die klimatischen Verhältnisse auf der Frischwetterseite in zwei Szenarien betrachtet. Im ersten Szenario wird die Länge der Frischwetterstrecken mit

2.000 m Länge veranschlagt (Beginn der Rückholung). Das zweite Szenario geht von einer Länge von 4.000 m aus (Ende der Rückholung).

Am Einziehschacht wird von der Jahresdurchschnittstemperatur Deutschlands in Höhe von 9 °C ausgegangen. Hinzu kommt die Temperaturzunahme der Wetter aufgrund von Selbstverdichtung der Luft auf dem Weg zum Fuß des einziehenden Schachtes. Ohne Einfluss anderer Wärmequellen beträgt die Temperaturzunahme der einziehenden Wetter ca. 1 °C auf 100 m Teufe /REU 89/. Die Teufe des Schachts beträgt ca. 800 m, so dass eine Temperaturzunahme von 8 °C und somit eine Wettertemperatur auf der betrachteten Sohle von 17 °C vorliegt. Diese Annahme dient als Ausgangstemperatur in die Frischwetterstrecke.

Die Gebirgstemperatur wird aufgrund der Entfernung der Richtstrecken von den Einlagerungsbereichen mit maximal 100 °C angenommen. Dabei werden verschiedene Werte für das mittlere Streckenalter (Abkühlzeiten) von 1, 5 und 10 Jahren betrachtet, da die Richtstrecken zeitlich vor den Rückholungstrecken aufgefahren werden.

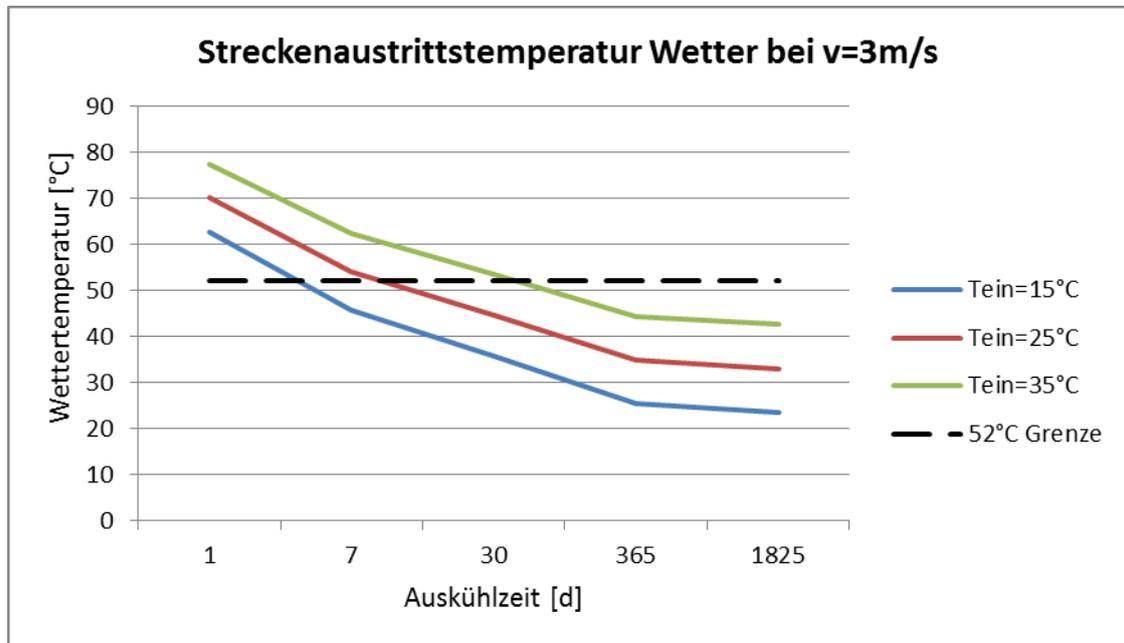
Das Ergebnis dieser Betrachtung ist, dass bei einer Ausgangsgebirgstemperatur von 100 °C und einer Streckenlänge von 2.000 m bereits nach einem mittleren Streckenalter von einem Jahr eine Austrittstemperatur von rund 31,5 °C zu erwarten ist. Im Laufe der Zeit kühlt diese Austrittstemperatur immer weiter ab, so ist zum Beispiel nach 10 Jahren mit einer Austrittstemperatur von nur noch 27 °C zu rechnen.

Bei einer Streckenlänge von 4.000 m erwärmen sich die Wetter deutlich mehr, so dass man nach einem Jahr mit einer Austrittstemperatur von 44 °C rechnen muss. Mit zunehmendem Alter der Strecke reduziert sich auch hier die Austrittstemperatur auf 39 °C nach 5 Jahren und 36 °C nach 10 Jahren. Dies harmoniert mit einer vorgeschlagenen Vortriebsgeschwindigkeit von 2 m/d.

Insgesamt ist festzustellen, dass den Frischwetterstrecken ausreichend Zeit zum Abkühlen gegeben werden muss, um mit entsprechend kühlen Wetter in die Rückholungstrecken einzutreten.

Hierauf folgt die Betrachtung der Temperaturentwicklung in den Rückholungstrecken bei Eintrittstemperaturen von 15, 25 und 35 °C und einer Wettergeschwindigkeit von 3 m/s.

Bei einer Gebirgstemperatur von 200 °C kann bei einer Eintrittstemperatur von 35 °C nach ca. 30 Tagen der nach /KBV 83/ kritische Wert von 52 °C unterschritten werden. Bei einer Gebirgstemperatur von 150 °C kann bei einer Eintrittstemperatur von 35 °C nach ca. 10 Tagen der kritische Wert von 52 °C unterschritten werden (siehe Abb. 3.26).



**Abb. 3.26** Streckenaustrittstemperatur der Wetter bei  $v = 3 \text{ m/s}$  in Bezug auf die Auskühlzeit bei 200 °C Oberflächentemperatur

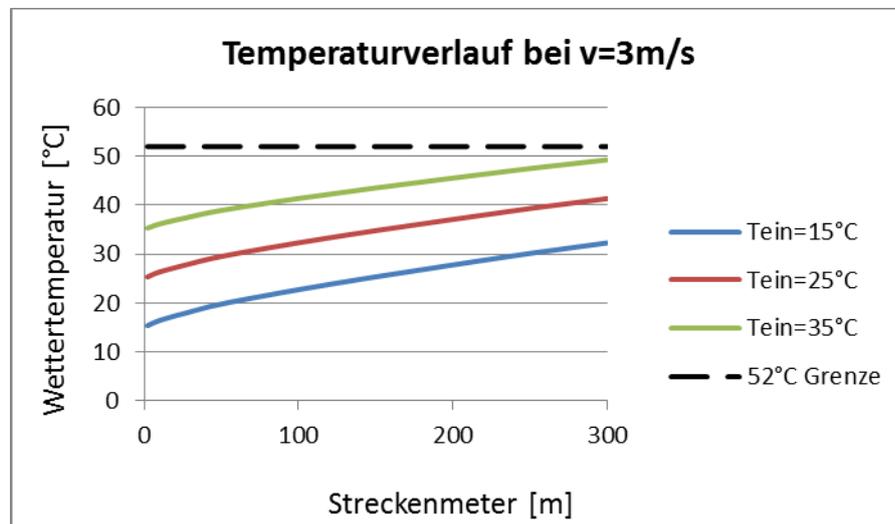
Die Betrachtung der Wetteraustrittstemperaturen verdeutlicht, dass bereits nach 30 Tagen eine Abkühlung des Gebirges um mehr als 20 °C durch die Bewetterung stattfindet. Eine durch die Wärmeabfuhr über die Wetter bedingte Reduzierung der Gebirgstemperatur im unmittelbaren Streckenmantel verringert wiederum die Wärmeübertragung auf die Wetter, so dass deren Austrittstemperatur aus der Strecke nach einer entsprechenden Auskühlzeit des Gebirges unter den Grenzwert für die Trockentemperatur von 52 °C sinkt.

### Sonderbewetterung

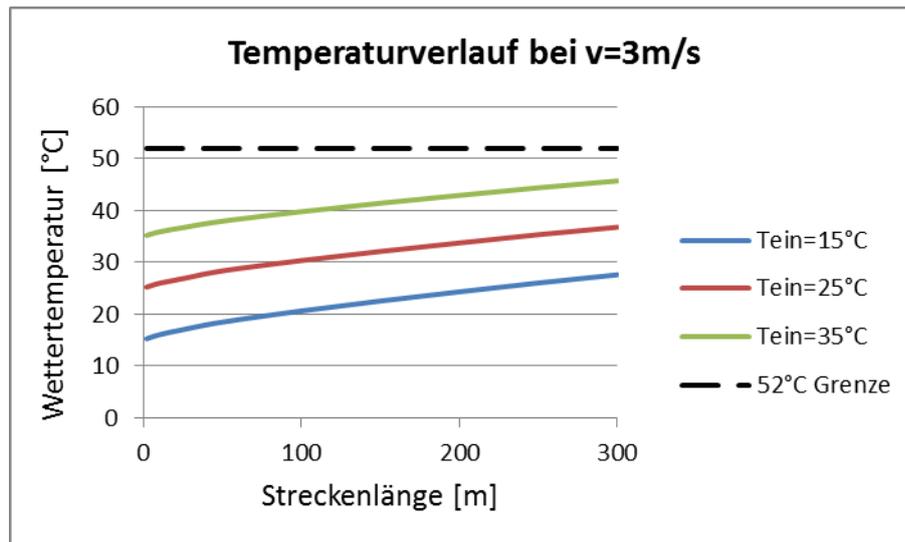
Im Gegensatz zur Betrachtung der durchgehenden Bewetterung wurde darauf folgend der Verlauf der Wettertemperaturen betrachtet, der sich während der Auffahrung der Rückholstrecke einstellt. Diese Betrachtungsweise berücksichtigt zum einen die Auskühlzeit und somit die Abkühlung des Gebirges und zum anderen die in Abhängigkeit

von der Vortriebsgeschwindigkeit erstellte Streckenlänge. Zu berücksichtigen ist, dass in den Berechnungen mit unterschiedlichen Streckenlängen aufgrund des jeweiligen Auffahrungsfortschrittes gerechnet wird. Die Austrittstemperatur der Wetter eines definierten Streckenabschnittes wird dabei als Wettereintrittstemperatur an den nächsten Abschnitt übergeben.

Ausgehend von einer Vortriebsgeschwindigkeit von 2 m/d und einer Wettergeschwindigkeit von 3 m/s ist selbst bei einer Gebirgstemperatur von ca. 200 °C und einer Eintrittstemperatur in die Rückholungsstrecke von 35 °C nicht mit Temperaturen von über 50 °C am Streckenende zu rechnen (siehe Abb. 3.27). Im Vergleich hierzu zeigt Abb. 3.28 den Temperaturverlauf bei einer Gebirgstemperatur von 150 °C.



**Abb. 3.27** Streckenaustrittstemperatur der Wetter bei  $v = 3 \text{ m/s}$  in Bezug auf die Streckenlänge bei Gebirgstemperatur 200 °C



**Abb. 3.28** Streckenaustrittstemperatur der Wetter bei  $v = 3 \text{ m/s}$  in Bezug auf die Streckenlänge bei Gebirgstemperatur  $150 \text{ °C}$

Das mit dem Modell Klimavorausberechnung untersuchte Szenario Sonderbewetterung zeigt, dass die Auffahrung der Strecke unter den getätigten Annahmen möglich erscheint. Aufgrund des moderaten Auffahrungsfortschritts von  $2 \text{ m/d}$ , gekoppelt mit einer vergleichsweise langen Auskühlzeit, stellen sich Temperaturen ein, die für alle betrachteten Wettereintrittstemperaturen unter der Grenze von  $52 \text{ °C}$  liegen.

Die oben beschriebenen Modellbetrachtungen zur Klimavorausberechnung unterliegen der Annahme, dass keine aktive Wärmequelle vorliegt. Durch die eingelagerten POLLUX<sup>®</sup>-Behälter liegt jedoch eine Wärmequelle vor, wodurch sich die berechneten Wettertemperaturen am Ende der Strecken erhöhen. Es wurde eine Gesamtwärmeleistung der Behälter entlang einer Rückholungsstrecke von  $225 \text{ kW}$  angenommen.

Wenn die gesamte Wärmeleistung der POLLUX<sup>®</sup>-Behälter einer Einlagerungsstrecke/ Rückholungsstrecke über den Wetterstrom abgeführt wird, erhöht sich die Wettertemperatur lediglich um ca.  $3 \text{ °C}$ . Somit kann die Aussage, dass nach dem Modell der Klimavorausberechnung sowohl die Streckenauffahrung als auch die Rückholung der POLLUX<sup>®</sup>-Behälter aus klimatischer Sicht möglich erscheint, aufrecht erhalten werden, auch unter Berücksichtigung aktiver Wärmequellen im Salzgebirge.

Maßnahmen zur Verbesserung der klimatischen Verhältnisse in den Strecken sind:

- Einsatz von zentralen übertägigen Kälteanlagen, die über ein Kältemittel zusätzliche Kühlleistung in das untertägige Grubengebäude bringen.

- Einsatz von Betriebsmitteln mit klimatisierten Fahrerinnen. Hierbei wäre kein Mitarbeiter den klimatischen Bedingungen ausgesetzt, wodurch die Einhaltung bestimmter Temperaturen nicht notwendig wäre.

Insgesamt lässt sich damit folgendes Zwischenfazit ziehen:

- Das Einhalten der bergbehördlichen Grenztemperatur /KBV 83/ von 52 °C ist unter den angenommenen Rahmenbedingungen (24 m<sup>2</sup> Streckenquerschnitt, Gebirgstemperaturen von 150 °C und 200 °C sowie eine Wettergeschwindigkeit von 3 m/s) bei entsprechend niedrigen Eintrittstemperaturen nach Klimaberechnung von /VOß 81/ möglich.
- Die aus den angenommenen Rahmenbedingungen (zwei Tagesschächte, Schachtdurchmesser jeweils 7,5 m, Wettergeschwindigkeit Förderschacht 10 m/s) ermittelte Gesamtwettermenge von ca. 26.000 m<sup>3</sup>/min reicht aus, um maximal sechs Rückholungsstrecken gleichzeitig zu bewettern.
- Unter diesen Randbedingungen erscheint eine Rückholung aus wettertechnischer Sicht innerhalb von 40 Jahren möglich.
- Die Wettererwärmung der Frischwetter auf dem Weg von der Tagesoberfläche durch den Einziehschacht und anschließend durch die Richtstrecken zum Rückholungsbereich kann bei zu schneller Streckenauffahrung zu Eintrittstemperaturen im Rückholungsbereich führen, die ohne Wetterkühlung über den für die Einhaltung der Klimagrenze in den Rückholungsstrecken geforderten Eintrittstemperaturen liegen.

### **Betrachtungen zur Gebirgsmechanik bei der Auffahrung von Strecken in Salz bei Gebirgstemperaturen bis 200 °C**

Die im Falle der Rückholung maximal anzutreffenden Gebirgstemperaturen von 200 °C liegen deutlich außerhalb des im untertägigen Bergbau üblichen Temperaturbereiches. Dementsprechend liegen auch keine betrieblichen Erfahrungen zu den gebirgsmechanischen Auswirkungen vor, die sich aus der Temperaturdifferenz zwischen der maximalen Gebirgstemperatur (200 °C) und der Temperatur der Wetter (beispielsweise 30 °C) ergeben ( $\Delta T = 170 \text{ °C}$ ). Im vorliegenden Fall ist bei der Betrachtung der gebirgsmechanischen Folgen insbesondere zu berücksichtigen, dass der unmittelbar die Strecke umgebende Gebirgsmantel abgekühlt wird, sich ein inhomogenes Temperaturfeld um die Strecke herum bildet und es aufgrund der örtlich unterschiedlichen Abküh-

lung zu unterschiedlichen Gebirgsspannungen, insbesondere auch Zugspannungen kommt.

Abhängig von den thermo-mechanischen Randbedingungen weist Steinsalz eine große Bandbreite bzgl. der wirkenden Deformationsmechanismen aus. Unter hinreichender Einspannung und kleinen Deviatoren, wie sie im Fernfeld vorherrschen, dominieren thermoelasto-visko-plastische Prozesse, wie sie in Anhang B.3 beschrieben sind, die allgemein phänomenologisch in einem volumenkonstanten Kriechen zum Ausdruck kommen. Dabei werden Spannungen im Salzgestein abgebaut (s. u.).

Bei den hier relevanten Nahfeldeffekten können zusätzlich noch Schädigungsprozesse auftreten. In der Salzmechanik werden zwei Schädigungsgrenzen unterschieden: Als untere Grenze beschreibt die Dilatanzgrenze eine Grenze, unterhalb der alle Deformationsprozesse bruchlos und ohne dilatante Verformung (schädigungsfrei) ablaufen, wie sie zuvor beschrieben wurden. Oberhalb der Dilatanzgrenze kommt es zu Rissbildung (beschrieben als Dilatanz, d. h. Volumenzunahme infolge von Rissöffnung). Die Mikrorisse vernetzen sich im Lauf der Zeit zu Makrorissen. Die Geschwindigkeit dieses Wachstums hängt vom Maß der Überschreitung der Dilatanzgrenze und der kleinsten Normalspannung ab. Ein kurzfristiges Versagen tritt ein, wenn der Spannungszustand die Bruchgrenze erreicht und die Tragfähigkeit des Salzgesteins bis auf ein Restfestigkeitsniveau abfällt. Sowohl die Dilatanzgrenze als auch die Bruchgrenze können in Abhängigkeit von invarianten Spannungsgrößen beschrieben werden.

In einem eingespannten System führt eine Temperaturänderung über die Wärmeausdehnung des Materials zu zusätzlichen thermischen Zwangsspannungen. Es hängt vom Gesamtspannungszustand ab, ob diese Zusatzbeanspruchung dilatant oder nicht-dilatant aufgenommen werden kann. Spannungsspitzen werden durch die Kriechfähigkeit des Steinsalzes, aber auf jeden Fall im Lauf der Zeit abgebaut.

Im vorliegenden Betrachtungsfall wird das Salzgebirge vom Streckenmantel aus abgekühlt. Dadurch verschiebt sich die maximale Hauptspannung in die Richtung von Zugspannungen. In der Frühphase der Abkühlung ist unmittelbar an der Kontur mit Zugspannungen zu rechnen, die zu Schädigungen mit Ausbildung einer erweiterten Auflockerungszone führen können. Allerdings ist ohnehin bereits wegen des gebirgsmechanisch hohen Temperaturniveaus und der daraus resultierenden hohen Kriechfähigkeit des Steinsalzes mit der Folge erhöhter Konvergenz (Querschnittsreduzierung) und daraus resultierender intensiver Beraubarbeit zu rechnen, um die Strecken offen

zu halten. Durch diese Beraubearbeiten werden die dilatanten Konturbereiche mitweggeschnitten. Einen wesentlichen Einfluss auf die Tiefe der Auflockerungszone geht von der Geschwindigkeit aus, mit der das Gebirge abgekühlt werden soll. Inwieweit diese für bergmännische Arbeiten außergewöhnlichen Umstände beherrschbar sind, müssen vertiefende Berechnungen in späteren Projekten zeigen.

Es sei darauf hingewiesen, dass insbesondere im Zusammenhang mit der Einlagerung radioaktiver Abfälle umfangreiche Versuche zum Verhalten von Steinsalz bei starker Erwärmung durchgeführt wurden. Entsprechende Untersuchungen zum Verhalten von Steinsalz bei starker Abkühlung mit einer vergleichbaren Datenbasis liegen bisher nicht vor. Dem hier zu betrachtenden Fall einer starken Abkühlung des Gebirges vergleichbare Fälle sind beispielsweise das Abteufen von Schächten im Gefrierverfahren und das Einlagern von Gas oder flüssigen Kohlenwasserstoffen in Kavernen. Für beide Fälle liegen Befunde aus in-situ-Beobachtungen oder Modellrechnungen vor, nach denen es zu Rissbildungen im umliegenden Gebirge kommt /LEU 12/. Detailliertere Angaben zu Verhalten und Ausmaß der Rissbildung sowie zu Möglichkeiten der Vorhersage sind aber nicht enthalten.

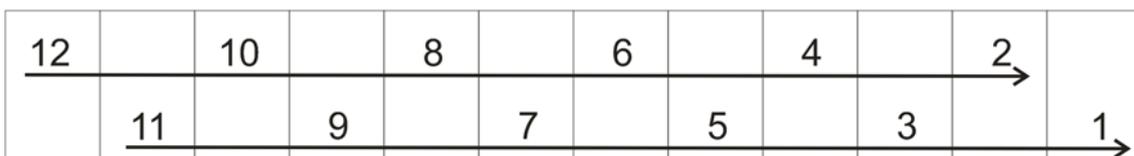
Jedoch ist festzuhalten, dass Steinsalz aus gebirgsmechanischer Sicht ein günstiges und gut zu beherrschendes Gebirge darstellt. So werden beispielsweise im untertägigen Steinsalzbergbau in 800 m Teufe standfeste Kammern von 585 m Länge, 18 m Höhe und 24 m Breite ohne größeren Ausbauraufwand erstellt. Im deutschen Kalibergbau werden in Teufen von rund 900 m bis zu 12 m breite Örter ohne jeden Regelausbau aufgefahren. Weiterhin finden Abbaumaßnahmen in Gebirgstufen bis 1400 m (z. B. Bergwerk Siegmundshall, Niedersachsen) statt, wo Gebirgstemperaturen bis 60 °C vorliegen. Hieraus lässt sich mit guter Berechtigung ableiten, dass auch für den vorliegenden Betrachtungsfall die aufzufahrenden Rückholungsstrecken im bis zu 200 °C heißen Salzgestein mit üblichen Ausbaumitteln gebirgsmechanisch beherrschbar sind.

### **Zeitplanung für die Auffahrung des Bergwerkes und die Rückholung**

Die Ermittlung des Zeitaufwandes für eine Rückholung erfolgt innerhalb der VSG auf Konzeptebene. Folgende Annahmen und Randbedingungen liegen der Betrachtung zugrunde:

Es wird der beschriebene späteste Zeitpunkt der Rückholungsentscheidung betrachtet. Alle einzulagernden Endlagerbehälter wurden eingelagert. Die Einlagerungsstrecken, Querschläge und Richtstrecken wurden mit Salzgrus versetzt sowie die technischen Barrieren errichtet. Die Auffahrung der Strecken erfolgt nach dem beschriebenen zweiphasigen Schema: in einer ersten Phase werden die Endlagerbehälter der Felder Ost 12, 10, 8, 6, 4, 2 zurückgeholt. In der zweiten Phase werden die Endlagerbehälter der Felder Ost 11, 9, 7, 5, 3, 1 zurückgeholt (siehe Abb. 3.24). Die Geschwindigkeit zur Auffahrung der Strecken ist aus den Betrachtungen der Beherrschung der Gebirgstemperaturen abgeleitet.

Für die Berechnung des Zeitaufwandes wurde weiterhin nicht das reale Grubengebäude betrachtet, sondern ein vereinfachtes Blockmodell verwendet, welches den Strecken, Feldern und Endlagerbehältern des realen Grubengebäudes entspricht (siehe Abb. 3.29).



**Abb. 3.29** Blockmodell zur Berechnung des Zeitaufwandes für die Rückholung

Tab. 3.10 zeigt die weiteren Annahmen, die für die Zeitplanung der Rückholung herangezogen wurden.

**Tab. 3.10** Daten für die Planung der Rückholung

Anzahl der Endlagerbehälter	3.600
Anzahl der Einlagerungsfelder	12
Anzahl der Rückholstrecken	120
Länge aller Rückholstrecken	36.000 m
Länge aller durchschlägigen Querschläge	6.000 m
Länge der Richtstrecken	11.000 m
Auffahrgeschwindigkeit in Richtstrecken	10 m/Tag
Auffahrgeschwindigkeit in Querschlägen	3 m/Tag
Auffahrgeschwindigkeit in Rückholstrecken	2 m/Tag
Arbeitstage pro Jahr	250

In Phase eins der Rückholung müssen zuerst die Richtstrecken neu aufgefahren werden. Dies erfolgt beispielsweise bis zum Schnittpunkt des ehemaligen Querschläges zwischen Feld Ost 12 und Ost 11. Auf Grund der für die Rückholung benötigten Wettermenge und aus betrieblichen Gründen werden jeweils zwei Richtstrecken im Süden und zwei Richtstrecken im Norden aufgefahren. Eine der nördlichen Richtstrecken dient hierbei als Abwettersammelstrecke. Das Auffahren erfolgt an zwei Betriebspunkten mit einer durchschnittlichen Vortriebsgeschwindigkeit von 10 m pro Tag. Für diesen Arbeitsschritt wird inkl. infrastruktureller und bewetterungstechnischer Maßnahmen durchschnittlich ein Jahr benötigt.

In Schritt zwei werden die Querschläge mit zwei Betriebspunkten und einer durchschnittlichen Vortriebsgeschwindigkeit von 3 m pro Tag aufgefahren. Es folgt in Schritt drei die Auffahrung der durchschlägigen Rückholstrecken mit einer Vortriebsgeschwindigkeit von 2 m pro Tag an vier Betriebspunkten. Für die Streckenauffahrungen in den Schritten zwei und drei werden ca. zwei Jahre benötigt. Bevor die Rückholung in einem aufgefahrenen Feld beginnt, wird dieses ca. ein Jahr gekühlt, um die Arbeitsbedingungen vor Ort zu verbessern.

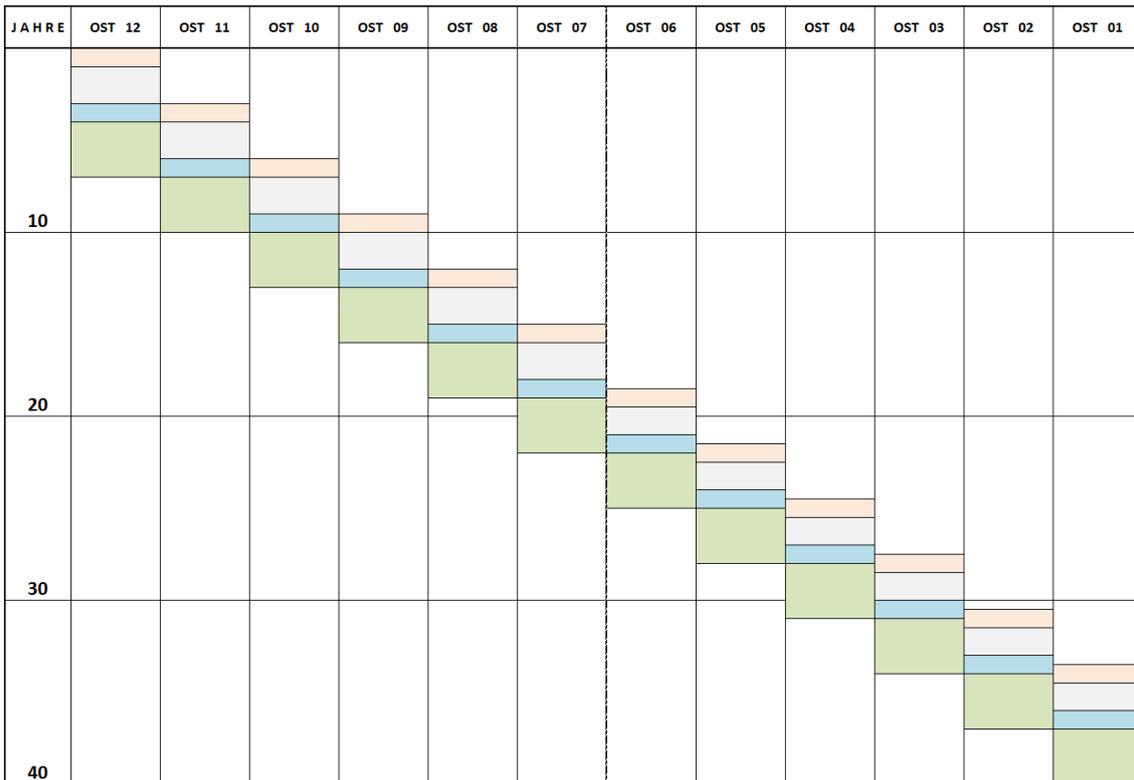
Für das Freilegen eines Endlagerbehälters werden durchschnittlich drei Arbeitstage veranschlagt. Für das Ziehen eines Endlagerbehälters auf die Rückholstrecke und den innerbetrieblichen Transport werden zwei Arbeitstage benötigt. Bei durchschnittlich 300 Endlagerbehältern je Feld und angesetzten zwei Betriebspunkten werden drei Jahre für die Rückholung der Endlagerbehälter eines Feldes benötigt. Durchschnittlich werden so für die Rückholung aller Abfallgebilde eines Feldes inkl. Auffahrung der Strecken und Abkühlung sieben Jahre benötigt (siehe Abb. 3.30).

Aufwand [Jahre]	Arbeiten in Feld 12	Arbeiten in Feld 10
1	Auffahren Richtstrecken bis Feld (2 Betriebspunkte)	
2	Auffahren Ouerschläge (zwei Betriebspunkte) und Rückholstrecken (vier Betriebspunkte)	
1	Abkühlen	Auffahren Richtstrecken bis Feld (2 Betriebspunkte)
3	Rückholung (2 Betriebspunkte)	Auffahren Ouerschläge (zwei Betriebspunkte) und Rückholstrecken (vier Betriebspunkte)
		Abkühlen
		Rückholung (2 Betriebspunkte)

**Abb. 3.30** Ablauf und Harmonisierung der Rückholung für zwei Felder

Abb. 3.30 zeigt neben dem chronologischen Ablauf der Maßnahmen zur Rückholung der Endlagerbehälter in einem Feld die Möglichkeit des Parallelisierens von Maßnahmen und die Harmonisierung der Rückholung. Während ein bereits aufgefahrenes Feld abkühlt, kann das Auffahren der Richtstrecken zum Erreichen des nächsten Feldes beginnen.

In Phase eins der Rückholung werden alle Querschläge der Felder 12, 10, 8, 6, 4 und 2 aufgefahren. Dies bedeutet für die Phase zwei der Rückholung, dass bereits alle Querschläge bis auf den Querschlag östlich des Feldes Ost 1 aufgefahren sind. Das Auffahren von Querschlägen kann demnach für Phase zwei weitestgehend entfallen.



**Abb. 3.31** Ablaufplan Rückholung

Abb. 3.31 zeigt das Ablaufschema für die Rückholung der Endlagerbehälter aus dem komplett gefüllten Endlagerbergwerk. Der Zeitbedarf summiert sich auf ca. 40 Jahre. Anzumerken ist, dass durch Optimierungsmaßnahmen im Ablauf sowie durch eine Erhöhung der Bewetterungsleistung der Zeitbedarf für die Rückholung noch reduziert werden kann.

### **Radiologisches Monitoring während der Rückholung und Störfallbetrachtung**

Für die Rückholung der Endlagerbehälter mit ausgedienten Brennelementen aus den Einlagerungsstrecken sind die Anforderungen an den radiologischen Schutz des Betriebspersonals und der Umgebung einzuhalten. Der Erfüllung dieses Schutzzieles dienen die Anforderungen an die Handhabbarkeit und Dichtheit der Behälter. Im Übrigen sei verwiesen auf das Kapitel 3.3.2.3, Betrieblicher Strahlenschutz.

Die Endlagerbehälter müssen über den Zeitraum von 600 Jahren handhabbar bleiben. Dies bedeutet, dass sie bei der Handhabung im Rahmen der Rückholung formstabil bleiben und ihre mechanische Stabilität uneingeschränkt erhalten bleibt sowie die Anschlagmittel gebrauchstauglich sind. Dies wird als Anforderung an die Auslegung der

Einlagerungsgebäude formuliert und für die Behälter im Genehmigungsverfahren nachgewiesen.

Eine Quantifizierung für die Aerosoldichtheit und die Gasleckage ist nicht Gegenstand der VSG. Auf dieser Grundlage werden die Endlagerbehälter als handhabbar und aerosoldicht angenommen. Abweichungen von dieser Grundanforderung sind als Störung zu betrachten und werden gesondert behandelt.

### **Monitoring**

Im Rahmen der Streckenaufwältigung bzw. Auffahrung werden die Wetter auf Radioaktivität (Gase/Aerosole) überwacht. Die Auffahrung erfolgt im Frischwetterzustrom, so dass eine Kontamination nur über Diffusion aus dem versetzten Bereich heraus möglich ist. Im Falle einer Beaufschlagung der Wetter mit gas- oder aerosolförmigen Radionukliden erfolgt eine Fremdbelüftung der Arbeitsplätze.

Die Freilegung der Endlagerbehälter erfolgt im Frischwetterzustrom, so dass eine Kontamination nur über die Kontamination der Endlagerbehälter/des Haufwerks oder durch Freisetzung aus den Abfallgebänden möglich ist.

Zur Überwachung werden vor Freilegung des Behälters Haufwerksproben auf Radioaktivität hin untersucht. Ebenfalls werden Gasproben daraufhin analysiert. Bei Freilegung des Behälters werden Wischproben am Behälter genommen und bei Kontaminationsfreiheit der Behälter zur Rückholung freigegeben.

Wenn der Endlagerbehälter kontaminationsfrei ist und eine Freisetzung gasförmiger Radionuklide ausgeschlossen werden kann, erfolgt die Rückholung des Endlagerbehälters und der Transport nach über Tage.

Im Falle einer Kontamination der Wetter oder des Behälters mit gas- oder aerosolförmigen Radionukliden erfolgen eine Fremdbelüftung der Arbeitsplätze sowie ein Verpacken des Abfallgebändes mit einer Folie. Danach wird der Behälter als Sondermaßnahme auf das Transportfahrzeug geladen und nach über Tage transportiert.

## **Störungen**

Als Störungen werden Gas- und Aerosolfreisetzung sowie Einschränkungen bzw. Defekt der Anschlagmittel identifiziert. Die Handhabung dieser Gebinde erfolgt unter Anwendung von Sondermaßnahmen.

## **Störfälle**

Als Störfälle werden betrachtet:

- Handhabungsstörfall
- Brand
- Verlust der Behälterintegrität (ggf. Unfall)

Für den Ausschluss bzw. die Minimierung der Eintrittswahrscheinlichkeit werden für die spätere vertiefte Planung sowie die Sicherheitsanalyse im Rahmen eines Genehmigungsverfahrens Maßnahmen zum Ausschluss, zur Minimierung der Eintrittswahrscheinlichkeit bzw. zur Beherrschung der Auswirkungen geplant.

## **Konditionierung, Zwischenlagerung**

Sind die Endlagerbehälter der Variante B1 zurückgeholt, ist der weitere Verbleib der Abfälle zu betrachten. Zurückgeholt werden im Wesentlichen Endlagerbehälter des Typs POLLUX®. Diese POLLUX®-Behälter besitzen keine Zulassung als Transport- und Lagerbehälter. Eine Konditionierung der Abfälle über Tage ist daher notwendig. Hierzu ist eine geeignete Konditionierungsanlage vorzuhalten, in der die Abfälle in Transport- und Lagerbehälter umgepackt werden. Für diese Konditionierung ist weiterhin eine ausreichende Anzahl an Transport- und Lagerbehältern vorzusehen. Für diese vorzuhaltenden Transport- und Lagerbehälter ist zudem die Möglichkeit der Lagerung zu berücksichtigen.

Für den Zeitpunkt der Rückholung ist eine hinreichende Lagerkapazität für die mit rückgeholtten Abfällen beladenen Transport- und Lagerbehälter vorzusehen. Hierfür sind Zwischenlager in der Konzeption zu berücksichtigen.

### 3.3.2.7 Bergung von Endlagerbehältern

In den Sicherheitsanforderungen des BMU wird als Bergung „die Rückholung radioaktiver Abfälle aus dem Endlager als Notfallmaßnahme bezeichnet“ /BMU 10/.

In Kapitel 8.6 der Sicherheitsanforderungen wird weiterhin ausgeführt: Die „Abfallbehälter müssen unter Berücksichtigung der darin verpackten Abfallprodukte und des sie umgebenden Versatzes folgende Sicherheitsfunktionen erfüllen: Für die wahrscheinlichen Entwicklungen muss eine Handhabbarkeit der Abfallbehälter bei einer eventuellen Bergung aus dem stillgelegten und verschlossenen Endlager für einen Zeitraum von 500 Jahren gegeben sein. Dabei ist die Vermeidung von Freisetzungen radioaktiver Aerosole zu beachten“ /BMU 10/.

Für die Bergung der Endlagerbehälter aus dem stillgelegten Endlager ist ein neues Bergwerk zu errichten. Die Machbarkeit ist in der Studie „Direkte Endlagerung ausgelegter Brennelemente DEAB (02 E 8371) – Untersuchung zur Rückholbarkeit von eingelagertem Kernmaterial in der Nachbetriebsphase eines Endlagers“ /ENG 95/ beschrieben.

Um die geforderte Bergung zu ermöglichen, sind entsprechende Anforderungen an die Endlagerbehälter zu formulieren. Für die Einhaltung dieser Anforderung sind gemäß /BMU 10/ die Ablieferungspflichtigen verantwortlich. „Für den Nachweis der Einhaltung der Endlagerungsbedingungen gelten folgende Regelungen:

- Die Ablieferungspflichtigen stellen sicher, dass die Abfallbehälter die in den Endlagerungsbedingungen geforderten Eigenschaften aufweisen und ermitteln die gemäß Endlagerungsbedingungen anzugebenden Abfalldaten.
- Die Gültigkeit dieser Eigenschaften und Abfalldaten wird vom Betreiber des Endlagers im Rahmen der Produktkontrolle überprüft. Diese Prüfung erfolgt aus Strahlenschutzgründen und Zweckmäßigkeitserwägungen grundsätzlich im Vorfeld der Einlagerung und außerhalb des Endlagers.
- Der Endlagerbetreiber überprüft im Rahmen der Eingangskontrolle die Identität der Abfallbehälter sowie für den Strahlenschutz bzw. die Handhabung der Abfallbehälter im Endlager wesentliche Eigenschaften“ /BMU 10/.

## Anforderungen an die Endlagerbehälter

Wie in Kapitel 3.3.2.6 beschrieben, sollen die Endlagerbehälter nach ihrer Freilegung aus den mit Salzgrus versetzten Strecken auf die Rückholstrecke gezogen werden. Hierzu ist es notwendig, dass die Endlagerbehälter über den betrachteten Zeitraum von ca. 600 Jahren formstabil bleiben und ihre mechanische Stabilität uneingeschränkt gewährleistet ist. Weiterhin darf das Anheben der Behälter nicht zu ihrer Beschädigung führen. Die Anschlagmittel der Endlagerbehälter sind im Gegensatz zur Betrachtung der Rückholung nicht als gebrauchsfähig unterstellt.

Zu den radioaktiven Abfällen, die in einem Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle zu bergen sind, gehören:

- bestrahlte Brennelemente aus Leistungsreaktoren (direkte Endlagerung) und Strukturteile
- radioaktive Abfälle aus der Wiederaufarbeitung im Ausland sowie aus der Wiederaufarbeitungsanlage in Karlsruhe
- bestrahlte Brennelemente aus Prototyp- und Forschungsreaktoren

Die Brennelemente sind in POLLUX<sup>®</sup>-Behältern (Variante B1), Transport- und Lagerbehältern (Variante B2) oder in verrohrten Bohrlöchern in Brennstabkokillen (Variante C) endgelagert.

Die verglasten mittel- und hochradioaktiven ebenso wie die hochdruckkompaktierten Abfälle (Strukturteile) befinden sich in Kokillen aus Edelstahl. Die Kokillen sind ebenfalls in POLLUX<sup>®</sup>-Behältern (Variante B1), Transport- und Lagerbehältern (Variante B2) oder in verrohrten Bohrlöchern (Variante C) endgelagert.

Diese Behälter sowie die Bohrlochverrohrung bestehen aus Stahl oder Edelstahl mit unterschiedlichen Wandstärken. Eine denkbare Korrosion oder Versprödung unter Endlagerbedingungen darf die mechanische Stabilität und die Handhabbarkeit der Behälter sowie die mechanische Stabilität der Bohrlochverrohrung bis zu 600 Jahre nicht beeinträchtigen. Dabei ist die Vermeidung von Freisetzungen radioaktiver Aerosole zu beachten /BMU 10/.

Nach Abschätzungen in /MÜL 08/ kann für die POLLUX<sup>®</sup>- und CASTOR<sup>®</sup>-Behälter aufgrund der Wandstärken und der dort angenommenen Korrosionsraten eine mechani-

sche Stabilität und Handhabbarkeit nach 600 Jahren sicher unterstellt werden. Für die Kokillen wird dies gleichermaßen angenommen. Eine mögliche Versprödung der Behälter durch Wasserstoff ist zu untersuchen.

Lokale Effekte, wie z. B. Lochfraß-, Korngrenzen- oder Spannungsrisskorrosion, die unter Endlagerbedingungen auftreten können, können die Eignung der Behälter bzw. Kokillen, die Freisetzung von Aerosolen zu vermeiden, beeinträchtigen. Ein entsprechender Nachweis der Eignung ist im Genehmigungsverfahren bzw. bei Zulassung der Behälter zu führen.

Die mechanische Stabilität der Behälter und Bohrlochverrohrung über 600 Jahre gegenüber dem auflaufenden Gebirgsdruck und gegenüber der mechanischen Belastung der Behälter bei der Bergung ist somit im Genehmigungsverfahren bzw. bei Zulassung der Behälter nachzuweisen.

### **3.3.3 Bohrlochlagerung (Variante C)**

Im Folgenden wird die Endlagerung ausgedienter Brennelemente, wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle und Brennelementstrukturteile in unabgeschirmten rückholbaren Endlagerbehältern (Kokillen) in Form der Bohrlochlagerung beschrieben. Hinsichtlich der Transport- und Einlagerungsprozesse sowie dem Verfüll- und Verschlusskonzept wird auf /BOL 11/ verwiesen. Sofern es Abweichungen von den in /BOL 11/ dargestellten Lösungen aufgrund der Anforderungen der Rückholoption gibt, werden diese hier ergänzend dargestellt.

Die wesentliche Änderung gegenüber dem ursprünglichen Einlagerungskonzept ist die Verrohrung der Bohrlöcher /NSE 12/. Dies ist u. a. notwendig, um eine Einspannung der Abfallgebinde durch die Salzgruskompanktion auszuschließen und eine definierte Lage und Zustand der Abfallgebinde zum Zeitpunkt einer Rückholung zu gewährleisten. Die Verrohrung wird für die zu erwartenden Gebirgsdrücke ausgelegt und an ihren Enden verschlossen.

Zur Einlagerung der Abfälle werden Kokillen verwendet, deren Layout für den Rückholungsprozess optimiert ist. Die thermische Anbindung der Kokillen an das umgebende Gebirge erfolgt innerhalb der Verrohrung durch das Einbringen von Versatz. Die An-

bindung der Verrohrung an das Gebirge erfolgt im Vorfeld der Einlagerung durch die Konvergenz des auflaufenden Gebirges.

### **3.3.3.1 Thermische Berechnungen**

Die thermische Auslegung in dem Bohrlochkonzept der Variante C erfolgt auf Basis rein thermischer Berechnungen. Zwar ist in dem Konzept ein porositätsbehafteter Versatzstoff enthalten, durch die für die Rückholung erforderliche Verrohrung des Bohrlochs ist der gebirgsmechanische Einfluss auf den Versatzstoff jedoch wirksam ausgeschlossen. Ebenso sind thermisch wirksame konvergierende Ringspalte um die Verrohrung für die thermische Phase ausgeschlossen. Die Ergebnisse der mechanischen Berechnungen zum Konvergenzverhalten eines Bohrlochs sind im Zusammenhang mit dem Rückholkonzept beschrieben. Weitere auftretende mechanische Prozesse wie die Spannungsumlagerung um die Bohrlöcher und Grubenräume und thermomechanischen Prozesse, wie die thermische Expansion während der thermischen Phase, wirken sich auf die Wärmeleitfähigkeit nicht aus und brauchen daher in diesen numerischen Berechnungen nicht berücksichtigt werden.

#### **3.3.3.1.1 Berechnungsprogramme**

Die verwendeten Berechnungsprogramme entsprechen denjenigen, die bei den Berechnungen der Variante B1 verwendet wurden und in Kapitel 3.3.2.1.1 beschrieben sind.

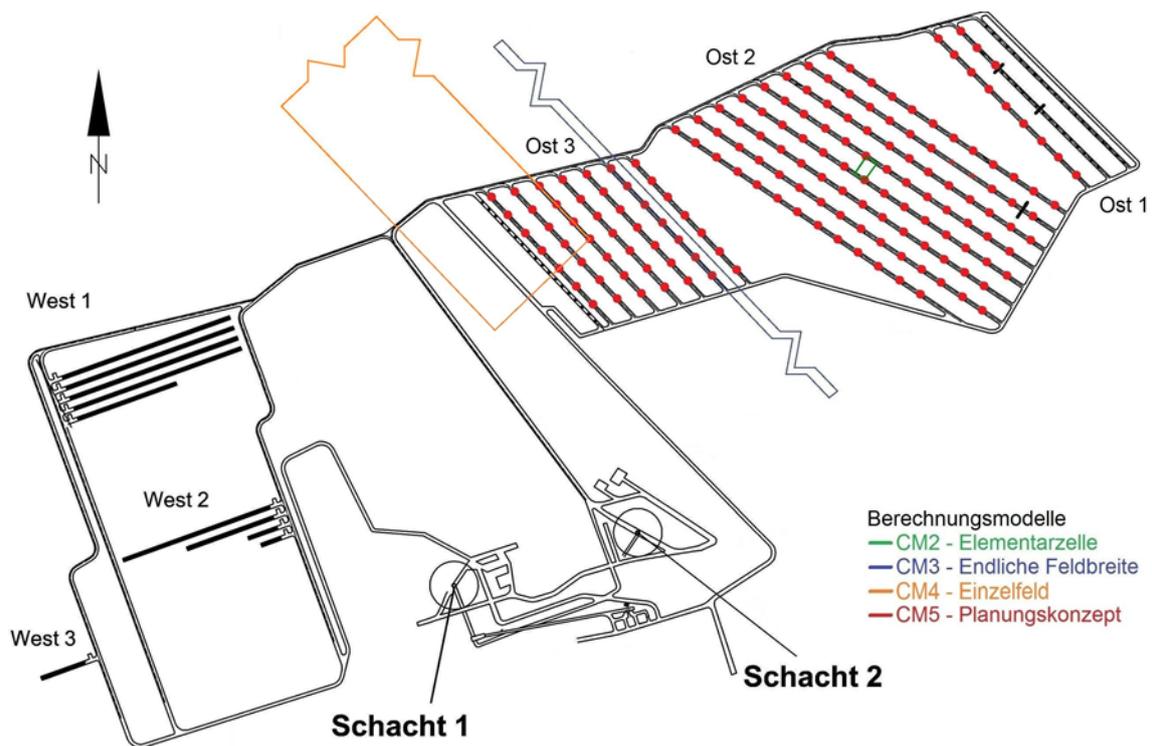
#### **3.3.3.1.2 Berechnungsmodelle**

Für die thermische Auslegung der Variante C werden wie bei der Variante B1 unterschiedliche Modelle verwendet, wobei die Berechnungen an den Modellen CM1 bis CM4 mit dem Programm FLAC<sup>3D</sup> durchgeführt werden, die Berechnungen am Modell CM5 mit dem Programm LinSour. Die einzelnen Berechnungsmodelle zielen darauf, das folgende Systemverhalten zu bestimmen:

- CM1 – Einzelbohrloch: Einlagerung in einem einzelnen Bohrloch
- CM2 – Elementarzelle: Einheitsfeld mit sehr großer Ausdehnung

- CM3 – Endliche Feldbreite: Feld mit endlicher Bohrlochzahl in einer Einlage-  
rungsstrecke bei sehr großer Streckenanzahl, Materialparameteranpassung für  
LinSour
- CM4 – Einzelfelder: Feld mit endlicher Ausdehnung
- CM5 – Planungskonzept: Feld entsprechend der Endlagerauslegung, Kapitel  
3.3.3.2

Die Berechnungsmodelle CM2 bis CM5 sind in Abb. 3.32 dargestellt. Die einzelnen Be-  
rechnungsgebiete der Modelle sind nur in der Draufsicht dargestellt. Im Berechnungs-  
modell CM5 sind die Behälter mit den stark wärmeentwickelnden Abfällen berücksich-  
tigt, das sind die Behälter mit den Brennstäben der Leistungsreaktoren und den  
verglasten Abfällen (CSD-V). Die Berechnungsmodelle sind im Detail in Anhang B.6  
beschrieben.



**Abb. 3.32** Schematische Darstellung der Berechnungsmodelle CM2 bis CM5 in der Variante B1

### 3.3.3.1.3 Berechnungsergebnisse

#### **CM1 – Einzelbohrloch: Einlagerung in einem einzelnen Bohrloch**

In den Berechnungen mit dem Modell CM1 wird die für den jeweiligen Abfalltyp kürzest mögliche Zwischenlagerzeit in der Variante C bestimmt. Sind in den folgenden komplexeren Modellen längere Zwischenlagerzeiten erforderlich, sind sie die Folge des Einflusses einer thermischen Überlagerung der eingelagerten Abfälle in benachbarten Bohrlöchern.

In allen hier untersuchten Fällen ist die minimale Zwischenlagerzeit für die Einlagerung in einem 300 m langen Bohrloch kürzer als fünf Jahre. Dieses Ergebnis steht in Übereinstimmung mit früher erzielten Ergebnissen für ein Bohrlochkonzept von unverrohrten Bohrlöchern /DBE 98/. Im Vergleich mit den Ergebnissen für die Variante B1, mit minimalen Zwischenlagerzeiten je nach Abfalltyp zwischen 17 Jahren und 34 Jahren, Kapitel 3.3.2.1.3, wird der Einfluss der Behälterbeladung auf die minimale Zwischenlagerzeit deutlich: In der Variante B1 werden die Brennstäbe von zehn DWR-BE in einem Behälter eingelagert, in der Variante C die von drei DWR-BE in einer ähnlich langen BSK-R, wobei zusätzlich nicht ein einzelnes Behältnis, sondern ein 300 m langer Kokillenstapel betrachtet wurde.

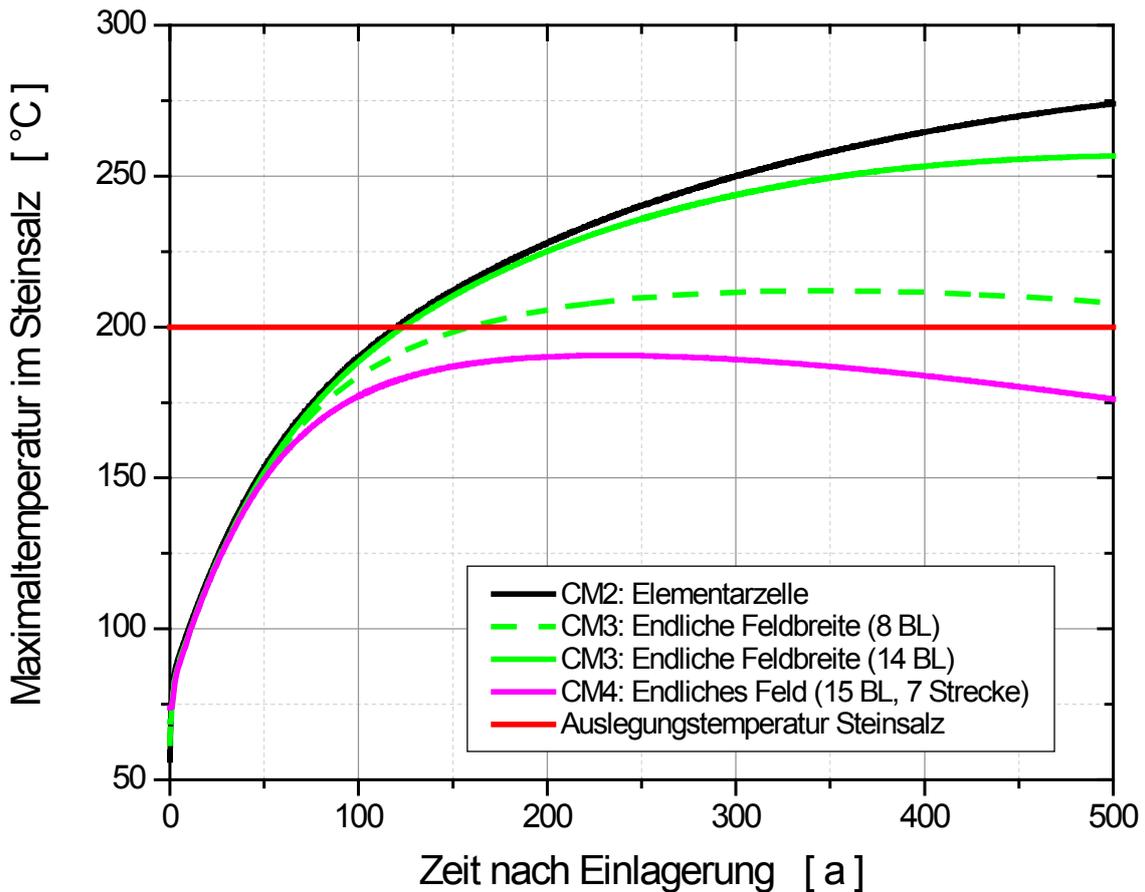
#### **CM2 – Elementarzelle: Feld mit sehr großer Ausdehnung, CM3 – Endliche Feldbreite: Feld mit endlicher Bohrlochanzahl in einer Einlagerungsstrecke bei sehr großer Streckenanzahl, CM4 – Einzelfelder: Feld mit endlicher Ausdehnung**

Mit diesen Modellvarianten wird schrittweise die Auswirkung eines sehr großen Feldes (CM2) hin zu einem Feld mit realen Abmessungen (CM4) auf die Maximaltemperatur untersucht. Den Berechnungen liegen 300 m lange Bohrlöcher im Bohrlochabstand von 50,6 m, Beladung mit 50 Kokillen mit DWR mix 89/11 bei einer Zwischenlagerzeit von 50 Jahren zugrunde.

In Abb. 3.33 ist die zeitliche Entwicklung der Temperatur am zentralen Beobachtungspunkt für die vier Varianten CM2 bis CM4 dargestellt. Es zeigt sich, dass der Wärmeeintrag bei diesen Bedingungen für ein sehr großes Einlagerungsfeld zu hoch ist, um die Auslegungstemperatur des Steinsalzes einzuhalten. Wird im Berechnungsmodell CM3 eine begrenzte Feldbreite berücksichtigt, zeigen die in Abb. 3.33 dargestellten Ergebnisse, dass der Wärmeabfluss über die seitlichen Feldränder bei einer Konfiguration mit 14 Bohrlöchern nur gering, aber bereits feststellbar ist. Wesentlich deutlicher

wird der Wärmeabfluss bei einer weiter reduzierten Anzahl an Bohrlöchern. Die mit einem Modell mit einer Feldbreite von 8 Bohrlöchern gewonnenen Ergebnisse zeigen gegenüber den Ergebnissen eines Feldes mit 14 Bohrlöchern nicht nur ein auf 212 °C deutlich reduziertes Temperaturmaximum, sondern auch den mit ca. 325 Jahren früheren Eintrittszeitpunkt dieses Temperaturmaximums. Dieser Effekt der Wärmeableitung über die seitlichen Feldgrenzen wirkt sich in dem Berechnungsmodell CM4 in beiden Flächenrichtungen aus. Bei dem in seiner Ausdehnung deutlich begrenzten Feld mit 15 Bohrlöchern und 7 Strecken reduziert sich die Maximaltemperatur noch weiter und unterschreitet mit 191 °C die Auslegungstemperatur des Steinsalzes. Zeitlich tritt dieses Temperaturmaximum ca. 130 Jahre nach Einlagerung auf.

Zusammenfassend lässt sich als Ergebnis der Berechnungsmodelle CM2 bis CM4 feststellen, dass eine Einlagerung des Abfalls unter den getroffenen geometrischen und zeitlichen Annahmen und unter Einhaltung der Auslegungstemperatur des Steinsalzes möglich ist, da nur ein aus thermischer Sicht deutlich räumlich begrenztes Endlager erforderlich ist. Angemerkt sei, dass die hier beschriebenen Berechnungsergebnisse auf einer ausschließlichen Beschickung der Bohrlöcher mit DWR mix 89/11 Kokillen basieren. Die Berücksichtigung der SWR-Brennelemente führt zu einer weiter reduzierten Maximaltemperatur.



**Abb. 3.33** Maximaltemperatur im Steinsalz in Abhängigkeit von der Zeit für unterschiedliche Modelle der Variante C, DWR mix 89/11, 50 Jahre Zwischenlagerzeit, Bohrlochabstand 50,6 m

### CM3 – Materialparameteranpassung für LinSour

Das Vorgehen zur Anpassung der konstanten Materialparameter für Berechnungen mit dem LinSour-Code entspricht grundsätzlich dem im Zusammenhang mit der Streckenlagerung beschriebenen Verfahren, Anhang B.5. Die Notwendigkeit für eine separate Anpassung ergibt sich aus der unterschiedlichen räumlichen Ausdehnung heißer Bereiche, da mit zunehmender Temperatur die Wärmeleitfähigkeit abnimmt.

Im Ergebnis ergibt sich als Parameterset für LinSour eine Wärmeleitfähigkeit von  $3,6 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  und eine Wärmekapazität von  $844 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ . Die Wärmeleitfähigkeit wird damit etwas niedriger angesetzt als bei der Streckenlagerung und entspricht dem in /DBE 92/ verwendeten Wert. Dort ist allerdings die Wärmekapazität etwas höher. Dass sich aus der Anpassung bei der Bohrlochlagerung ein geringerer Wert für die Wärmeleitfähigkeit ergibt als bei der Streckenlagerung, ist das Ergebnis der räumlich konzen-

trierteren Einlagerung des Abfalls bei der Bohrlochlagerung. Auch wenn die Maximaltemperatur in beiden Einlagerungsvarianten gleich ist, wird bei der Bohrlochlagerung im Nahfeld um die Abfälle ein insgesamt höheres Temperaturniveau erzielt. Bei höherem Temperaturniveau fällt die Wärmeleitfähigkeit geringer aus, so dass dieser Effekt sich auch in der Anpassung der LinSour-Parameter bemerkbar macht.

In Anhang B.7 sind die Ergebnisse der Vergleichsrechnung der Bohrlochlagerung zusammengestellt.

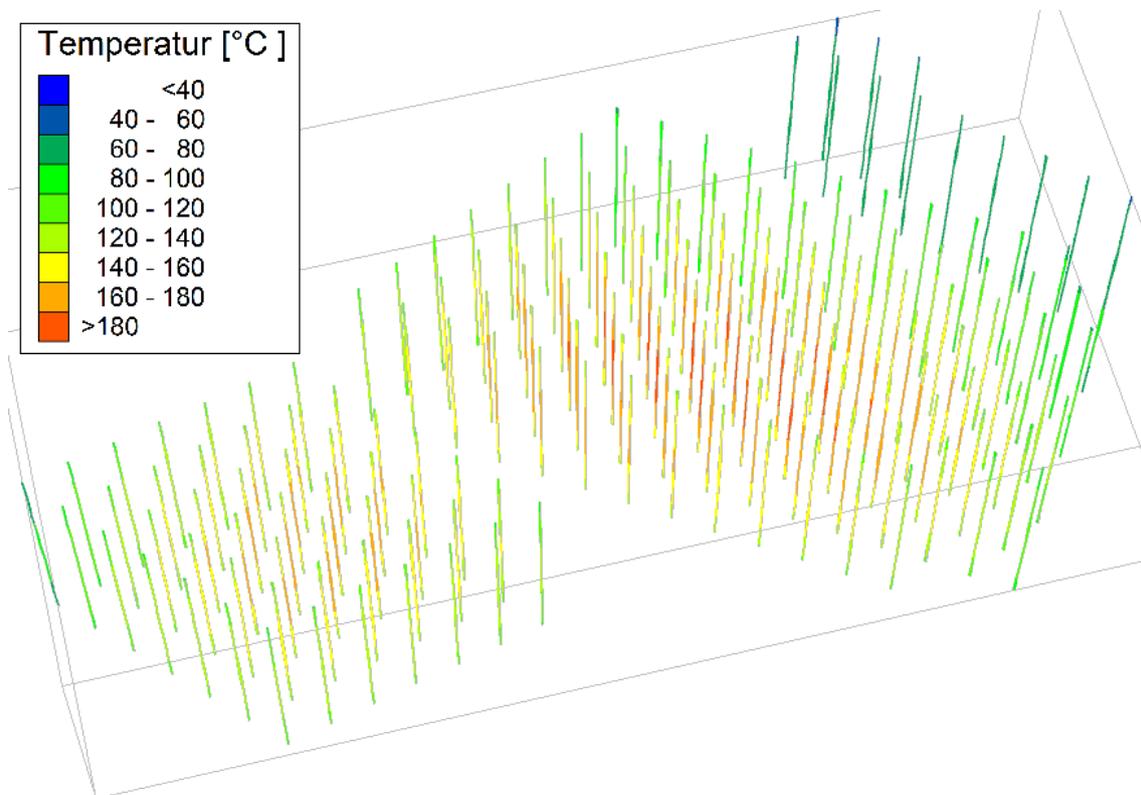
### **CM5 – Planungskonzept: Feld entsprechend der Endlagerauslegung**

Die Einflüsse einer gegenseitigen thermischen Beeinflussung benachbarter Behälter und aus Randlagen auf das Temperaturverhalten sind in den vorangegangenen Modellen dargestellt worden. Im Modell CM5 wurde das thermische Verhalten der Behälteranordnung entsprechend dem Planungskonzept untersucht. Dazu wurden im Modell CM5 die mit stark wärmeentwickelnden Abfällen beladenen Bohrlöcher mit ihrer abfallspezifischen Wärmeleistung und ihrer Zwischenlagerzeit sowie ihrem individuellen Einlagerungszeitpunkt berücksichtigt (Abb. 3.32 und Abb. 3.34). Die weniger stark wärmeentwickelnden Abfälle der Forschungsreaktoren und die Strukturteile blieben unberücksichtigt. Bohrlöcher mit diesen Abfällen sind in Abb. 3.32 schwarz gekennzeichnet und in Abb. 3.34 unberücksichtigt.

Die Berechnungen dieser Variante ermöglichen eine Aussage über die Temperaturverteilung im Endlager unter der Berücksichtigung der Einlagerung der unterschiedlichen Abfälle und ihrer räumlichen Platzierung in den einzelnen Einlagerungsfeldern. In Abb. 3.34 ist die Temperaturverteilung entlang der Verrohrungen zum Zeitpunkt von 300 Jahren nach Einlagerungsbeginn dargestellt. Dieser Zeitpunkt liegt im Zeitbereich mit maximaler Temperaturbelastung des Steinsalzes.

Am Temperaturfeld ist die Einlagerung der unterschiedlichen Abfalltypen erkennbar. Behälter mit CSD-V sind in den hier enthaltenen Einlagerungsstrecken von Ost 1 und in den ersten Strecken von Ost 2 eingelagert. Hier wird eine geringere Temperatur ausgewiesen als in der letzten Strecke des Feldes Ost 2, obwohl dort nach Süden hin kein benachbartes Feld anschließt. Darüber hinaus zeigt der Vergleich der Maximaltemperaturen im zentralen Bereich der Felder Ost 2 und Ost 3 den Einfluss, der sich durch die Wärmeableitung über die seitlichen Ränder ergibt. Die Maximaltemperatur im Einlagerungsfeld Ost 3 ist erkennbar niedriger als die in Ost 2. Als dritter Aspekt, der

ebenfalls mit der Wärmeableitung über die seitlichen Ränder verknüpft ist, zeigt sich der Einfluss des Raumbedarfs für die Querschläge zwischen den Feldern und dem zusätzlichen Raumbedarf für die Drehung der Felder.

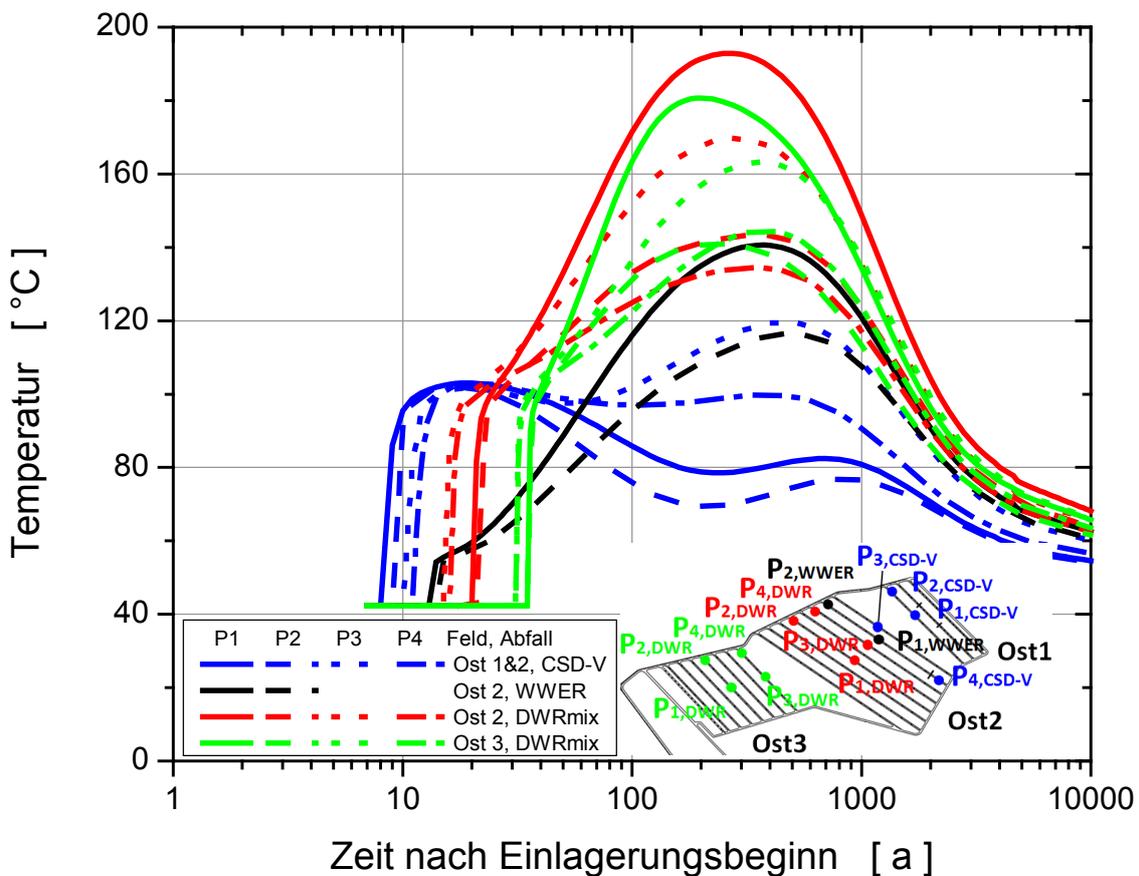


**Abb. 3.34** Temperaturverteilung entlang der Verrohrung der Einlagerungsbohrlöcher mit stark wärmeentwickelnden Abfällen zum Zeitpunkt von 300 Jahre (nur Einlagerungsbohrlöcher) nach Einlagerungsbeginn, Berechnungsmodell CM5 (Endlagerauslegung)

In Abb. 3.35 bis Abb. 3.39 ist der zeitliche Temperaturverlauf an unterschiedlichen Stellen des Endlagers dargestellt. Für die Bohrlöcher (BL) wird ein Bezeichnungsschlüssel verwendet, der die Bohrlochlage im Endlager charakterisiert. Der Schlüssel setzt sich aus den Nummern des Einlagerungsfeldes entsprechend Abb. 3.40, der Streckennummer im jeweiligen Feld, im Osten beginnend, und der Bohrlochnummer in der jeweiligen Strecke, beginnend im Süden, zusammen. Insgesamt ergibt sich der Bezeichnungsschlüssel zu FeldNr.StreckenNr.BohrlochNr.

In Abb. 3.35 ist der Einfluss von Abfalltyp und der Position des Abfalls im Einlagerungsfeld dargestellt. Bezugspunkt ist jeweils ein Punkt auf dem Außenmantel der Verrohrung in der Tiefe von 1.025 m gegenüber der Geländeoberkante. Für die einzelnen

Abfalltypen sind Bohrlöcher mit charakteristischer Position aus den Einlagerungsfeldern ausgewertet worden, P1 bis P4. Bezogen auf den jeweiligen Abfalltyp beschreibt P1 eine zentrale Lage im Feld, P2 eine Randlage der zentralen Strecke, P3 eine mittlere Position einer Randstrecke und P4 eine Randlage der Randstrecke. Für die Abfalltypen CSD-V und WWER wird nur eine geringe Anzahl an Bohrlöchern benötigt, daher kann die o.g. Positionierung nicht vollständig und konsistent angewendet werden. Für den DWR-Abfall sind separate Auswertungen für die beiden unterschiedlich großen Felder in der Abbildung enthalten.



**Abb. 3.35** Zeitlicher Verlauf der Temperatur an der Oberfläche ausgewählter Verrohrungen der Einlagerungsfelder in einer Tiefe von 1.025 m, Berechnungsmodell CM5 (Endlagerauslegung)

Im thermischen Verhalten der mit CSD-V beladenen Bohrlöcher zeigt sich ebenso wie bei den WWER-Abfällen der Einfluss der umliegenden Bohrlöcher. Der Anfangsbereich entspricht noch dem abfalltypischen Verhalten. In der längeren Haltezeit der Temperatur des BL1.3.6 macht sich der Einfluss der Lage dieses Bohrlochs in der Mitte der Strecke bemerkbar, der erneute Temperaturanstieg im Zeitbereich von 200 bis 900

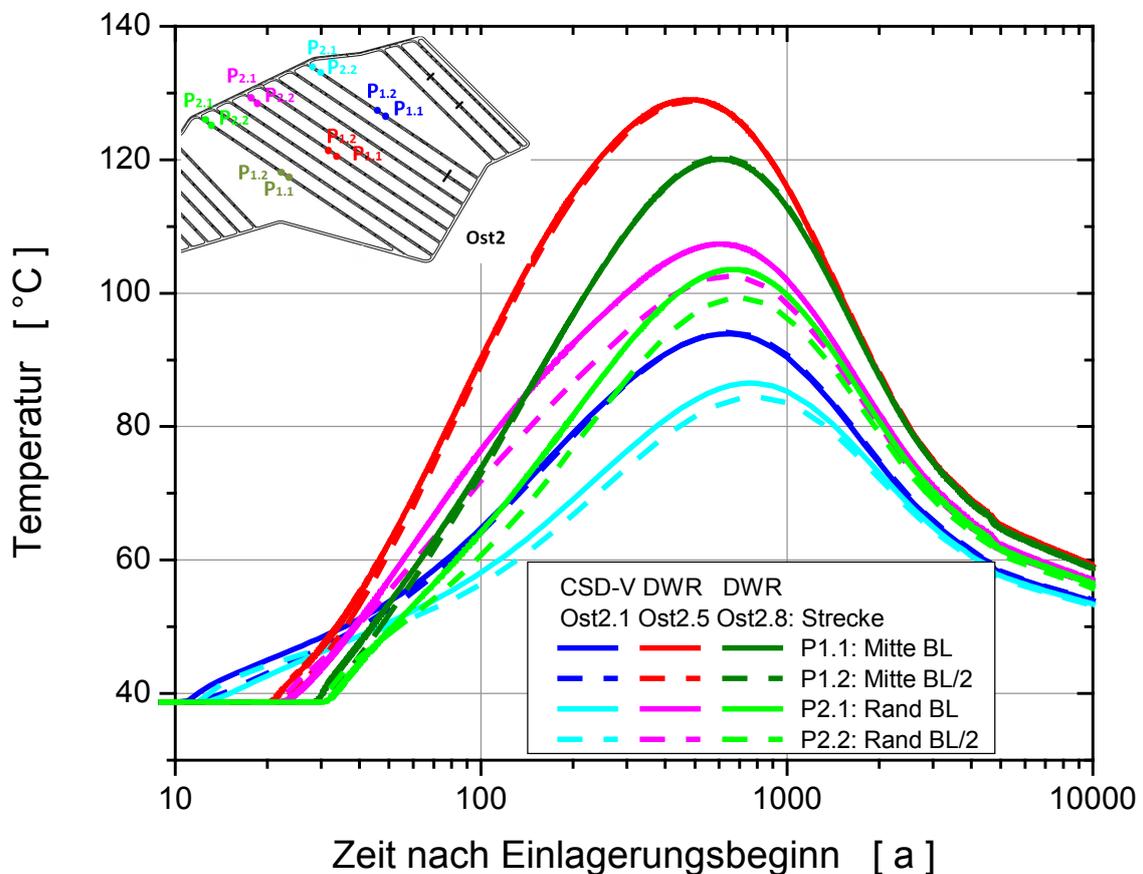
Jahren ist eine Folge der Wärmeleitung von den heißen DWR/SWR-Abfällen. Das zeitlich spätere Auftreten am BL1.3.6 gegenüber BL2.1.8 hat seine Ursache im größeren Abstand des ersten Bohrlochs zum DWR-Abfall, ebenso wie der wesentlich geringere Temperaturanstieg in diesem Zeitraum.

Obwohl sich WWER-Brennelemente in Form der hier zugrunde gelegten Konditionierung als thermisch unproblematisch erwiesen haben, werden an den mit diesem Abfall beladenen Bohrlochern höhere Maximaltemperaturen erreicht, als bei CSD-V.

Die absolut höchste Temperatur wird im BL 2.5.8 mit ca. 193 °C erreicht. Der Wärmeabfluss aus dem DWR/SWR-Bereich macht sich hier in einem weit höheren Umfang bemerkbar als bei CSD-V. Der Einfluss der unterschiedlich großen Felder zeigt sich beim Vergleich der Maximaltemperaturen des DWR/SWR-Abfalls für die zentrale Lage. Die Temperaturdifferenz im Maximum beträgt ca. 12 K. Zu den Rändern tritt ein deutlicher Temperaturabfall auf, wobei das mittlere Bohrloch der Randstrecke erkennbar im Einflussbereich des benachbarten Einlagerungsfeldes liegt.

Der zeitliche Verlauf der Temperatur in den Überfahrungen ist am Beispiel von ausgewählten Strecken des Einlagerungsfeldes Ost 2 in Abb. 3.36 dargestellt. Es ist jeweils das Temperaturverhalten unmittelbar über einem Bohrloch dargestellt sowie für den Punkt, der auf der Hälfte des Weges zum nächsten Bohrloch liegt, bzw. beim letzten Bohrloch in der Strecke zu dem vorangegangenen Bohrloch. Wie im Einlagerungskonzept vorgesehen, beginnt der Kokillenstapel 10 m unterhalb der Sohle der Überfahrungsstrecken. Als größtes Feld mit den heißesten Abfällen treten in Ost 2 die höchsten Temperaturen auf. Die auftretende Maximaltemperatur beträgt ca. 130 °C im zentralen Bereich, unabhängig davon, ob es sich um den Punkt unmittelbar über dem Bohrloch oder auf halbem Weg zum benachbarten Bohrloch handelt. Eine Maximaltemperatur von über 120 °C wird in der fünften Strecke im Bereich zwischen dem fünften und zwölften Bohrloch ausgewiesen. In Richtung der Randstrecken fällt das Temperaturmaximum deutlich ab. Der Temperaturabfall ist in Richtung auf das thermisch aktivere Einlagerungsfeld Ost 3 geringer als der zu dem aus thermischer Sicht nur sehr gering belasteten Feld Ost 1. Die Maximaltemperaturen in Ost 1 überschreiten nicht die 70 °C, in den übrigen beiden Feldern liegt die Maximaltemperatur mit Ausnahme der exponierten Ecklagen deutlich über 80 °C. Mit Blick auf die Rückholung lässt sich feststellen, dass die Temperatur über den gesamten relevanten Zeitraum von ca. 600 Jahren ansteigt bzw. gerade ihr Maximum erreicht hat. D. h., dass bei einer Rück-

holung zu einem frühen Zeitpunkt thermisch günstigere Bedingungen vorliegen als am Ende des für die Rückholung zu betrachtenden Zeitraums.

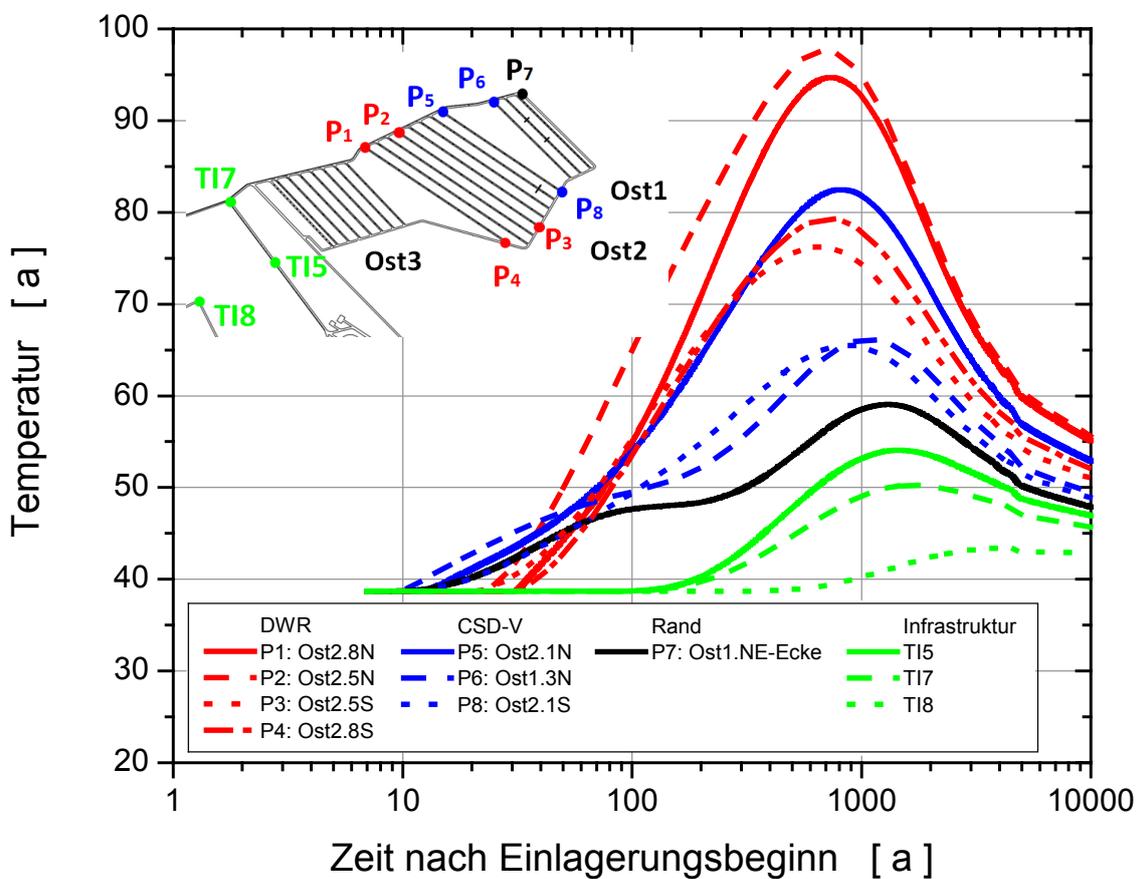


**Abb. 3.36** Zeitlicher Verlauf der Temperatur auf der Sohle der Überfahrungen, Tiefe 870 m, im Einlagerungsfeld Ost 2, Berechnungsmodell CM5 (Endlagerauslegung)

In Abb. 3.37 ist das zeitliche Verhalten der Temperatur in der Umfahrung dargestellt. Die Umfahrung liegt in etwas größerer Entfernung zu den Einlagerungsbohrlöchern als die Überfahrung. Entsprechend fallen die Maximaltemperaturen geringer aus. Dabei verschiebt sich der Zeitpunkt der Maximaltemperaturen zu späteren Zeitpunkten. Insgesamt wird in der Umfahrung zu keinem Zeitpunkt eine Temperatur von 100 °C überschritten. In der nördlichen Richtstrecke stellt sich im Bereich der DWR-/SWR-Einlagerung ein vergleichsweise konstantes Temperaturverhalten ein. Die Maximaltemperatur liegt in diesem Bereich über die gesamte Länge oberhalb von 80 °C und im Bereich zwischen Ost 2.3 und Ost 3.4 über 90 °C. In der südlichen Richtstrecke macht sich ihre Verdrehung und die unterschiedliche Feldbreite zwischen den Feldern Ost 2 und Ost 3 bemerkbar. Trotz der Feldbreite von Ost 2 wird hier nur eine Maximaltempe-

ratur von 75 °C erreicht. Die Feldbreite von Ost 2 macht sich dann aber in dem weiteren Verlauf der Umfahrung in Richtung auf das Feld Ost 3 bemerkbar und bei der südlichen Umfahrung von Ost 3 selbst. In beiden Fällen steigen die Maximaltemperaturen wieder auf über 90 °C an.

Der thermische Bereich zu Beginn des Betrachtungszeitraums fällt moderat aus. Innerhalb der ersten 100 Jahre steigen die Temperaturen auf maximal 65 °C an, im Zeitraum bis 200 Jahre bis auf maximal 80 °C. Die Bandbreite zu diesem Zeitpunkt beträgt für die DWR-Einlagerungsfelder 55 °C bis 80 °C. In dem 200 a-Zeitraum erreicht die Temperatur in der Umfahrung des Feldes Ost 1 maximal 50 °C.

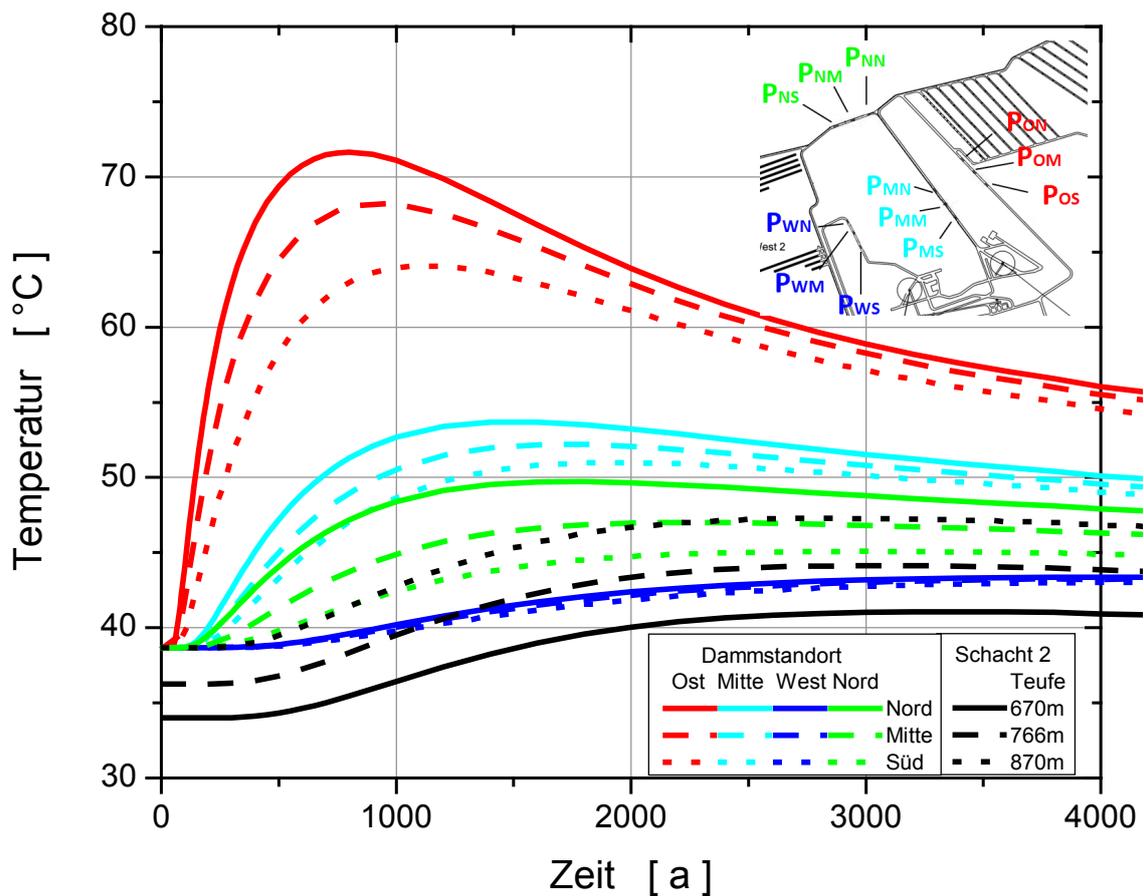


**Abb. 3.37** Zeitlicher Verlauf der Temperatur entlang der Umfahrung und im Infrastrukturbereich, Teufe 870 m, Berechnungsmodell CM5 (Endlagerauslegung)

In Abb. 3.38 ist der zeitliche Verlauf der Temperatur an den Streckenverschlüssen dargestellt. Als Maximalwert wird ein Wert von 72 °C erreicht. Gegenüber der Variante B1 ist dieser Wert ca. 15 K höher und wird mit einem Zeitpunkt von ca. 750 Jahren nach

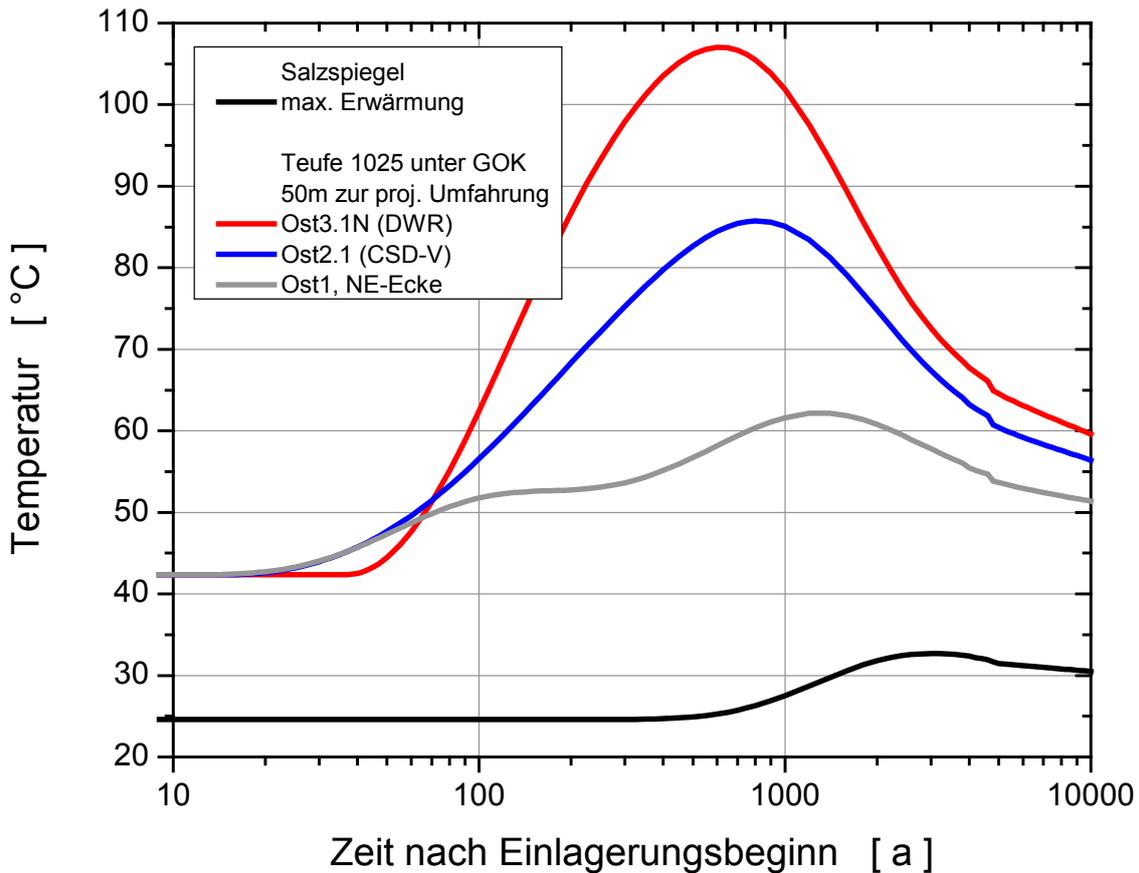
Einlagerungsbeginn auch zeitlich später erreicht. An dieser Stelle wirkt sich die konzeptbedingt räumlich konzentriertere Einlagerung des Abfalls aus.

Zusätzlich ist in Abb. 3.38 der Temperaturverlauf für drei ausgewählte Teufen des Schachtes 2 dargestellt. Die maximale Erwärmung beträgt je nach hier ausgewählter Teufe zwischen 7 K und 9 K.



**Abb. 3.38** Zeitlicher Verlauf der Temperatur an den Streckenverschlüssen und entlang der Schachtachse, Berechnungsmodell CM5 (Endlagerauslegung)

In Abb. 3.39 ist der zeitliche Temperaturverlauf dargestellt, der sich in der Teufe von 1.025 m bei einem im konzeptionellen Mindestabstand anstehenden Kalilager ergibt. Die Maximaltemperatur beträgt 108 °C. Zusätzlich ist die Temperatur am Salzspiegel dargestellt. Es ergibt sich eine maximale Erwärmung um 8 K.



**Abb. 3.39** Zeitlicher Verlauf der Temperatur von ausgewählten Punkten im Abstand von 50 m zur Umfahrung projiziert in die Teufe von 1.025 m und am Salzspiegel, Berechnungsmodell CM5 (Endlagerauslegung)

### Zusammenfassung der Berechnungsergebnisse zur Variante C

Die unterschiedlichen Auslegungstemperaturen für Stein- und Kalisalz sind in dem hier zugrunde gelegten Einlagerungskonzept C sicher eingehalten. Auslegungsbestimmend ist dabei das Verhalten der mit DWR-Brennstäben im Brennstoffmix von 89 %  $UO_2$  und 11 % MOX beladenen Kokillen. Auf der Grundlage der in AP 5 /BOL 11/ festgelegten Abstände ergibt sich eine Mindestzwischenlagerzeit von 47 Jahren. Mit den Außerbetriebnahmen der letzten deutschen Kernkraftwerke im Jahr 2022 ergibt sich daraus ein Betriebszeitraum für das geplante Endlager, der nicht vor ca. 2070 enden kann.

Die Analysen weisen einen zentralen Bereich mit hohen Temperaturen aus. Durch die vergleichsweise geringe Größe der Einlagerungsfelder zeigt sich jedoch auch an vielen Stellen der Einfluss der Wärmeableitung über den Rand. Die Integration von Abfällen mit geringer Wärmeleistung ist eine Möglichkeit, solche Randlagen in größeren Einlagerungsfeldern künstlich zu schaffen.

Eine Rückkühlung des Gebirges im Arbeitsumfeld stellt im Fall der Bohrlochlagerung geringere Anforderungen als bei der Streckenlagerung. Temperaturen über z. B. 110 °C werden zeitlich und räumlich im engeren Bereich überschritten. Entsprechend geringer ist die erforderliche Kühlleistung. Innerhalb des Bohrlochs liegen aber vergleichbar hohe Temperaturen wie bei der Streckenlagerung vor.

In den Umfahungsstrecken überschreitet die Maximaltemperatur zu keinem Zeitpunkt 100 °C. In dem für die Salzgruskomaktion relevanten Anfangszeitraum wird zum Zeitpunkt von 100 Jahren nach Einlagerungsbeginn eine Spannweite in der Temperatur der Umfahungsstrecke erreicht, die bei den DWR-beladenen Feldern zwischen 45 °C und 65 °C liegt. Die Temperatur im Einlagerungsfeld Ost 1 ist zu diesem Zeitpunkt unter 50 °C.

An den Streckenverschlüssen wird mit ca. 72 °C die maximale Erwärmung am Standort Ost erreicht, entlang der Achse von Schacht 2 ergibt sich in der Teufe zwischen 670 m und 870 m eine maximale Erwärmung zwischen 7 K und 9 K.

Als thermische Belastung geologischer Trennflächen ist im Kalilager mit Temperaturen bis ca. 110 °C zu rechnen und am Salzspiegel mit einer Erwärmung um ca. 8 K.

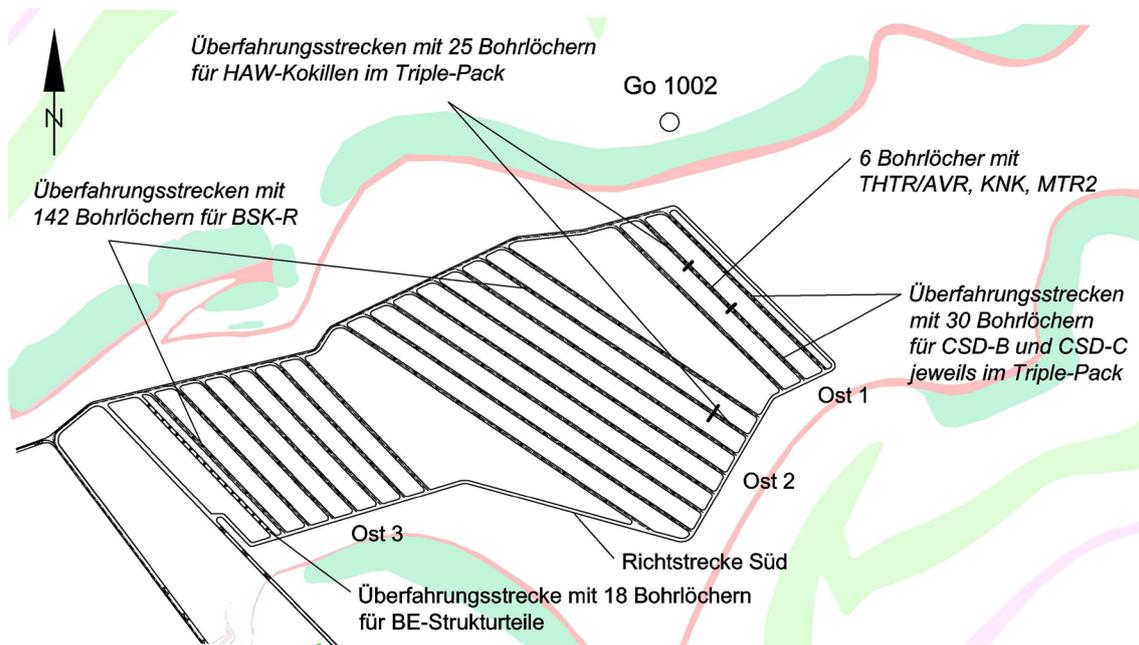
### **3.3.3.2 Planung der Einlagerungsfelder**

Für die direkte Endlagerung ausgedienter Brennelemente, wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle und Brennelement-Strukturteile ist in /BOL 11/ bereits ein Konzept zur Einlagerung dieser Abfälle in Form der Bohrlochlagerung beschrieben worden. Demnach werden im Ostflügel des Endlagerbergwerks Gorleben Einlagerungsfelder für die Bohrlochlagerung ausgewiesen. Unter Zugrundelegung eines verringerten Abfallmengerüsts und den Ergebnissen der thermischen Berechnungen werden drei Einlagerungsfelder mit Bohrlöchern benötigt. Diese werden verrohrt mit jeweils 50 BSK-R respektive Triple-Pack gefüllt. In dem dafür ausgelegten Grubengebäude sind dies (Abb. 3.40):

- Feld Ost 1: Triple-Pack CSD-B und -C, Kokillen THTR/AVR, KNK und MTR 2 und Triple-Pack HAW-Kokillen
- Feld Ost 2: Triple-Pack HAW-Kokillen und BSK-R
- Feld Ost 3: BSK-R und BSK-R mit BE-Strukturteilen

Im Vergleich zu den in /BOL 11/ beschriebenen Planungen führt die Verringerung des Abfallmengengerüsts zu einer Verringerung der erforderlichen Anzahl an Überfahrungsstrecken im Feld Ost 1, eine Belegungsänderung in den ersten Strecken von Ost 2 und eine geänderte Einlagerungsreihenfolge.

In Abb. 3.40 ist der östlich der beiden Schächte angelegte Teil des Grubengebäudes mit den jeweiligen Einlagerungsfeldern für wärmeentwickelnde Abfälle dargestellt.



**Abb. 3.40** Einlagerungsfelder Ost – Bohrlochlagerung für ausgediente Brennelemente, wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle sowie Brennelement-Strukturteile

Da die Transport- und Einlagerungstechnik von POLLUX®-Behältern unverändert bleibt, kann auf die Darstellung in /BOL 11/ verwiesen werden. In Tab. 3.11 ist die Belegung der Einlagerungsfelder strecken- und bohrlochgenau dargestellt.

**Tab. 3.11** Belegung der Einlagerungsfelder (Bohrlochlagerung, Variante C)

Einlagerungs- feld-Nr. <sup>1)</sup>	Endlager- behälter	Bohr- löcher	Anzahl Endlager- behälter pro Bohr- loch	Gesamt- anzahl End- lager- behälter	Bohrloch- strecken- abstand [m]	Bohrloch- abstand in Strecken- achse [m]
Ost 1						
Ost 1.1	Triple-Pack CSD- B und -C	21	50	1.050	20,0	20,0
Ost 1.2 I - VIII	Triple-Pack CSD- B und -C	8	50	400		
Ost 1.2 IX	Triple-Pack CSD- B und -C	1	21	21		
Ost 1.2 X - XIV	Kokille THTR/AVR, KNK, MTR2	5	50	250		
Ost 1.2 XV	Kokille THTR/AVR, KNK, MTR2	1	40	40		
Ost 1.2 XVI - XVIII	Triple-Pack HAW- Kokillen	3	50	150	44,0	50,6
Ost 1.3	Triple-Pack HAW- Kokillen	9	50	450		50,6
Ost 2						
Ost 2.1	Triple-Pack HAW- Kokillen	12	50	600	44,0	50,6
Ost 2.2 I	Triple-Pack HAW- Kokillen	1	45	45		
Ost 2.2 II - XII	BSK-R	11	50	550		
Ost 2.3 - 2.4	BSK-R	26	50	1.300		
Ost 2.5 - 2.6	BSK-R	28	50	1.400		
Ost 2.7	BSK-R	15	50	750		
Ost 2.8	BSK-R	13	50	650		
Ost 3						
Ost 3.1 - 3.6	BSK-R	42	50	2.100	44,0	50,6
Ost 3.7 I - VI	BSK-R	6	50	300		
Ost 3.7 VII	BSK-R	1	18	18		
Ost 3.8 I - XVII	BSK-R mit BE- Strukturteilen	17	50	850	20,0	20,0
Ost 3.8 XVIII	BSK-R mit BE- Strukturteilen	1	24	24		

<sup>1)</sup> Numerisch = Feld/Strecke; Römisch = Bohrlochnummer beginnend im Süden

### 3.3.3.2.1 Technisches Lösungskonzept zur rückholbaren Bohrlochlagerung

Im Folgenden werden die technischen Voraussetzungen beschrieben, die in Abweichung zu der Beschreibung der Bohrlochlagerung in /BOL 11/ eine rückholbare Bohrlochlagerung ermöglichen.

Hierzu gehören die Dimensionierungen

- der BSK-R,
- der Verrohrung und
- des Bohrlochs.

sowie der Einbau der Verrohrung, die Abweichungen beim Einlagerungsvorgang sowie der Rückholungsvorgang und seine maschinellen Anforderungen.

Zur Dimensionierung des erforderlichen Bohrlochdurchmessers ist im ersten Schritt die BSK-R auszulegen /NSE 12/.

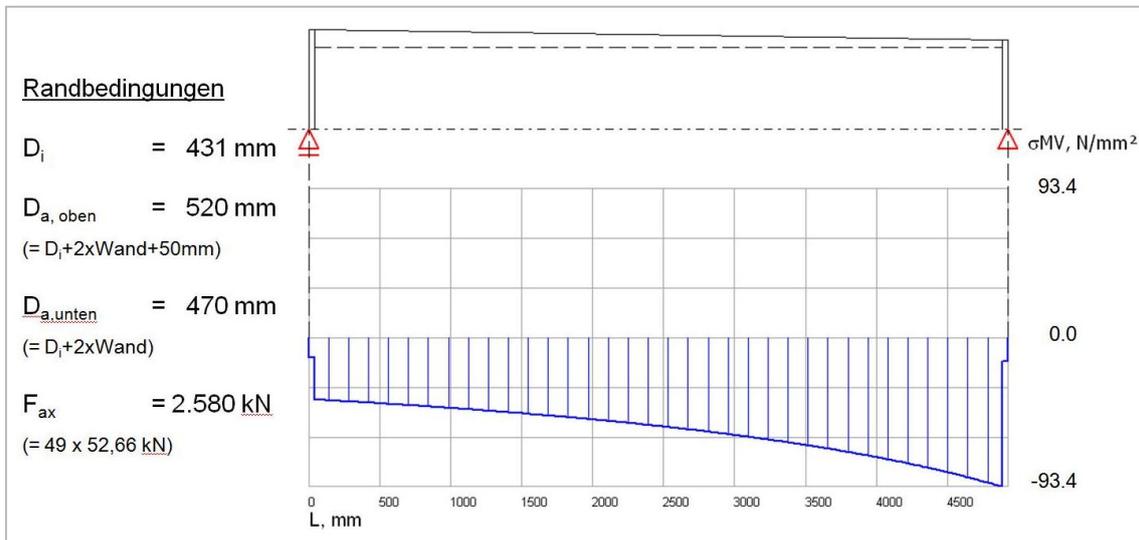
#### **Dimensionierung der BSK-R**

Da der maximal zu erwartende Gebirgsdruck von 40 MPa /FIL 10/ im Konzept der verrohrten Bohrlochlagerung nicht mehr von der Kokille, sondern von der Verrohrung aufgenommen werden muss, wird die BSK-R so ausgelegt, dass eine Stapelbarkeit innerhalb der Verrohrung ohne Lastabtrags Elemente möglich ist. Im Hinblick auf den Rückholungsprozess wird die BSK-R zur Reduzierung der Reibkräfte konisch ausgeführt.

Der Ringraum zwischen den Kokillen und der Rohrwandung sowie die Bereiche zwischen den Kokillen werden mit einem Versatzmaterial verfüllt. Dieses gewährleistet die thermische Anbindung an die Verrohrung und das Gebirge. Um eine Rückholbarkeit der Kokillen zu ermöglichen, muss dieses Versatzmaterial dauerhaft seine Rieselfähigkeit behalten. Für die Auswahl des Versatzmaterials besteht Forschungsbedarf. Für die Berechnungen innerhalb der VSG wurden die Materialkennwerte von Quarzsand herangezogen.

Zur Überprüfung der Stapelbarkeit der Kokillen ohne zusätzliche Lastabtrags Elemente wurde die Normalspannung bei der Stapelung von 50 BSK-R ermittelt (Abb. 3.41). Als

Werkstoff wurde exemplarisch EN-GJS-400-15 ausgewählt. Es wurde hierfür eine maximale Normalspannung von  $93 \text{ N/mm}^2$  ermittelt. Die statische Bauteilfestigkeit für den Lastfall Druck liegt bei  $265 \text{ N/mm}^2$ .



**Abb. 3.41** Ermittlung der Normalspannung für eine Stapelung von 50 Kokillen

Weiterhin wurde exemplarisch die Reibkraft auf die Kokillen durch den Versatz ermittelt. Nach /FEU 99/ wirkt durchschnittlich ein Druck von  $0,01 \text{ MPa}$  auf den Behälter. Die Mantelfläche beträgt  $A \approx 7,5 \text{ m}^2$ . Mit einem angenommenen Reibwert von  $\mu = 0,27$  ergibt sich eine theoretische Reibkraft von  $FR \approx 20.330 \text{ N}$ . Diese Reibkraft wirkt bei der Lagerung als Stützkraft, sie muss bei einer Rückholung zusätzlich zur Gewichtskraft überwunden werden.

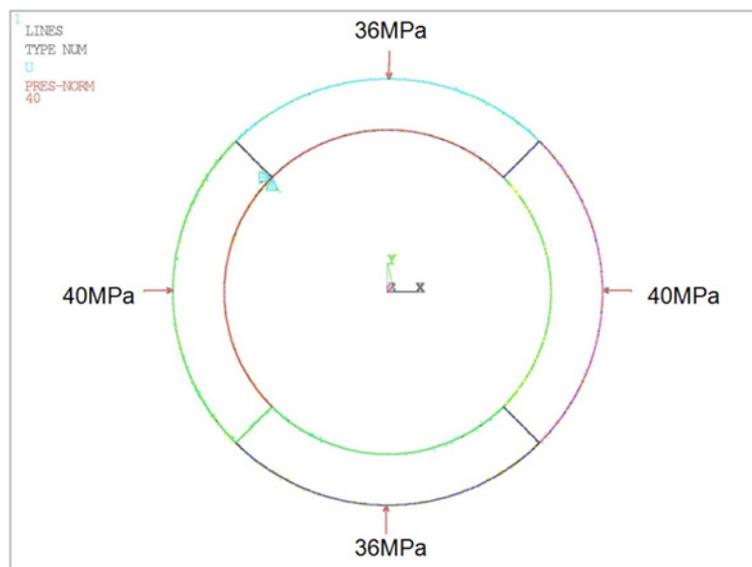
Die Wandstärke der rückholbaren Kokille (Abb. 2.1) beträgt am unteren Ende  $19,5 \text{ mm}$ , am oberen Ende  $44,5 \text{ mm}$ . Im Vergleich mit den Werkstoffdaten zeigen die Berechnungen, dass die Kokille mit ausreichender Sicherheit dimensioniert ist. Im zweiten Schritt ist die Verrohrung auszulegen.

### Auslegung der Verrohrung

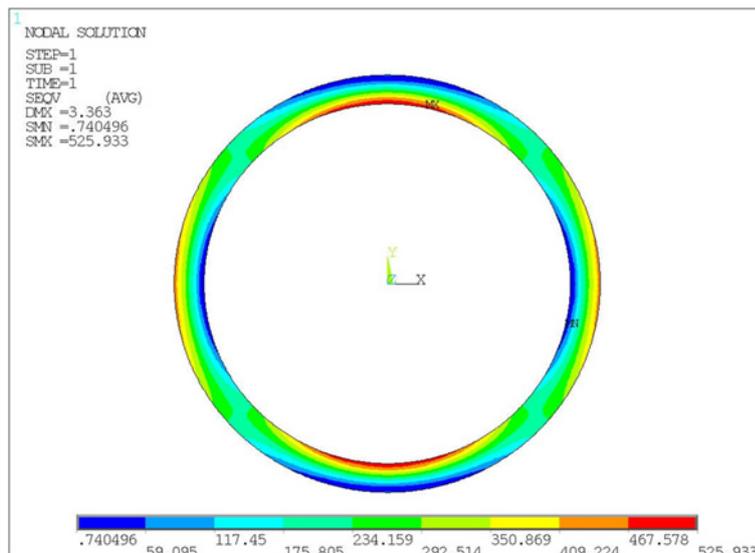
Die BSK-R haben am oberen Ende einen maximalen Durchmesser von  $520 \text{ mm}$ . Für das Einbringen des Versatzmaterials wird ein Ringspalt von  $50 \text{ mm}$  vorgesehen. Der Innendurchmesser der Verrohrung beträgt somit  $620 \text{ mm}$ . Bei einer gewählten Wandstärke der Verrohrung von  $50 \text{ mm}$  beträgt der Außendurchmesser  $720 \text{ mm}$ .

Die Temperatur im verrohrten Bohrloch und angrenzendem Salzgestein wird sich durch die Wärmeleistung der Abfallgebinde stark erhöhen. Aufgrund des Temperaturanstiegs wird sich das Steinsalz ausdehnen oder versuchen sich auszudehnen, wodurch Wärmespannungen entstehen. Diese führen zu Kriechvorgängen im Steinsalz. Die Ausdehnung in Folge der Temperaturerhöhung und das Kriechverhalten des Salzes wird zu einer Deformation des verrohrten Bohrloches führen, die jedoch so gering ist, dass sie bei den gewählten Spaltmaßen die Rückholung nicht gefährdet /FOK 03/.

Nach /FIL 10/ ist mit einer maximalen Belastung in horizontaler Richtung von ca. 40 MPa zu rechnen. Die Belastung ist richtungsabhängig, d. h. auf dem Umfang variiert die Belastung. Diese Richtungsabhängigkeit in Form des Quotienten von maximal horizontaler Druckbelastung zu min. horizontaler Druckbelastung weist über eine weite Strecke bis einschließlich maximaler Belastung einen Wert von bis ca. 1,1 auf, so dass zum Zeitpunkt der maximalen Belastung auf dem Umfang eine Druckspannung zwischen ca. 36 MPa und 40 MPa vorliegt (Abb. 3.42).



**Abb. 3.42** Modell asymmetrische Druckverteilung auf Rohrwandung



**Abb. 3.43** Ermittlung Belastung auf Rohrwandung (Wandstärke 50 mm)

Unter den genannten Randbedingungen der zu erwartenden Gebirgsdrücke und dem definierten Rohriinnendurchmesser wurden Auslegungsberechnungen zur Ermittlung der Wandstärke der Verrohrung durchgeführt.

Für den betrachteten Lastfall und eine angenommene Wandstärke von 50 mm wurde eine maximale Normalspannung von  $526 \text{ N/mm}^2$  ermittelt. Es ergibt sich eine elliptische Verformung der Verrohrung mit einer maximalen Abweichung von 3,4 mm auf der x-Achse. Zur Aufnahme der zu erwartenden Gebirgsdrücke ist die gewählte Wandstärke von 50 mm bei Verwendung des Werkstoffes EN-GJS-400-15 ausreichend. Bei der Verwendung eines Werkstoffes mit einer höheren Festigkeit kann die Wandstärke der Verrohrung ggf. verringert werden.

### Dimensionierung des Bohrlochs

Auf der Basis des äußeren Durchmessers der Verrohrung von 720 mm wird für den Durchmesser des Bohrlochs ein Durchmesser von 760 mm vorgeschlagen, um das Einbringen der Verrohrung zu gewährleisten. Das mögliche Abweichen beim Bohren des Bohrloches aus der Senkrechten ist für das Einbringen der Verrohrung nicht relevant, da die Verrohrung dem Bohrloch folgt und ohne weiteres in der Lage ist, Krümmungen mit den hier zu erwartenden Radien ohne relevante Einbußen an die Formstabilität zu realisieren. Eine Anforderung, die Verrohrung absolut lotrecht einzubauen, besteht nicht.

Aus der Verrohrungslänge (ca. 300 m), dem gewählten Material und der ermittelten Rohrgeometrie ergibt sich das Gesamtgewicht der Verrohrung von ca. 225 Mg. Dieses Gewicht ist mit einem Hubgerüst zum Einbringen von Verrohrungen zu halten. In der Tiefbohrtechnik ist es Stand der Technik, Verrohrungen von weit über 400 Mg zu handhaben.

So hat beispielsweise ein deutscher Hersteller im Bereich der Tiefbohrtechnik derzeit Anlagen von 250 Mg bis 410 Mg Hakenlast im Lieferumfang. Ein solches, exemplarisch verwendbares Gerät, hat eine Einsatzhöhe von ca. 7,0 m mit Rohrschüssen von ca. 1,5 m. Abb. 3.44 zeigt die Dimensionen einer solchen Maschine am Beispiel einer Raise-Boring-Maschine /HER 10/.



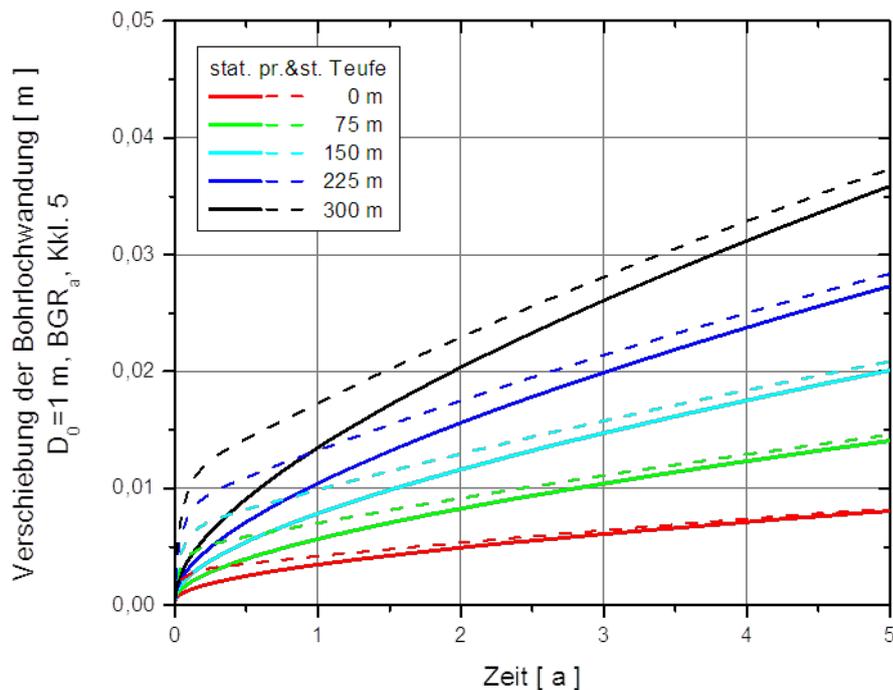
**Abb. 3.44** Raise-Boring-Maschine /HER 10/

Des Weiteren wird in der Petro-Industrie Spezialequipment für die Handhabung der Verrohrung eingesetzt. Hier zum einen „Slips“, manuelle oder automatische Abfangkeile, welche ein Absetzen eines Rohrstranges in der Arbeitsbühne bzw. Drehtisch ermöglichen. Zum anderen „Elevatoren“, Abfangwerkzeuge zur Aufnahme eines Rohrstranges mittels spezieller Einsätze am Haken, um den Strang in die Bohrung ein- bzw. ausfahren zu können. Im Produktkatalog eines Herstellers finden sich Slips und Elevatoren, die über 1.000 Mg halten können. Diese Technologien müssen für die Handhabung eines Rohrdurchmessers von 720 mm angepasst werden /BLO 10a/, /BLO 10b/.

Die einzelnen Abschnitte der Verrohrung können verschweißt oder durch ein Gewinde zusammengefügt werden. Stand der Technik in der Petro-Industrie sind beide Techniken. Sie werden je nach ihren Vorzügen für den jeweiligen Anwendungsfall ausgewählt.

Am unteren Ende der Verrohrung wird ein halbkugelförmiges Bauteil an die Verrohrung angebracht, da ein scharfkantiges Ende der Verrohrung ggf. zum „Einfressen“ der Verrohrung beim Absenken in die Bohrlochwand führen könnte.

Der Ringraum zwischen der Verrohrung und der Bohrlochwand wird nicht mit Versatz verfüllt. Zwischen der Errichtung eines Einlagerungsfeldes und dem Einlagern der Abfallgebinde in die verrohrten Bohrlöcher ist ein Zeitraum zu definieren, der den Einschluss der Verrohrung durch das Gebirge sicherstellt.



**Abb. 3.45** Freie Konvergenz in einem Bohrloch (Teufenlage 870 bis 1.170 m, Kriechklasse 5) /BOL 11/

Für ein beispielhaft betrachtetes Bohrloch mit einem Durchmesser von 1,0 m ist je nach Teufenlage und Kriechklasse mit Konvergenzraten von ca. 10 bis 35 mm in 5 Jahren zu rechnen (Kriechklasse 5, Abb. 3.45, /BOL 11/).

Durch den definierbaren Zeitraum (abhängig von konkreter geologischer Situation) zwischen dem Einbringen der Verrohrung und der Einlagerung von BSK-R sowie einer vorgesehenen Qualitätssicherung ist die Anbindung der Verrohrung an das Gebirge vor der Einlagerung von BSK-R gewährleistet.

Durch das Einbringen von Verrohrung in die Bohrlöcher können alle Einlagerungsbohrlöcher einer Einlagerungsstrecke oder eines Einlagerungsfeldes erstellt werden, bevor die ersten BSK-R eingelagert werden. Nach Auflaufen des Gebirges erfolgt eine Vermessung des verrohrten Bohrloches zur Endabnahme bzw. Freigabe zur Einlagerung.

Der Einlagerungs- und Versatzprozess der BSK-R kann beibehalten werden. Der Transferbehälter ist an die neuen Dimensionen der BSK-R anzupassen.

Der vorgesehene Streckenquerschnitt für die Einlagerungsvorrichtung kann für das Einbringen der Verrohrung beibehalten werden. Eine geringe Überhöhung der Strecke um 0,5 m auf ca. 7,0 m im Bereich des Bohrloches ist ggf. notwendig.

### **Rückholungsprozess**

Der konzeptionelle Ansatz für den Rückholungsprozess sieht eine weitestgehende Umkehrung des Einlagerungsprozesses vor. Die Auffahrung der Richtstrecken und der Querschläge erfolgt mittels Teilschnittmaschinen. Nach der Lokalisierung der Position eines Einlagerungsbohrlochs wird der Bohrlochkeller freigelegt und angepasst und die Verrohrung geöffnet. Der Bohrlochverschluss wird unter Einhaltung von Strahlenschutzbedingungen geöffnet, und unter Nutzung einer Absaugvorrichtung wird der Versatz aus dem Bohrloch abschnittsweise entfernt. Der Tragpilz der Kokille wird – falls notwendig – durch einen Manipulator gereinigt und kann dann von einem Greifer gefasst werden. Bei einer im Versatz feststehenden BSK-R wird diese mit Hilfe eines Rüttlers losgelöst. Die BSK-R wird nun durch die Rückholeinrichtung (= modifizierte Einlagerungsvorrichtung) in den Transferbehälter gezogen. Der weitere Transport des Transferbehälters kann mittels eines selbstfahrenden Transportmittels oder gleisgebunden erfolgen. Nach dem Entfernen der letzten BSK-R aus der Verrohrung wird das verrohrte Bohrloch verschlossen, die maschinellen Einrichtungen entfernt und eine befahrbare Sohle über dem Bohrloch hergestellt. Der gewonnene Versatz aus der Verrohrung verbleibt nach Freimessung unter Tage.

Aus diesen Abläufen ergeben sich, um die Einlagerungsvorrichtung als Rückholvorrichtung nutzen zu können, folgende Modifikationsanforderungen bzw. Überprüfungen:

- Nutzbarkeit des vorhandenen Greifers für die Rückholung der BSK-R
- Bau eines Manipulators zur Tragpilzreinigung
- Anbau einer Schwungmasse an dem Greifer, um einen Rüttelvorgang an der BSK-R zu ermöglichen
- Überprüfung, ob der Unterbau eines Raupenfahrwerkes zur Erhöhung der Eigenmobilität realisierbar ist
- Entwicklung einer Absaugvorrichtung mit nachgeschaltetem Bunkersystem unter Strahlenschutzbedingungen

### **3.3.3.3 Betrieblicher Strahlenschutz**

#### **3.3.3.3.1 Geltendes Regelwerk**

Für die Bohrlochlagerung (Variante C) gilt dasselbe Regelwerk wie im Kapitel 3.3.2.3.1 für die Streckenlagerung (Variante B1) beschrieben.

#### **3.3.3.3.2 Maßnahmen des betrieblichen Strahlenschutzes**

Die Maßnahmen des betrieblichen Strahlenschutzes bei der Variante C sind dieselben wie die im Kapitel 3.3.2.3.2 beschriebenen Maßnahmen bei der Variante B1.

#### **3.3.3.3.2.1 Einteilung des Endlagers in Strahlenschutzbereiche**

Für die Bohrlochlagerung (Variante C) gelten dieselben Regelungen bei der Einteilung der Strahlenschutzbereiche wie bei der Streckenlagerung (Variante B1) im Kapitel 3.3.2.3.2.1.

## **Kontrollbereiche**

Zum Kontrollbereich bei der Bohrlochlagerung (Variante C) zählen dieselben übertägigen und untertägigen Räume und Bereiche des Endlagers wie bei der Streckenlagerung (Variante B1) im Kapitel 3.3.2.3.2.1.

## **Überwachungsbereiche**

Als Überwachungsbereich können alle Bereiche, die den Kontrollbereich umgeben, ausgewiesen werden.

## **Sperrbereiche**

Zum Sperrbereich gehört bei der Bohrlochlagerung (Variante C) das Innere der Bohrlöcher, bei denen bereits mit der Einlagerung begonnen wurde.

### **3.3.3.3.2.2 Radiologische Überwachung**

Für die Bohrlochlagerung (Variante C) gelten bei der radiologischen Überwachung die gleichen Aussagen wie bei der Streckenlagerung (Variante B1) im Kapitel 3.3.2.3.2.2.

### **3.3.3.4 Bewetterung**

Für die Bewetterung des Einlagerungskonzeptes der Bohrlochlagerung gelten die gleichen Sicherheitsanforderungen und Bedingungen, wie für die Streckenlagerung /BMU 10/. Unterschiede in der Wetterführung und dem Wetterbedarf ergeben sich aus dem an die Anforderungen der Bohrlochlagerung angepassten Grubengebäude des Ostflügels und den veränderten Betriebsabläufen. Infrastrukturbereich und Grubengebäude der optionalen Variante A sind identisch.

Die einzulagernden BSK-R sind nicht selbstabschirmend. Während des Schacht- und Streckentransportes sowie bei der Einlagerung selbst befindet sich der jeweils einzulagernde Behälter im abgeschirmten Transferbehälter. Das Einlagerungsbohrloch ist wiederum durch die Bohrlochschleuse von der Umgebung getrennt. Analog zur Streckenlagerung ermöglichen die Behälter- und Auslegungsanforderungen eine einsöhlige Wetterführung.

Wie auch bei der Streckenlagerung, gliedert sich der Wetterbedarf im Grubengebäude in drei Teilströme. Diese sind der Infrastrukturbereich, der Einlagerungsbereich im östlichen Teil (Variante C) und der Einlagerungsbereich im westlichen Teil des Endlagerbergwerks (optionale Variante A). Der Infrastrukturbereich wird wiederum mit einem Wetterbedarf von 10.000 m<sup>3</sup>/min berücksichtigt. Der Wetterbedarf des Infrastrukturbereiches resultiert aus den Verbrauchern in den einzelnen Werkstätten, Lagern und sonstigen Grubenbauen und wurde bereits in früheren Planungen bestimmt /DBE 98/.

Für den Wetterbedarf des optionalen Grubenteils der Variante A gelten dieselben Annahmen wie bei den Ausführungen zur Variante B1, der Gesamtwetterbedarf liegt bei 3.000 m<sup>3</sup>/min.

Der Wetterbedarf der Einlagerungsfelder der Bohrlochlagerung ergibt sich aus der Art und der Anzahl der aktiven Betriebspunkte. Die benötigten Wettermengen der wesentlichen Arbeitsprozesse sind:

– Vortrieb	1.200 m <sup>3</sup> /min (mit Teilschnittmaschine, Fahrlader und Entstaubungsanlage)
– Gleisbau	800 m <sup>3</sup> /min
– Bohrlochkeller und Schienenträger	800 m <sup>3</sup> /min
– Erkundungsbohrung	800 m <sup>3</sup> /min
– Erweiterungsbohrung	800 m <sup>3</sup> /min
– Einbau Außenliner	800 m <sup>3</sup> /min
– Einlagerung	600 m <sup>3</sup> /min
– Versatz	800 m <sup>3</sup> /min

Zusätzlich zu diesen Arbeiten sind Wetter für Nebenarbeiten nötig. Zu den Nebenarbeiten zählen zum Beispiel Anker- und Beraubarbeiten oder auch der Fahrbahnbau. Da diese Tätigkeiten nicht ständig stattfinden, können sie zu einem Verbraucher mit einem Wetterbedarf von 600 m<sup>3</sup>/min zusammengefasst werden.

Außer Einlagerung und Versatz finden alle genannten Prozesse im ÜB statt. Dessen Wetterbedarf liegt deutlich über dem des KB. Somit ist mit dem Nachweis einer ausreichenden Bewetterung des ÜB auch die Bewetterung des KB in der Einlagerungs-

schicht abgedeckt. Finden alle Arbeitsschritte des Überwachungsbereiches zeitgleich statt, ergibt sich so ein Wetterbedarf von 5.800 m<sup>3</sup>/min. Zur Optimierung der Wetterverteilung wird auch für die Bohrlochlagerung eine zeitliche Trennung der Tätigkeiten in ÜB und KB angestrebt.

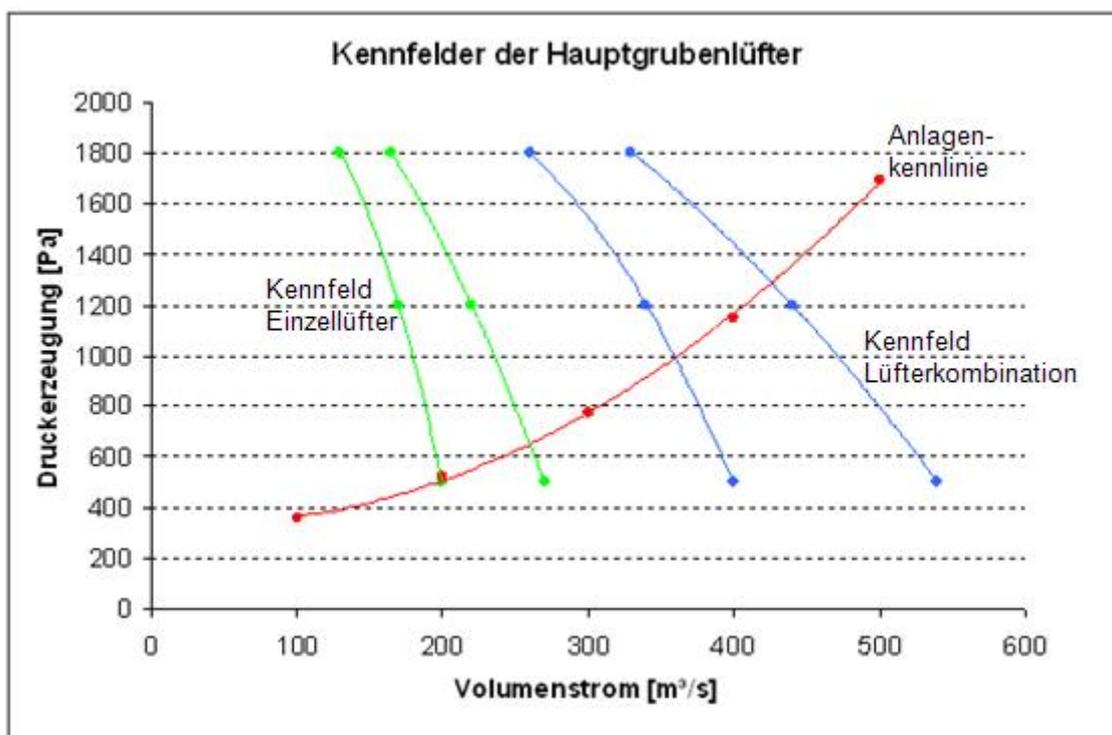
Innerhalb des Grubengebäudes der Variante C ziehen die Wetter zunächst vom schachtnahen Bereich über die südliche Richtstrecke zu den jeweiligen Beschickungsstrecken. Die Beschickungsstrecken liegen querschlägig zwischen den Richtstrecken. Der Übergang zwischen ÜB und KB liegt in den jeweiligen Einlagerungsstrecken. Eine wetterdichte Trennung ist nicht vorgesehen. Der Wetterstrom kann durch die Beschickungsstrecken ziehen. Durch die durchschlägige Ausführung der Strecken sind zusätzliche Sonderbewetterungsanlagen nicht nötig. Die Regulierung der Teilströme innerhalb der einzelnen Beschickungsstrecken erfolgt über Wetterdrosseln und Wetterschieber. Diese können zweckmäßig am Übergang ÜB/KB aufgestellt sein. Der Abwetterstrom verlässt das Grubengebäude über die nördliche Richtstrecke und den Schacht 2. Sonderbewetterungseinrichtungen sind in nichtdurchschlägigen Grubenbauen, wie beispielsweise Auffahrungen und Versatzstrecken, nötig.

### **Modellbetrachtung**

Während der Betriebszeit erfolgt die Einlagerung im Rückbau, beginnend vom östlichsten Einlagerungsfeld (Ost 1). Durch die wechselnden Betriebspunkte und das durch die Einlagerung ständig kleiner werdende Grubengebäude ändern sich die wettertechnischen Bedingungen und Anforderungen während der gesamten Betriebszeit. Zur Beschreibung der verschiedenen Zustände des Endlagerbergwerkes wurden drei Modelle konstruiert. Die Modelle bilden Referenzmodelle für die Bedingungen am Anfang der Betriebszeit (Modell Ost 1), in der Mitte (Modell Ost 2) und gegen Ende der Betriebszeit (Modell Ost 3).

Der benötigte Volumenstrom beträgt in allen Modellen rund 23.000 m<sup>3</sup>/min. Der über die Betriebszeit weitgehend konstante Volumenstrom begründet sich daraus, dass zwar das Grubengebäude stetig kleiner wird, die Betriebsabläufe und somit Wettermengen aber bestehen bleiben. Durch die größeren Querschnitte im Grubenteil der Variante C sinkt der Druckbedarf gegenüber der Variante B1 deutlich. Zu Beginn der Einlagerung beläuft sich der Druckbedarf am Lüfter auf rund 2.000 Pa. Mit kleiner werdendem Grubengebäude sinkt auch der Druckbedarf weiter.

Die Auswahl eines geeigneten Hauptgrubenlüfters sowie die Dimensionierung der nötigen Anlagen beeinflusst die Leistungsfähigkeit der Bewetterung maßgeblich. Für die Modelle wurde eine Lüfterkombination bestehend aus zwei baugleichen und parallel arbeitenden Lüftern gewählt. Aus der parallelen Betriebsweise der beiden Lüfter ergibt sich eine Gesamtkennlinie (blaues Kennfeld in Abb. 3.46), bei der die Gesamtdruckerzeugung der Druckerzeugung eines Einzellüfters entspricht. Der Gesamtvolumenstrom ergibt sich aus der Addition beider Einzelvolumenströme (grünes Kennfeld in Abb. 3.46). Somit ist es möglich, auch bei einer geringen Druckdifferenz hohe Volumenströme zu erzeugen. Beide Einzellüfter haben im Vergleich zum Einsatz eines großen Hauptgrubenlüfters eine kleinere Baugröße. Die Auswahl einer geeigneten Einzelkennlinie erfolgte aus einem für Axialgrubenlüfter typischen Kennfeld.



**Abb. 3.46** Beispiel Kennfelder des Einzellüfters und der Parallelschaltung

Die erstellten Modelle zeigen, dass unter den gewählten Parametern die einsöhlige Bewetterung des Endlagerbergwerkes in ausreichendem Maß realisiert werden kann. Alle in den Modellen installierten Betriebspunkte können mit den geforderten Mengen an frischen Wettern versorgt werden. Die errechneten Mindestwettermengen sowie die Wettergeschwindigkeiten entsprechen den allgemeinen, bergbehördlichen Vorgaben /ABV 12/, /ABU 66/, (Tab. 3.12).

**Tab. 3.12** Vergleich wettertechnischer Sollwerte und berechneter Ist-Werte an unterschiedlichen Betriebspunkten

<b>Kennwert</b>	<b>Soll</b>	<b>Ist Ost 1</b>	<b>Ist Ost 2</b>	<b>Ist Ost 3</b>
Erzeugter Volumenstrom an den Lüftern [m³/min]		23.000	23.000	23.000
Erzeugter Druck an den Lüftern [Pa]		2.000	1.300	950
Wettergeschwindigkeit Schacht 2 [m/s]		7,8	8,1	8,5
Wettergeschwindigkeit Richtstrecke Süd [m/s]	≤ 6	4,9	5,3	4,9
Volumenstrom Vortriebsstrecke [m³/min]	1.200	2.200	2.050	2.200
Wettergeschw. Vortriebsstrecke [m/s]	≤ 6	1,1	1,0	1,1
Volumenstrom Einlagerungsstrecke [m³/min]	800	800	800	800
Wettergeschw. Einlagerungsstrecke [m/s]	≤ 6	0,4	0,4	0,4

Blindstrecken werden mit einer blasenden Sonderbewetterung versorgt. Diese Sonderbewetterungen bestehen aus einem geeigneten Axiallüfter mit entsprechender Luttenleitung. Zusätzlich zu den im Programm vordefinierten Lüfterkennlinien wurden für die Sonderbewetterungen eigene Kennlinien erstellt. Diese Kennlinien entsprechen handelsüblichen Lüftern und dienen der Sonderbewetterung einzelner Betriebspunkte.

Durch die im Vergleich zur Variante B1 größeren Streckenquerschnitte sind in der Variante C geringere Wettergeschwindigkeiten in den Querschlägen und der nördlichen Richtstrecke zu erwarten. Entsprechend den zugrundeliegenden Betriebsabläufen wurden die genannten Verbraucher im Modell simuliert. Die Wettermenge im Ostflügel beträgt dabei bis zu 6.500 m³/min. Eine weitere Erhöhung der Wettermenge im Ostflügel (Variante C) ist durch die Richtstrecke Süd mit einem freien Querschnitt von 22 m² und einer maximalen Wettergeschwindigkeit von 6 m/s auf 7.900 m³/min begrenzt.

Zur Steuerung der Wetter ist es nötig, die inaktiven Querschläge mit Wettertüren oder -schleusen zu versehen. Diese Wetterbauwerke ermöglichen im Notfall einen Übergang zwischen beiden Strahlenschutzbereichen des Endlagerbergwerks. Gleichzeitig ist eine Regulierung der Wetterströme möglich. Mit Hilfe der eingebauten Schieber/Drosseln lassen sich so beispielsweise die für Nebenarbeiten nötigen Wetterströme einstellen. Auch innerhalb der aktiven Einlagerungsquerschläge sind zur Steuerung

der Teilströme Wetterdrosseln nötig. Da die Beschickungsstrecken durchschlägig sind, kann auf eine Sonderbewetterung verzichtet werden.

### **3.3.3.5 Verfüll- und Verschlussmaßnahmen**

Im Einlagerungskonzept der Variante C ist vorgesehen, dass im Ostflügel des Endlagers die wärmeentwickelnden radioaktiven Abfälle in BSK-R in tiefe, vertikale, verrohrte Bohrlöcher endgelagert werden. Damit unterscheidet sich dieses Konzept grundlegend von der Variante B1 (und B2-Differenzbetrachtung). Als Versatzmaterial für die Grubenhohlräume ist auch hier Salzgrus vorgesehen.

Nach der vollständigen Befüllung eines verrohrten Einlagerungsbohrloches mit BSK-R und Verschluss (Deckel) der Verrohrung wird der Bohrlochkeller mit Salzgrus und nach Befüllung aller Bohrlöcher einer Einlagerungstrecke auch diese mit trockenem Salzgrus verfüllt. Eine Überführung des Bohrlochkellers in der Betriebsphase bis zum abschließenden Verfüllen der Einlagerungstrecke wird durch Sonderkonstruktionen (z. B. Stahlplatten), die kurz vor dem Einbringen des Versatzes beraubt werden, gewährleistet.

Für diese Variante wurde eine Massenermittlung der zu verfüllenden Grubenhohlräume erstellt. Insgesamt sind im Einlagerungshorizont des Ostflügels 384.000 m<sup>3</sup> Streckenhohlraum der querschlägigen Einlagerungstrecken mit trockenem Salzgrus zu versetzen. Für die Richtstrecken im Einlagerungshorizont sind 123.000 m<sup>3</sup> angefeuchteter Salzgrusversatz vorgesehen. Die Infrastrukturbereiche werden, wie in Variante B1 beschrieben, mit langzeitstabilem Schotter verfüllt. Die Massen entsprechen denen der Variante B1. Für den Westflügel bleibt der zu versetzende Hohlraum, wie in Variante B1 beschrieben, unverändert.

Eine vorläufige Abschätzung der Grubenhohlräume in der Erkundungssohle ergab ein Gesamtvolumen von ca. 300.000 m<sup>3</sup>. Die Verfüllung erfolgt wie in Variante B1 beschrieben. Weitere zusätzliche Verfüll- und Verschlussmaßnahmen sind für die Variante C nicht vorgesehen. Alle anderen Maßnahmen sind, wie in Variante B1 beschrieben, geplant.

### **3.3.3.6 Rückholungskonzept**

Die Ausführungen zur Rückholung von Endlagerbehältern aus Bohrlochlagerung erfolgen in Konzeptplanungstiefgang. Variante C betrachtet die Einlagerung von Endlagerbehältern in einer Bohrlochlagerung mit Verrohrung. Im Gegensatz zur Streckenlagerung von POLLUX® oder Transport- und Lagerbehältern der Varianten B1 und B2 werden keine Endlagerbehälter mit Abschirmung eingesetzt.

#### **3.3.3.6.1 Anforderungen, Annahmen und Randbedingungen zur Rückholung**

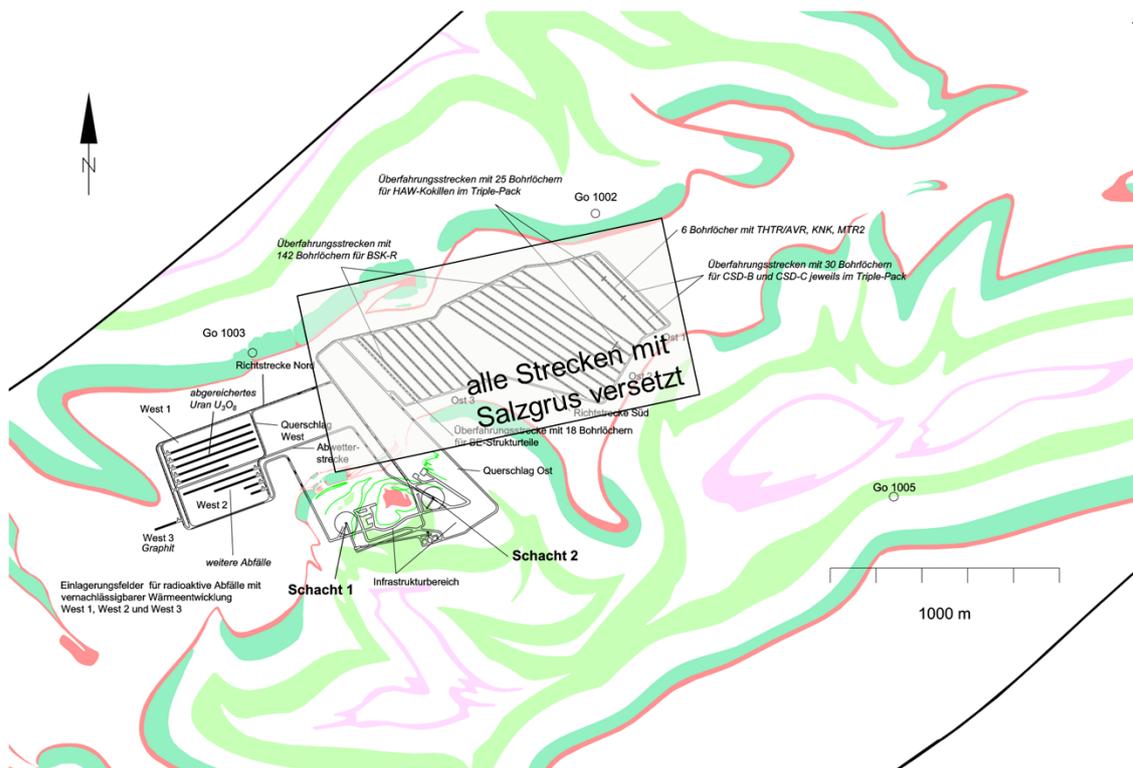
Für die Anforderungen, Annahmen und Randbedingungen zur Rückholung gelten die in Kapitel 3.3.2.6.1 formulierten Ausführungen.

#### **3.3.3.6.2 Rückholkonzept**

##### **Zeitpunkt der Rückholung**

Gemäß /BMU 10/ befindet sich das Endlager bei der Entscheidung über die Rückholung noch in der Betriebsphase. Als zwei eingrenzende Zeitpunkte während der Betriebsphase können definiert werden:

- Frühester Zeitpunkt der Rückholung: Ein Endlagerbehälter wurde in ein verrohrtes Bohrloch eingelagert. Die Überfahrungsstrecken, Querschläge und Richtstrecken wurden nicht mit Salzgrus versetzt.
- Spätester Zeitpunkt: Alle planmäßig einzulagernden Endlagerbehälter wurden eingelagert. Die Überfahrungsstrecken, Querschläge und Richtstrecken wurden versetzt sowie die technischen Barrieren errichtet (siehe Abb. 3.47, grau hinterlegte Fläche).



**Abb. 3.47** Wiederaufzufahrender Bereich des Grubengebäudes

Der Infrastrukturbereich sowie die Schächte sind zu allen betrachteten Zeitpunkten im betriebsbereiten Zustand. Sämtliche logistischen Einrichtungen für den innerbetrieblichen Transport über und unter Tage sind betriebsbereit.

Um die beschriebenen Zeitpunkte und alle dazwischenliegenden Zeitpunkte in der Konzeption der Rückholung erfassen zu können, wird als abdeckender Fall für den weiteren Verlauf der spätestmögliche Betriebszeitpunkt betrachtet.

### Prozessschritte der Rückholung

Der konzeptionelle Ansatz beinhaltet, dass für die Rückholung der Endlagerbehälter eine weitestgehende Umkehrung des Einlagerungsprozesses zielführend ist. Weiterhin sollen wenn möglich Verfahren und Maschinen eingesetzt werden, die bereits zur Einlagerung Anwendung gefunden haben. In Variante C werden rückholbar ausgelegte Kokillen (BSK-R) eingelagert.

Die Prozessschritte der Rückholung können wie folgt benannt werden:

- Wiederauffahren von Richtstrecken und Querschlägen
- Wiederauffahren der Überfahrungsstrecken
- Kühlung der aufgefahrenen Rückholfelder
- Erstellen Bohrlochkeller über Verrohrung
- Freilegen und Öffnen der Verrohrungen
- Positionierung der Rückholmaschine über Bohrloch
- Förderung des Versatzmaterials aus der Verrohrung
- Greifen und Ziehen der Kokille in Transferbehälter
- Transport des Transferbehälters inkl. Kokille unter und über Tage

Die Richtstrecken, Querschläge und Überfahrungsstrecken werden gemäß dem Grubenplan des Endlagerbergwerkes aufgefahren, da hierfür keine oder nur geringe Erkundungsmaßnahmen, wie z. B. Vorbohrungen, notwendig sind. Die aufzufahrenden Streckenquerschnitte werden für die Rückholung ggf. größer als bei der Auffahrung für das Endlagerbergwerk aufgefahren, um Auflockerungszonen entlang der alten Streckenquerschnitte zu beseitigen. Vergrößerte Streckenquerschnitte sind auch für eine ausreichende Bewetterung vorteilhaft, um eine höhere Bewetterungsleistung zu ermöglichen. Die genauen Streckenquerschnitte können erst nach einer detaillierten Bewetterungsplanung, die nicht Bestandteil der VSG ist, ermittelt werden.

Sind die Richtstrecken und die Überfahrungsstrecken eines Einlagerungsfeldes aufgefahren, wird dem Gebirgskörper im Umfeld der Strecken über eine definierte Zeit die Wärme entzogen, bevor mit der Freilegung der Bohrlöcher begonnen wird. Die Bewetterung kann gemäß den Ausführungen in Kapitel 3.3.3.4 erfolgen.

Nach der Kühlung eines Einlagerungsfeldes erfolgt zur Rückholung in einem ersten Schritt die Wiedererstellung des Bohrlochkellers über der Verrohrung. Ist die Verrohrung freigelegt, kann diese nach radiologischer Freigabe geöffnet werden.

Die Förderung des Versatzmaterials aus der Verrohrung erfolgt im Lufthebeverfahren, welches bereits beim Abteufen der Bohrlöcher zur Anwendung kommt. Zwei technische Lösungen sind hierfür möglich:

1. Ertüchtigung der Einlagerungsmaschine (= Rückholmaschine) um eine Einrichtung zur Förderung des Versatzes
2. Eigenständige Vorrichtung zur Förderung des Versatzes

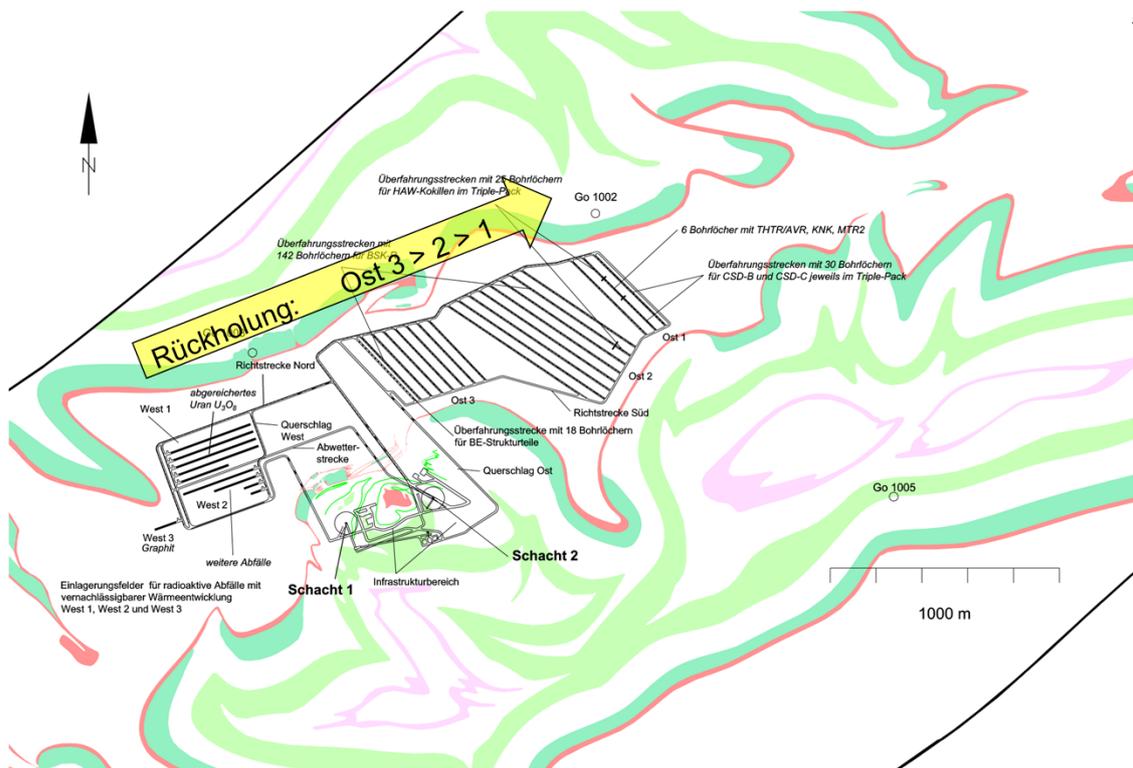
Im Fall der Ertüchtigung der Einlagerungsmaschine kann diese für den kompletten Rückholvorgang über dem Bohrloch positioniert werden und dort für die Rückholung aller Kokillen einer Verrohrung verbleiben. Kommt eine eigenständige Vorrichtung zum Einsatz, ist nach jeder Versatzförderung ein Maschinenwechsel vorzusehen.

Zur Rückholung der Kokillen kann die Einlagerungsmaschine als Rückholmaschine verwendet werden. Diese greift die Kokillen im Bohrloch und zieht diese in den Transferbehälter. Ist eine Kokille nicht durch die maximale Zugkraft der Rückholmaschine aus der Verrohrung ziehbar, kann das Losbrechmoment durch den Einsatz eines Rüttlers in Kombination mit der Zugkraft der Rückholmaschine überwunden werden. Die Rückholmaschine ist mit einer derartigen Vorrichtung zu ertüchtigen.

Die in den Transferbehälter gezogenen Kokillen werden gemäß den beschriebenen Transportvorgängen für die Einlagerung unter und über Tage transportiert.

### **Schema Streckenauffahrung**

Die Einlagerung der Endlagerbehälter erfolgt beginnend in Einlagerungsfeld Ost 1 und bewegt sich im „Rückbau“ bis Einlagerungsfeld Ost 3. Bei der Rückholung wird diese Richtung umgekehrt und das dem Infrastrukturbereich nächste Einlagerungsfeld, Ost 3, zuerst erschlossen (siehe Abb. 3.48).



**Abb. 3.48** Schema Streckenauffahrung

Die Streckenverschlüsse, Richtstrecken, Querschläge und Überfahrungsstrecken werden mittels Teilschnittmaschinen (TSM) unter Sonderbewetterung aufgeföhren (vgl. Kapitel 3.3.2.6.2).

Zur Abschätzung und Beherrschung der im Falle der Rückholung im Grubengebäude herrschenden klimatischen Bedingungen sowie zu den Betrachtungen der Gebirgsmechanik bei der Aufföhren von Strecken in Salz bei Gebirgstemperaturen bis 200 °C gelten die in Kapitel 3.3.2.6.2 getroffenen Angaben.

### **Zeitplanung für die Aufföhren des Bergwerkes und die Rückholung**

Die Ausführungen zur Rückholung von Endlagerbehältern aus Bohrlochlagerung erfolgen im Konzeptplanungstiefgang. Gesicherte Angaben für den Zeitbedarf können daher innerhalb der VSG nicht erfolgen.

In einem ersten Ansatz kann der Zeitbedarf analog zum Zeitbedarf der Einlagerung angenommen werden.

### **Radiologisches Monitoring während der Rückholung und Störfallbetrachtung**

Es gelten im Wesentlichen die in Kapitel 3.3.2.6.2 formulierten Angaben. Zu beachten ist jedoch, dass für Variante C, Bohrlochlagerung, keine selbstabschirmenden Endlagerbehälter eingelagert werden.

### **Konditionierung, Zwischenlagerung**

Sind die Endlagerbehälter der Variante C zurückgeholt, ist der weitere Verbleib der Abfälle zu betrachten.

Die Abfälle aus den zurückgeholt BSK-R müssen in Transport- und Lagerbehälter umgelagert werden. Hierzu ist eine geeignete Konditionierungsanlage vorzuhalten, in der die Abfälle in Transport- und Lagerbehälter umgepackt werden. Für diese Konditionierung ist weiterhin eine ausreichende Anzahl an Transport- und Lagerbehältern vorzusehen. Für diese vorzuhaltenden Transport- und Lagerbehälter ist zudem die Möglichkeit der Lagerung zu berücksichtigen.

Für den Zeitpunkt der Rückholung ist eine hinreichende Lagerkapazität für die mit rückgeholt Abfällen beladenen Transport- und Lagerbehälter vorzusehen. Hierfür sind Zwischenlager in der Konzeption zu berücksichtigen.

#### **3.3.3.7 Bergung von Endlagerbehältern**

Es gilt für Variante C die Anforderung, dass die Endlagerbehälter (BSK-R) über den betrachteten Zeitraum von 600 Jahren formstabil bleiben und ihre mechanische Stabilität uneingeschränkt gewährleistet ist.

Das Ziehen der Behälter aus der Verrohrung und die Transportvorgänge unter und über Tage dürfen nicht zu einer Beschädigung der Endlagerbehälter führen. Die Anschlagmittel der Endlagerbehälter sind zur Betrachtung der Rückholung in Variante C als gebrauchsfähig unterstellt.

Die Verrohrung ist derart auszulegen, dass sie im Zusammenwirken zwischen Endlagerbehälter und Versatzmaterial die Bergung nicht behindert. Es wird davon ausgegangen, dass das für die Rückholung aufgestellte Konzept auch eine Bergung ermöglicht.

Im Übrigen gelten die in Kapitel 3.3.2.7 formulierten Angaben.

### 3.3.4 Transport- und Lagerbehälter-Endlagerung (Variante B2)

Als Alternative zur Endlagerung ausgedienter Brennelemente und wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in POLLUX<sup>®</sup>-Behältern (Variante B1) wird nachfolgend die Endlagerung von DWR-, SWR- und WWER-BE und von Wiederaufarbeitungsabfällen in Transport- und Lagerbehältern (Variante B2) in einer Differenzbetrachtung zur Streckenlagerung beschrieben.

Im Rahmen des Vorhabens „Untersuchung zur direkten Endlagerung von Transport- und Lagerbehältern (TLB)“ mit dem Akronym „DIREGT“ wird in einer Konzeptstudie seit dem Jahr 2006 die Machbarkeit der direkten Endlagerung von ausgedienten Brennelementen in TLB untersucht. In der dreiteiligen Konzeptstudie erfolgten bereits eine Grundlagenermittlung, die Planung des technischen Endlagerkonzeptes und die Ermittlung der notwendigen Anpassungsmaßnahmen für TLB als Endlagerbehälter. Die bisherigen Ergebnisse dieser Konzeptstudie sind im Folgenden zusammengefasst.

#### 3.3.4.1 Thermische Berechnungen

Für die Konzeption der Einlagerung von TLB in waagrecht ausgeführte Bohrlöcher wurde die erforderliche Feldgröße mit Behälter- und Streckenabständen im Rahmen des Projektes DIREGT auf Grundlage thermomechanischer Berechnungen in /FIL 07/ abgeschätzt. Im Rahmen der VSG wurden keine weiteren thermischen Analysen durchgeführt. Diese Abschätzung basiert auf der Einlagerung von CASTOR<sup>®</sup> V/19 in ca. 12 m langen Bohrlöchern. Als Beladung eines TLB wurden 17 DWR-U-BE mit 4 % U-235 und 60 GWd/t Abbrand und weiteren 2 DWR-MOX-BE mit 4,6 % Pu und 60 GWd/t Abbrand angenommen. Unter der Annahme einer Zwischenlagerzeit von 43 Jahren wurden folgende geometrische Auslegungsdaten ermittelt (Abb. 3.49):

- Behälterabstand  $d_1$ : 31 m
- Behälterabstand  $d_2$ : 28 m
- Behälterabstand  $a_s$  horizontal: 27,5 m
- Fläche einer durchschnittlichen Einlagerungszelle  
(Behälter und umgebendes Wirtsgestein) 811 m<sup>2</sup>

Im Folgenden werden die wesentlichen Unterschiede in den Modellannahmen beschrieben, die im Projekt DIREGT gegenüber denen der VSG bestehen. Am Ende des Kapitels werden die Ergebnisse kurz behandelt.

Die Abweichungen bestehen in der Behälterleistung, der Modellierung des mechanischen Verhaltens des Wirtsgesteins, der Wärmeleitfähigkeit des Salzgrus zu Beginn seiner Kompaktion, der Spaltweite zwischen Behälter und Bohrlochwandung sowie der Abbildung der Wärmequelle im numerischen Modell.

Die verwendete Behälterleistung im Projekt DIREGT liegt in dem für thermische Auslegungen wesentlichen Zeitraum der ersten 100 Jahre höher als diejenige, die sich mit den entsprechenden Brennelementen der VSG ergibt. Der Faktor beträgt 1,17 zum Zeitpunkt von 10 Jahren nach Reaktorentnahme und fällt ab auf 1,02 zum Zeitpunkt von 100 Jahren. Bei ansonsten unveränderter Konfiguration führt eine geringere thermische Leistung zu einer geringeren Erwärmung des Gebirges.

Das mechanische Verhalten des Wirtsgesteins wird mit dem Stoffansatz BGR<sub>a</sub> unter Verwendung der Kriechklasse 5 beschrieben. Mit der Wahl der Kriechklasse 5 wird das Kriechvermögen des Wirtsgesteins in DIREGT grundsätzlich um eine Kriechklasse geringer angesetzt, als es dem Hauptsalz z2HS1 und z2HS2 entspricht. Mit der Verwendung des Stoffansatzes BGR<sub>a</sub> an Stelle von BGR<sub>EB</sub> wird darüber hinaus der Temperatureinfluss auf die Kriechfähigkeit bei moderaten und höheren Temperaturen deutlich geringer bewertet, vgl. Kapitel 2.6. Die Folge einer höheren Kriechfähigkeit des Steinsalzes ist eine höhere Konvergenz der Strecke und so eine schnellere Kompaktion des Salzgrusversatzes in der Strecke. Eine schnellere Kompaktion des Salzgrusversatzes begünstigt die Wärmeableitung vom Behälter in das Gebirge.

Für die Wärmeleitfähigkeit des Salzgrusversatzes wird für die lockere Anfangsschüttung in DIREGT ein konstanter Minimalwert von 0,8 W/(m·K) angesetzt. Dem steht in der VSG ein mit der Temperatur zunehmender Wert im Wertebereich von [0,81; 1,06] gegenüber. Die höhere Wärmeleitfähigkeit begünstigt wie beim vorangegangenen Aspekt die Wärmeableitung vom Behälter in das Gebirge.

Das Projekt DIREGT geht von einer exzentrischen Position des Behälters im Bohrloch mit einer Spaltweite zwischen 30 mm und 100 mm aus, die mittlere Spaltweite beträgt damit 65 mm. In der Variante B2 weist der Spalt eine Weite von konstant 50 mm aus. Es kann gezeigt werden, dass eine exzentrische Positionierung gegenüber einer zent-

rischen Position bei gleichem Behälter- und Bohrungsdurchmesser zu einer höheren thermischen Belastung des Wirtsgesteins führt. Darüber hinaus ist die Schicht mit geringer Wärmeleitfähigkeit im Vorhaben VSG mit 50 mm geringer als die im Mittel 65 mm dicke Schicht im Projekt DIREGT. Eine geringere Schichtdicke begünstigt ebenfalls die Wärmeableitung vom Behälter in das Gebirge.

In DIREGT diente das gesamte Behältermodell als Volumenquelle für die Wärmeproduktion. Im Zusammenhang mit den Berechnungen zur Variante B1 wurde jedoch festgestellt, dass sich bei verbesserter Behältermodellierung eine um 10 K höhere Maximaltemperatur im Auslegungspunkt ergibt, Kapitel 3.3.2.1.3.

Mit Ausnahme des zuletzt genannten Aspektes führen die vorgenannten Aspekte dazu, dass die thermische Belastung unter VSG-Annahmen geringer ausfällt. Auf Grund der enthaltenen Nichtlinearitäten können nur Berechnungen am modifizierten Modell zeigen, wie weit der temperaturerhöhende Einfluss aus dem letzten Aspekt durch die übrigen Aspekte kompensiert wird. Eine weitere Möglichkeit, die Maximaltemperatur abzusenken, steht mit einer verlängerten Zwischenlagerzeit zur Verfügung. Im Projekt DIREGT wurde eine Zwischenlagerzeit von 43 Jahren angesetzt. Die angenommene Einlagerungsabfolge in der Variante B1 ging bei POLLUX<sup>®</sup>-Behältern von einer Zwischenlagerzeit von 50 Jahren aus.

In den Berechnungen /FIL 07/ ist in einem ersten Schritt der Einfluss der beim TLB vorhandenen Kühlrippen untersucht worden. Im Ergebnis wurde festgestellt, dass der Einfluss der Kühlrippen die Maximaltemperatur bei einer Einbettung des Behälters in Salzgrus um 3 K gegenüber einer rippenlosen Variante reduziert. Als Ursache für diesen geringen Unterschied wird der Wärmetransportprozess gesehen, der im Endlager im Wesentlichen aus der Wärmeleitung besteht, während im Zwischenlager die Konvektion stärker zum Tragen kommt.

In einem weiteren Schritt wurde die Zwischenlagerzeit bestimmt, die sich für die Einlagerung eines einzelnen Behälters in das Endlager ergibt. Für die Einlagerung eines CASTOR<sup>®</sup> V/19 mit der o. g. Beladung ist eine Zwischenlagerzeit von mindestens 32 Jahren erforderlich, um den Behälter unter Einhaltung der Auslegungstemperatur von 200 °C für Steinsalz einlagern zu können.

Im abschließenden Schritt wurde der Zustand einer gegenseitigen Beeinflussung untersucht, der sich aus der Einlagerung in räumlich nahen Bohrlöchern und Strecken

ergibt. Es erfolgte eine gemeinsame Variation von Bohrloch- und Streckenabstand. Die Variationsbreite des Bohrlochabstands betrug 27,5 m bis 42,5 m, beim Streckenabstand zwischen 59 m und 74 m. In Abhängigkeit der Abstände wurde die erforderliche Zwischenlagerzeit bestimmt, die notwendig ist, um die Auslegungstemperatur des Steinsalzes von 200 °C einhalten zu können. Die untere Variationsbandbreite entspricht der ausgewählten Einlagerungskonfiguration in der Variante B2. Hier ergab eine Berechnung mit einer Zwischenlagerzeit von 42 Jahren eine Maximaltemperatur von 203 °C, so dass mit einer Verlängerung der Zwischenlagerzeit auf 43 Jahren die Einhaltung der Auslegungstemperatur angenommen wird. In der Mitte der o. g. Variationsbreite reduziert sich die erforderliche Zwischenlagerzeit auf 40 Jahre. Für die obere Variationsbreite ergibt sich eine erforderliche Zwischenlagerzeit von deutlich unter 40 Jahren.

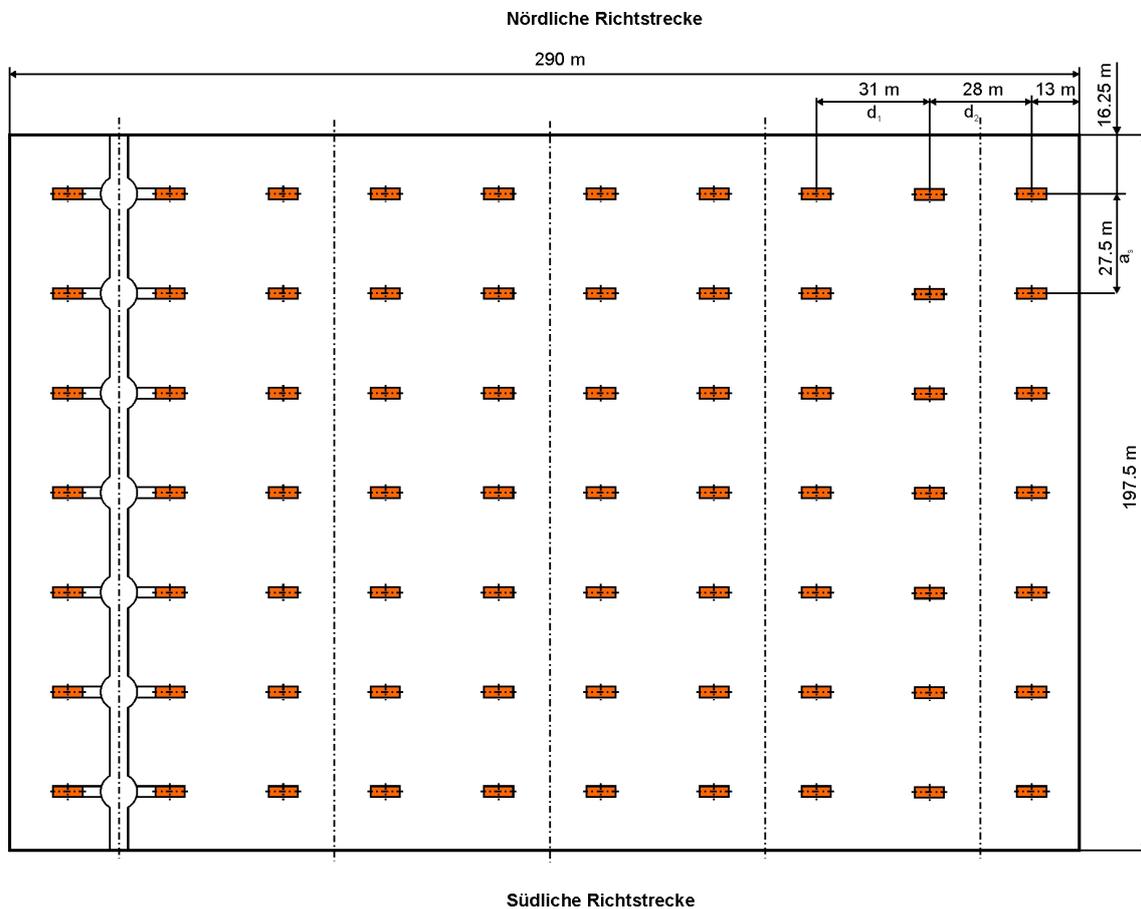
Die behälterspezifische Leistung eines CASTOR® HAW 20/28 CG mit 28 CSD-V ist bei einer Zwischenlagerzeit von 40 Jahren um den Faktor 1,7 höher als die o. g. Beladung mit Brennstäben und bei einer Zwischenlagerzeit von 80 Jahren noch um den Faktor 1,3 höher. Als Abschätzung auf der Basis der Behälterleistung wurde in /FIL 07/ von einer Verlängerung der Zwischenlagerzeit auf ca. 65 Jahre ausgegangen.

Unter technischen Gesichtspunkten betrachtet zeigen die DIREGT-Ergebnisse, dass es möglich ist, ein Endlagerkonzept auf der Basis von Behältern mit hoher spezifischer Leistung aufzubauen. Notwendige Voraussetzung dabei ist, dass wärmerückhaltende steinsalzhaltige Schichten wie Salzgrus minimiert werden, damit die gute Wärmeleitfähigkeit des unverritzten Steinsalzes genutzt werden kann. Die erforderlichen Zwischenlagerzeiten bewegen sich dabei im Bereich von 40 bis 45 Jahren bei der Einlagerung von Brennelementen und bei 65 bis 70 Jahren bei der Einlagerung von verglasten Abfällen der Wiederaufarbeitung. Diese Zeitspannen sind im Rahmen des in der VSG zugrunde gelegten Betriebszeitraums realisierbar. Die dazu notwendige Einlagerungsabfolge wäre daher in der Variante B2 zunächst die Einlagerung der mit Brennelementen der Forschungs- und Versuchsreaktoren beladenen TLBs vorsehen, im Anschluss daran die der mit Brennelementen der Leistungsreaktoren beladenen TLBs und danach die der verglasten Abfällen.

### 3.3.4.2 Planung der Einlagerungsfelder

Auf der Basis der thermischen Randbedingungen erfolgt die Entwicklung des Einlagerungskonzeptes. Der Entwurf des Grubengebäudekonzeptes wird durch die Positionen der in horizontalen Kurzbohrlöchern eingelagerten TLB und den berg- und maschinenbaulichen Randbedingungen bestimmt.

Abb. 3.49 zeigt ein Einlagerungsfeld für 70 TLB für Variante B2. Nördlich und südlich des Feldes befinden sich die Richtstrecken des Grubengebäudes. Zwischen den Richtstrecken werden die Beschickungsstrecken in Form von Querschlägen aufgeföhren.



**Abb. 3.49** Variante B2: Einlagerungsfeld für 70 TLB

Bestimmend für die Größe eines realen Einlagerungsfeldes sind neben den berg- und maschinenbaulichen Randbedingungen sicherheitstechnische und langzeitsicherheitliche Anforderungen sowie Sicherheitsabstände zu Anhydrit- und Kaliflözen.

### **3.3.4.2.1 Transport- und Einlagerungsprozess**

Im Folgenden werden Konzeptionen

- zur Schachtförderanlage bis 175 Mg,
- zur Umladung am Füllort,
- zum Streckentransport und
- zur Einlagerungstechnik

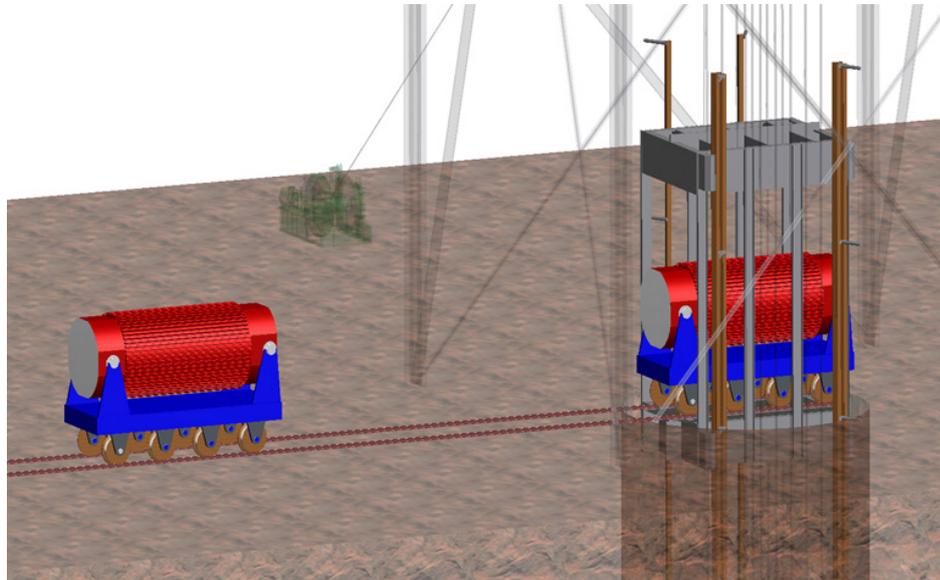
dargestellt.

#### **3.3.4.2.1.1 Konzeption der Schachtförderanlage für Schwerlasten bis 175 Mg**

Konventionelle Schachtförderanlagen im Bergbau besitzen Nutzlasten bis ca. 50 Mg. Im Rahmen des Forschungsvorhabens „Direkte Endlagerung ausgedienter Brennelemente (DEAB)“ wurde bereits eine Versuchsanlage mit einer Nutzlast von 85 Mg im Maßstab 1:1 erfolgreich getestet /DBE 94/. Um den Schachttransport der Transport- und Lagerbehälter (TLB) liegend auf einem Schachttransportwagen realisieren zu können, ist eine Schachtförderanlage mit einer Nutzlast von 175 Mg (160 Mg TLB und 15 Mg Schachttransportwagen) zu entwickeln. Derartige Anlagen wurden bis heute weltweit noch nicht gebaut. Nach der Rücksprache mit Fachfirmen für den Bau von Schachtförderanlagen ist die Errichtung einer derartigen Anlage technisch möglich.

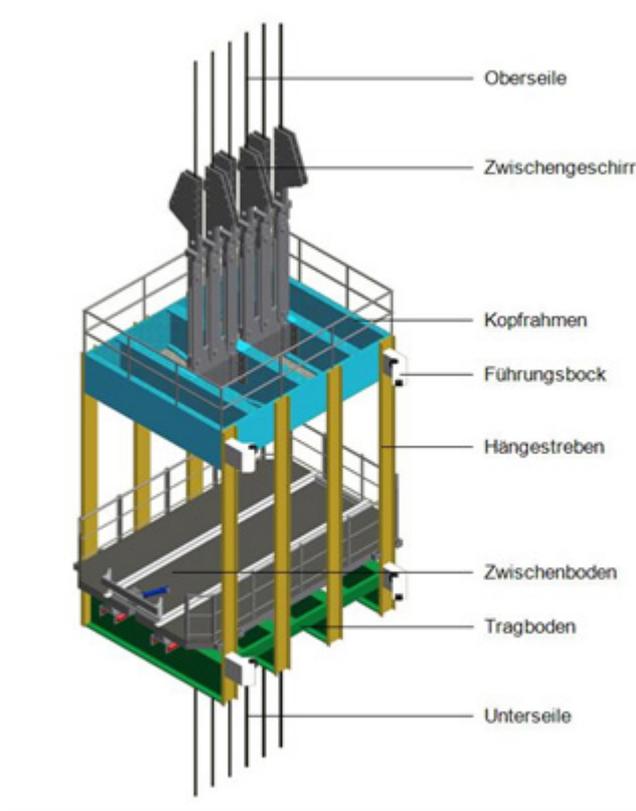
Als grundlegende, anzuwendende Fördertechnik für schwere Lasten wurde die Koepe-Förderung mit Großkorb und Gegengewicht als Hauptseilfahrtanlage für Nutzlasten bis 85 Mg in /DBE 94/ bestätigt. Eine Variantenauswahl mit Hilfe einer Bewertungsmatrix ergab, dass aus fünf Varianten zur Koepe-Förderung, die Variante (Abb. 3.50) mit horizontalem Transport des TLB auf einem Schachttransportwagen zu bevorzugen ist. Die Vorteile der Variante ergeben sich hauptsächlich aus der Ähnlichkeit zum bereits existierenden Konzept. Der Transport des TLB auf einem Schachttransportwagen beim Treiben ist technisch einfach zu realisieren und kann auf ein bereits bewährtes System zurückgreifen. Auch die Sicherung der TLB und des Schachttransportwagens ist mit bereits bekannter Technik realisierbar. Durch die Nutzung dieser Transporttechnik entfallen zusätzliche Arbeitsschritte und Manipulatoren für kombinierte Hub- und

Schwenkvorgänge über und unter Tage. Der zusätzlich nötige Entwicklungs- und Genehmigungsbedarf lässt sich für diese Variante somit als eher gering einschätzen.



**Abb. 3.50** Prinzipdarstellung der Variante ähnlich /DBE 94/

Das Fördergestell dieser Variante besteht aus einem Zwischenboden zur Aufnahme eines Schachttransportwagens und einer Rahmenkonstruktion (siehe Abb. 3.51). Der Zwischenboden ist vertikal beweglich. Während des Be- und Entladevorganges liegt der Zwischenboden zur Entlastung der Seile auf den Absetzriegeln auf. An den Seilen hängt dann nur der restliche Teil des Fördergestells. Am unteren Teil des Fördergestells sind die Unterseile befestigt. Über acht Hängestreben ist der Unterteil mit dem Kopfbereich verbunden. An den Aufhängeblechen des Kopfrahmes sind die Förderseile über Zwischengeschirre befestigt. Die Führung des Gestells erfolgt über vier Führungsblöcke (jeweils zwei an Kopfrahmen und Tragboden), die in die Spurlatten eingreifen.



**Abb. 3.51** Fördergestell mit Zwischenboden ähnlich /DBE 94/

Eine unterflurige Auf- und Abzugsvorrichtung entlädt in ihrer Funktion als Abzugsvorrichtung den Förderkorb und stellt den beladenen Schachttransportwagen an definierter Position unter der Umladevorrichtung zum Umladen bereit.

Im Falle der Rückholung der TLB wirkt diese Aufschub- und Abzugsvorrichtung als Aufschubvorrichtung für beladene Schachttransportwagen. Der beladene Schachttransportwagen wird an der Umladeposition gegriffen und auf den Zwischenboden zum Schachttransport aufgeschoben. Die Aufschub- und Abzugsvorrichtung kann baugleich mit der übertägigen Anlage ausgeführt werden.

#### **3.3.4.2.1.2 Konzeption der Umlade-, Transport- und Einlagerungstechnik**

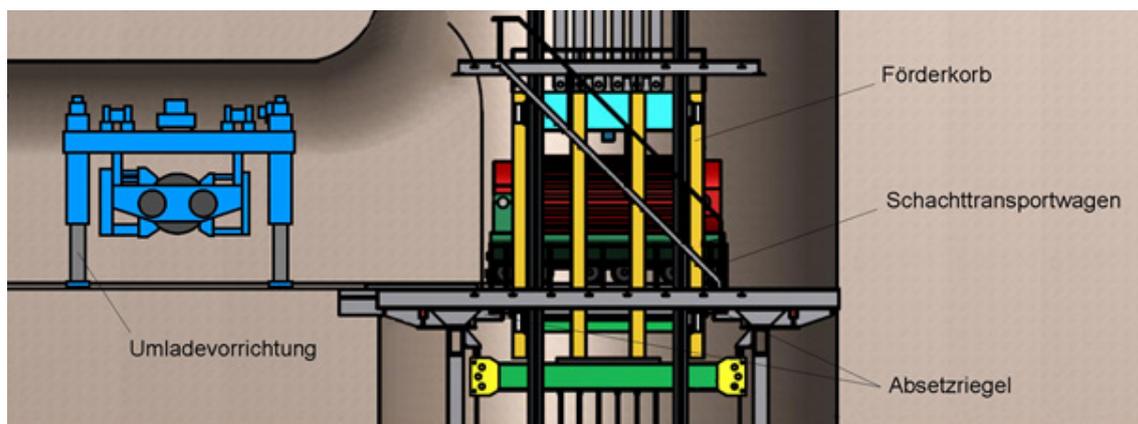
Im Transport- und Handhabungskonzept für die TLB ist vorgesehen, diese in der übertägigen Umladehalle nach dem Entfernen der Stoßdämpfer vom Anlieferfahrzeug abzuheben und auf einen Schachttransportwagen umzuladen. Der beladene Schachttransportwagen wird in den Förderkorb eingefahren. Nach der Schachtförderung wird unter Tage der auf dem Transportwagen liegende TLB aus dem Förderkorb herausge-

fahren und mit Hilfe einer Umladevorrichtung auf die Streckentransport- und Einlage-  
vorrichtung (STEV) abgelegt. Nach dem Streckentransport wird der TLB mit Hilfe  
der STEV in ein horizontales Bohrloch eingeschoben.

### **Abläufe am Füllort**

Der Füllort auf der 870 m-Sohle wird in einer Größe aufgefahren, die es erlaubt, alle er-  
forderlichen Arbeiten zur Anlieferung des TLB und zur Vorbereitung des Weitertrans-  
portes zum Einlagerungsfeld durchzuführen.

Die Anlieferung der TLB erfolgt liegend auf einem speziellen Schachttransportwagen.  
Dieser wird durch eine unterflurige Aufschub- und Abzugsvorrichtung aus dem Förder-  
korb herausgezogen und in definierter Position unter der Umladevorrichtung bereitge-  
stellt. Nach der Übernahme der TLB durch die Umladevorrichtung wird der Schacht-  
transportwagen zur Förderung nach über Tage zur Neubeladung auf einer  
Warteposition bereitgestellt (Abb. 3.52).



**Abb. 3.52** Füllort mit bereitstehender Umladevorrichtung

### **Konzept für eine Umladevorrichtung**

Die Umladevorrichtung dient dazu, die TLB vom Schachttransportwagen abzuheben  
und auf die STEV abzusetzen. Der umgekehrte Vorgang zum Auslagern von TLB soll  
im Falle der Rückholung oder Bergung ebenfalls möglich sein.

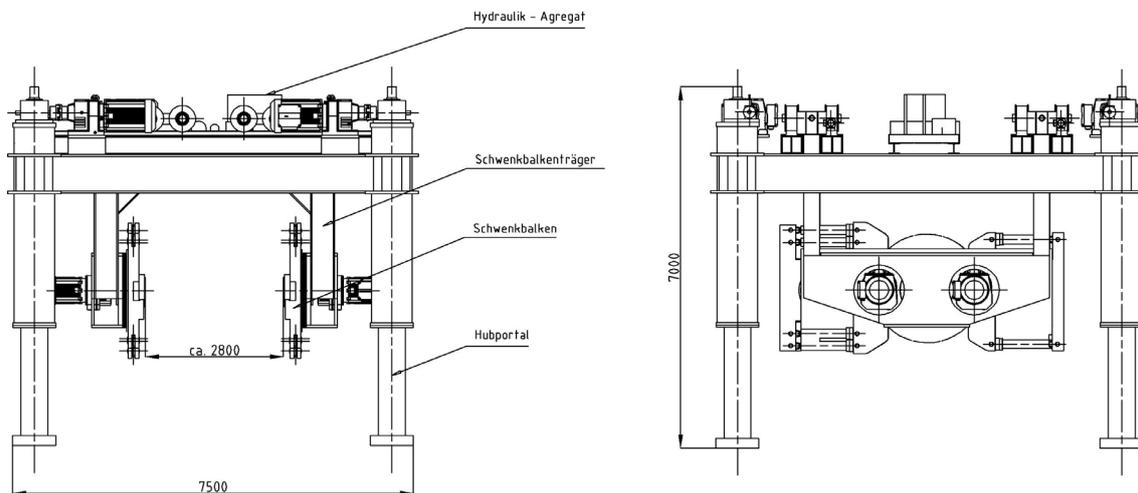
Die Konzeption der Umladevorrichtung hat nach der KTA 3902 4.3 /KTA 99/ und  
DIN 15018 /DIN 84/ zu erfolgen. Im Rahmen einer weiterführenden Bearbeitung sind  
aktuelle KTA-Änderungsentwürfe zu berücksichtigen.

## Technische Umsetzung einer Umladevorrichtung

Das Grundkonzept der Umladevorrichtung ist eine Modifizierung der in den 1990er Jahre gebauten und nach einer Testphase als genehmigungsfähig eingestuften Einlagerungsvorrichtung für POLLUX®-Behälter in Strecken (ELVIS).

Die Umladevorrichtung (Abb. 3.53) besteht aus den Baugruppen:

- Tragwerk, Stahlkonstruktion bestehend aus Rahmen und Längsträgern
- Schwenkbalkenträger horizontal, quer zu den Transportfahrzeugen verfahrbar
- Schwenkbalken mit in Längsrichtung einstellbaren Tragzapfenaufnahmen
- Hubportal mit Teleskopstützen und Antriebseinheiten



**Abb. 3.53** Transport- und Lagerbehälter-Umladevorrichtung

Die Umladevorrichtung hat folgende technische Daten:

Eigengewicht:	ca.	130 Mg
Nutzlast:	ca.	160 Mg
Länge:	ca.	8,0 m
Breite:	ca.	7,5 m mit elektrohydraulischem Antrieb für Drehbalken
Höhe max:	ca.	8,0 m
Energiebedarf:	ca.	100 KW
Energiezuleitung:		über Kabel
Steuerung:		Handsteuerung über portable Steuerung mit Teilautomatik
Positionierung:		Laserabstandsmessungen
Spindeltriebe:		4 Spindeltriebe mit 200 Mg/Trieb max. belastbar

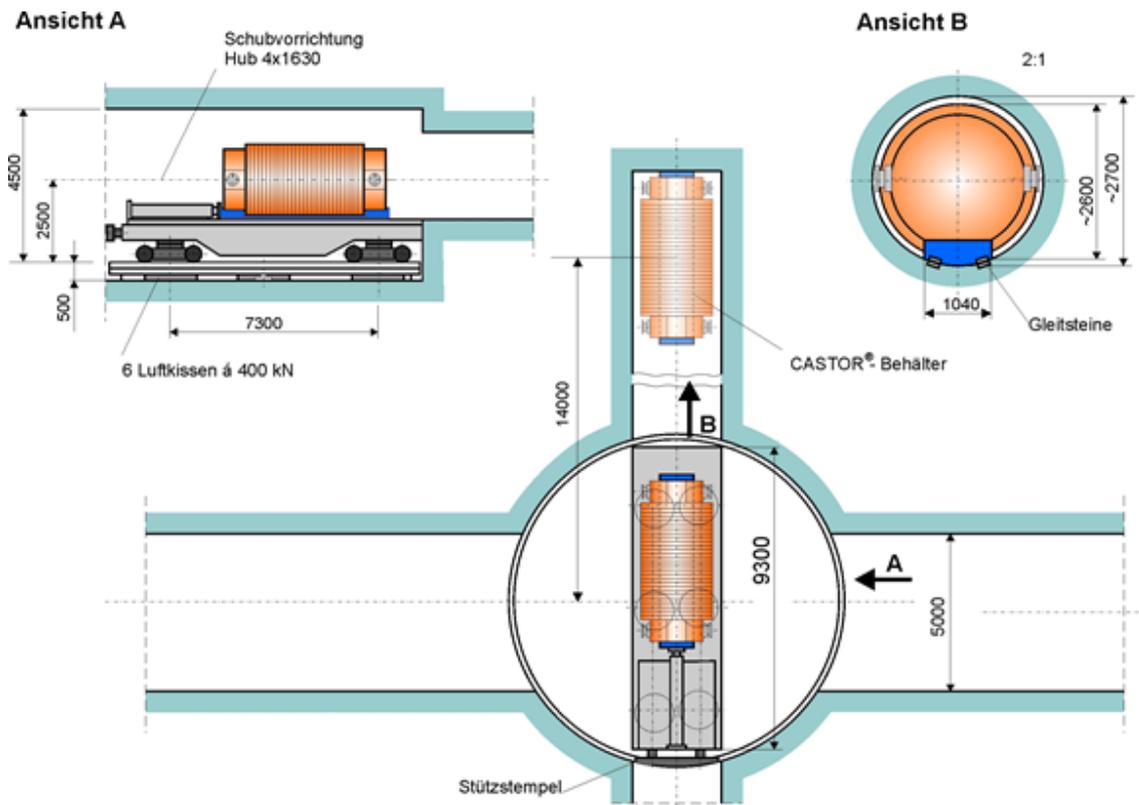
## **Streckentransport zum Einlagerungsfeld**

Für den Transport der mit dem TLB beladenen STEV vom Füllort zum vorgesehenen Einlagerungsort soll eine Batterie-Lokomotive zum Einsatz kommen. Eine solche wurde im Rahmen des FuE-Programms zur Direkten Endlagerung ausgedienter Brennelemente /DBE 95/ für übertägige Demonstrationsversuche erfolgreich eingesetzt.

## **Einlagerung im horizontalen Bohrloch**

Die Einlagerung von TLB analog zur Streckenlagerung von POLLUX<sup>®</sup>-Behältern musste verworfen werden, weil aus thermomechanischen Berechnungen erforderliche Zwischenlagerzeiten von bis zu 90 Jahren prognostiziert wurden, um die Auslegungstemperatur des Steinsalzes von 200 °C einzuhalten. Die Ursache für diese lange Zeitdauer liegt in der geringen Wärmeleitfähigkeit des Salzgrusversatzes in Verbindung mit seiner Kompaktionsfähigkeit und dem hohen Energieinhalt eines TLBs. Als Alternative wurde ein Konzept zur Einlagerung in kurzen horizontalen Bohrlöchern entwickelt. Die Berechnungen dazu sind in Kapitel 3.3.4.1 kurz dargestellt und bewertet worden. Die Ergebnisse dieser Berechnungen wiesen aus, dass eine direkte Endlagerung von TLB in horizontalen Bohrlöchern mit Zwischenlagerzeiten von ca. 40 Jahren aus thermischer Sicht möglich ist. Der erforderliche Bohrlochdurchmesser liegt ca. 100 mm über dem Durchmesser der TLB (über die Rippen gemessen). Die Bohrungen sind mit einem maximalen Durchmesser von 2.700 mm und einer Tiefe von ca. 12,5 m zu teufen /FIL 07/.

Abb. 3.54 stellt die Situation am Einlagerungsort dar. Zu sehen ist die STEV beladen mit einem TLB, die Drehscheibe (Version mit Luftkissentechnik) vor den zwei horizontalen Bohrlöchern sowie die Endposition des TLB, die im Bohrloch erreicht werden muss.



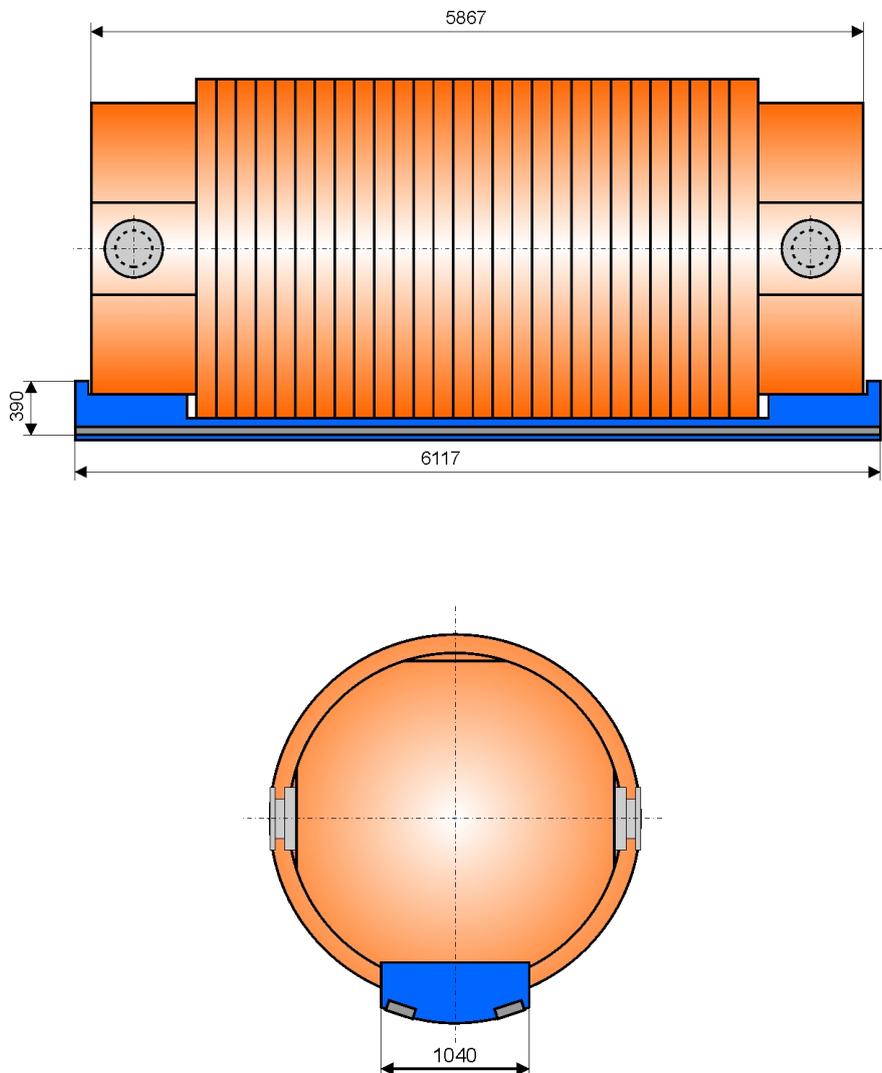
**Abb. 3.54** Situation am Einlagerungsort für die TLB-Einlagerung

Nach jetzigem Planungsstand werden nach der Einlagerung der TLB die Hohlräume um die TLB mittels einer Versatzlanze verblasen und vor dem Behälter wird Salzgrus bis zur Bohrlochkante eingebracht. Diese Schüttung hat eine ausreichende Stärke, um die Strahlung der eingelagerten TLB in Richtung Beschickungsstrecken weiter abzuschirmen.

### **Verlorener Schlitten mit Transport- und Lagerbehälter**

Aufgrund der Vielzahl unterschiedlicher TLB-Geometrien und der Querrippung der TLB zur Einschubrichtung in das horizontale Endlagerbohrloch ist es vorteilhaft, die einzelnen TLB auf verlorene Schlitten zu setzen und sie damit einzulagern. Die Kontur des verlorenen Schlittens ist im Bodenbereich dem Einlagerungsbohrlochradius angepasst (Abb. 3.55). Im Bodenbereich sind zwei Flachleisten (Material: Bronze mit Graphit) als Gleitschienen angebracht. Diese ermöglichen einerseits das Verschieben auf den Gleitschienen, die in der STEV integriert sind, und andererseits das Einschieben in das Bohrloch über dort eingebaute Flachleisten. Die Reibungszahl zwischen den Flachleisten ist 0,15. Durch die unter einem Winkel gegeneinander stehenden Gleitschienen erfolgt gleichzeitig die lagesichere Führung des verlorenen Schlittens beim Einlage-

rungsvorgang. Die Innenseite der verlorenen Schlitten kann an einzelne TLB individuell angepasst werden. Das Einschieben und die eventuelle Rückholung der verlorenen Schlitten mit aufgelegten TLB erfolgt durch Teleskopzylinder über die Stirnseiten der Schlitten.



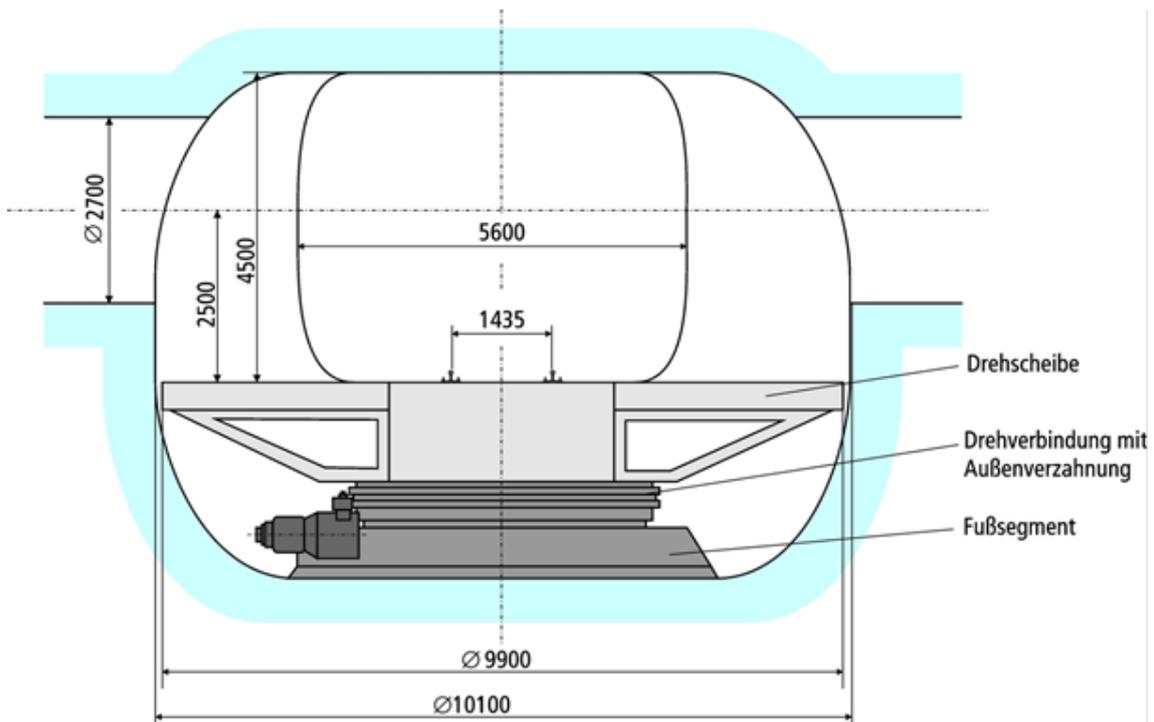
**Abb. 3.55** Verlorener Schlitten mit aufgesetztem CASTOR® V/19

### Einsatz einer Drehscheibe

Die STEV wird auf einer Drehscheibe vor den horizontalen Einlagerungsbohrlöchern durch die Batterielokomotive abgestellt. Die Drehscheibe dient zum Positionieren der STEV vor dem zu befüllenden Bohrloch. Zur Konstruktion der Drehscheibe gibt es grundsätzlich zwei Bauvarianten, wobei berücksichtigt werden muss, dass die Drehscheibe im weiteren Verlauf des Einlagerungsprozesses von Bohrlochreihe zu Bohrlochreihe umgesetzt wird.

### Variante 1: Konventionelle Drehscheibe

Die konventionelle Drehscheibe ist eine demontierbar ausgeführte Stahlbaukonstruktion, die aus dem Fußsegment, einer Kugel- oder Rollendrehverbindung mit Außenverzahnung für den Antrieb der Drehscheibe und der Drehscheibe selber mit den aufgesetzten Gleisen besteht (Abb. 3.56).



**Abb. 3.56** Konventionelle Drehscheibe

### Variante 2: Luftkissendrehscheibe

Der Gleisabschnitt im Bereich des Einlagerungsbohrortes ist auf Luftkissentransportelementen gelagert (siehe Abb. 3.54). Nach dem Drehscheibenprinzip wird dieser Gleisabschnitt (im Folgenden Luftkissendrehscheibe genannt) mit der beladenen STEV zu einer der zwei Einlagerungsbohrungen geschwenkt. Ein Schwenklager im Mittelpunkt des Einlagerungsbohrortes gewährleistet die erforderliche achsenparallele Positionierung vor dem jeweiligen Bohrlocheingang. Die erforderliche Schwenkarbeit ist aufgrund der Luftkissentechologie sehr gering und kann über eine mobile, handbetriebene Winde aufgebracht werden.

Die Luftkissendrehscheibe besteht aus einer Trägerlage, unter der sechs Luftkissenelemente in gleichmäßigem Abstand und symmetrisch angeordnet sind. Auf der Trä-

gerlage sind die Plateauwagengleise montiert. Wird den Luftkissen keine Druckluft zugeführt, liegt das Chassis der Luftkissenelemente fest auf der Sohle der Beschickungsstrecke auf. In diesem Zustand erfolgen Transportvorgänge auf dem Gleis und Einlagerungsvorgänge. Soll ein Schwenkvorgang durchgeführt werden, werden die Luftkissenelemente mit Druckluft beaufschlagt. Die Luftkissendrehscheibe wird dabei mit der STEV und dem Behälter darauf um ca. 50 mm angehoben.

Die Anlagenteile zur Erzeugung der Druckluft und zur Steuerung befinden sich im betroffenen Streckenabschnitt.

### **Konzeption einer Streckentransport- und Einlagerungsvorrichtung**

Die STEV dient dazu, die TLB vom Füllort über die Richtstrecke in die Beschickungsstrecke vor ein horizontales Bohrloch zu transportieren. Weiterhin ist sie in der Lage, den TLB auf seinem verlorenen Schlitten in das Bohrloch einzuschieben. Der umgekehrte Vorgang zur Rückholung oder Bergung eines TLB ist bei der Auslegung der STEV ebenso zu berücksichtigen.

Durch den gewählten Schienentransport ist bereits eine hohe Positionsgenauigkeit vor dem Bohrloch erreichbar. Inwieweit eine horizontale und vertikale Feinjustierung erforderlich ist, ist anhand der gewählten Detailkonstruktion im Rahmen der Ausführungsplanung zu untersuchen. Es ist weiterhin zu prüfen, ob die Konzeption nach der KTA 3902 4.3 /KTA 99/ zu erfolgen hat. Im Rahmen der Planungen sind dann aktuelle KTA-Änderungsentwürfe zu berücksichtigen.

### **Technische Umsetzung einer Streckentransport- und Einlagerungsvorrichtung**

Das Grundkonzept der technischen Umsetzung ist ein gleisgebundener, eigenantriebsloser Plateauwagen. Auf dem Chassis ist die entsprechende Technik zum Einschieben des TLB in das Bohrloch integriert. Die Konstruktion der STEV ist durch das Transportgewicht der TLB und die Bedingungen des untertägigen Transport- und Einlagerungsbetriebes bestimmt. Die Last des TLB wird über den verlorenen Schlitten von der Vorrichtung aufgenommen. Die weitere Lastabtragung erfolgt mit acht einzeln aufgehängten Laufrädern, ähnlich wie im Waggonbau, über zwei Drehgestelle. Das Spurmaß des Plateauwagenfahrwerks ist auf 1.435 mm (Bundesbahnnormalspur) festgelegt worden. Der minimale Kurvenradius der Schienen beträgt 25 m. Vorrangige Be-

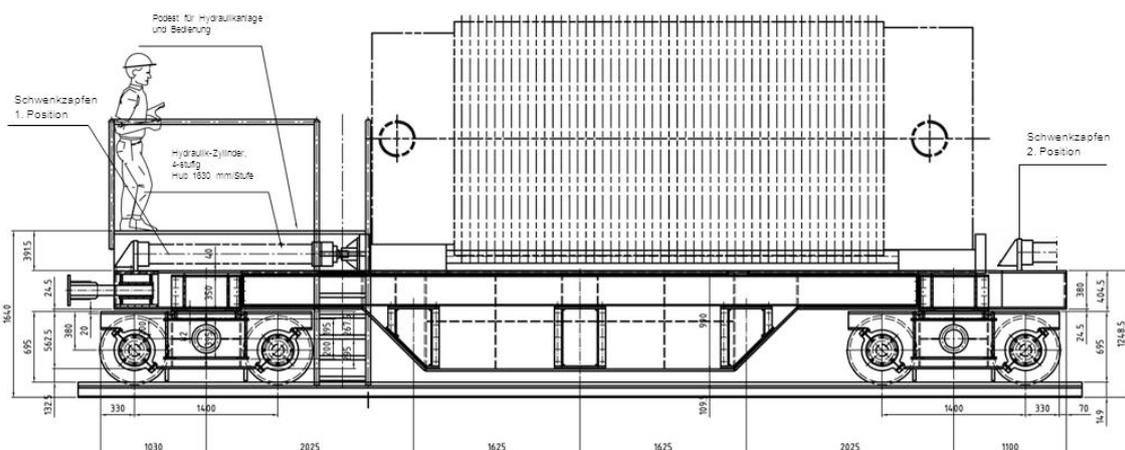
deutung kommt einer möglichst geringen Bauhöhe der STEV zu, da die Transporthöhe des TLB die Höhe der STEV und somit die Streckenhöhe beeinflusst.

Aufgrund der Einsatzbedingungen der STEV ohne wechselnde über- und untertägige Aufenthaltszeiten sind alle Bauteile keinen extremen Korrosionsbedingungen unterworfen. Die beweglichen Teile sind weitestgehend aus nicht korrodierenden Werkstoffen gefertigt und die Lagerungen sind sehr gut zu kapseln. Bei allen Oberflächen sind – soweit möglich – dekontaminierungsfähige Schutzanstriche aufzubringen. Die Bauteile erfüllen die Voraussetzungen für Dekontaminationsmaßnahmen durch ebene, geschlossene Oberflächen.

Zur Sicherung einer abgekuppelten STEV gegen Wegrollen ist eine Feststellbremse einzubauen. Auslegungsgrößen sind eine mit dem schwersten TLB beladene STEV und ein festzulegendes maximales Gefälle der Gleise. Jeweils stirnseitig werden Hydraulikpuffer angebracht.

Die STEV besteht aus den Baugruppen:

- Laufwerke
- Oberwagen
- Hydraulikaggregat und Zylinder
- Steuerstand



**Abb. 3.57** Streckentransport- und Einlagerungsvorrichtung (STEV)

Die STEV hat folgende technische Daten:

Eigengewicht:	ca.	30 Mg
Nutzlast:	ca.	160 Mg
Länge:	ca.	9,5 m
Breite:	ca.	2,5 m

Die Steuerung des Einlagerungsvorgangs kann von der STEV oder vom Führerhaus der Batterielokomotive durchgeführt werden.

### **Betriebliche Abläufe zur Einlagerung**

Im Folgenden werden die Randbedingungen und die erforderlichen Abläufe zur Einlagerung von TLB beschrieben und soweit möglich der Zeitbedarf abgeschätzt.

Es wird angenommen, dass alle Richtstrecken aufgefahren sind. In dem in Betrieb befindlichen Einlagerungsfeld wird die erste Beschickungsstrecke erstellt und in ihr alle Drehscheibenpositionen vorbereitet. Die erste Drehscheibenposition an der nördlichen Richtstrecke wird mit der Drehscheibe versehen. Mit Hilfe der kleinen Tunnelbohrmaschine werden dann die ersten beiden kurzen Bohrlöcher fertiggestellt. Die Auffahrung weiterer Bohrlöcher erfolgt dann parallel zur Einlagerung, dem Einlagerungsvorgang vorlaufend, so dass die Grenze zwischen Kontroll- und Überwachungsbereich nach Vorbereitung des Einlagerungsortes verschoben werden kann.

Von der südlichen Richtstrecke aus werden die weiteren Beschickungsstrecken je nach Bedarf aufgefahren. Beim Abschluss der Einlagerungsvorgänge in der vorherigen Beschickungsstrecke wird die finale Verbindung der nächsten aufgefahrenen Beschickungsstrecke zur nördlichen Richtstrecke durch Durchbruch des verbliebenen Restpfeilers zwischen Beschickungsstrecke und nördlicher Richtstrecke hergestellt. Somit ist die Auffahrung der Einlagerungsorte weitgehend vom Einlagerungsbetrieb entkoppelt.

### **Umladung am Füllort**

Die Umladeeinrichtung ist stationär am Füllort installiert. Im ersten Schritt wird die STEV durch eine Krananlage im Füllortbereich mit dem zum angelieferten TLB passenden verlorenen Schlitten beladen. Parallel dazu wird durch die Umladeeinrichtung der angelieferte TLB vom Schachttransportwagen abgehoben. Der entladene Schachttransportwagen wird durch die unterflurige Verschiebeinrichtung aus dem Bereich der

Umladeeinrichtung in Richtung Förderkorb entfernt und die STEV dann mit Hilfe der Batterielokomotive in die Umladeposition eingeschoben und der TLB aufgelegt. Nach dem Auflegen steht die STEV zum Streckentransport bereit.

### **Streckentransport**

Der Gesamttransportweg über die Richtstrecken im Grubengebäude beträgt maximal ca. 4.000 m. Im Durchschnitt sind somit 2.000 m Entfernung anzusetzen. Die Transportgeschwindigkeit ist auf maximal 10 km/h limitiert. Aufgrund der hohen Transportlasten und der zu erwartenden Bremswege ist eine Verringerung der Transportgeschwindigkeit bei einer vertieften Planung zu erwarten. Konservativ wird von einer Transportgeschwindigkeit von 5 km/h im Durchschnitt ausgegangen.

### **Einlagerungsvorgang**

Nach dem Erreichen der Beschickungsstrecke und dem Einfahren in dieselbe überfährt die Batterielokomotive die Drehscheibe und kuppelt die STEV auf der Drehscheibe ab. Die Steuerung der Vorgänge bei der Einlagerung kann prinzipiell aus dem der STEV zugewandten Führerhaus der Batterielokomotive durchgeführt werden. Im ersten Schritt wird die Drehscheibe mit der STEV um 90° gedreht und zu dem Einlagerungsbohrloch positionsgenau ausgerichtet. Im zweiten Schritt erfolgt die Einrichtung des Widerlagers über die Hydraulikpuffer des Oberrahmens. Grundsätzlich ist eine beidseitige formschlüssige Einspannung des Oberwagens möglich. Als letzter Schritt vor dem Einlagerungsvorgang erfolgt die Feinjustierung der Position des verlorenen Schlittens zu den Gleitschienen im horizontalen Bohrloch. Das Einschieben des verlorenen Schlittens mit aufgelegtem TLB erfolgt wiederum in zwei Schritten. Im ersten Schritt wird der mit dem verlorenen Schlitten gekoppelte 4-stufige Teleskopzylinder vollständig eingefahren. Nach Erreichen der Endposition wird der Schwenkzapfen gelöst und der noch mit dem verlorenen Schlitten verbundene 4-stufige Zylinder eingefahren. Damit erreicht der Schwenkzapfen die zweite Befestigungsposition an der STEV, wird befestigt und kann im zweiten Schritt den verlorenen Schlitten mit dem TLB in die Endposition schieben (Abb. 3.57).

Nach dem Lösen der Verbindung zwischen 4-stufigem Teleskopzylinder und dem verlorenen Schlitten wird der Teleskopzylinder eingefahren und in die ursprüngliche Position auf der STEV mittels einer Hilfseinrichtung wieder zurückgezogen. Das Widerlager wird über das Einfahren der Hydraulikpuffer wieder gelöst und die STEV steht nach er-

neuer Betätigung der Drehscheibe zur Fahrt in Richtung Füllort zur Abholung des nächsten TLB für den zweiten Einlagerungsvorgang an dieser Drehscheibenposition zur Verfügung.

### **Versatzvorgang**

Nach dem Einlagern jeweils eines Behälters erfolgt das Einblasen von Salzgrus in den Ringraum um den Behälter mittels einer Versatzlanze. Zur Vermeidung von Staubausbreitung durch den Versatzvorgang ist vorab eine Staubabsaugung zu installieren. Nach dem Versetzen des engen Ringraums kann z. B. über einen Schleudertruck zielgenau der verbleibende Hohlraum im Einlagerungsbohrloch versetzt werden, bis der Schüttkegel den Bohrlochmund erreicht hat.

### **Vorbereitung des neuen Einlagerungsortes**

Nach dem Versetzen der beiden eingelagerten TLB erfolgt die Inbetriebnahme eines neuen bergbaulich vorbereiteten Einlagerungsortes. Hierzu sind erforderlich:

- Verlängerung der saugenden oder blasenden Luttentouren bis zum neuen Einlagerungsort
- Herrichtung Beleuchtung und Energieversorgung
- Demontage der Drehscheibe und Montage am neuen Einlagerungsort
- Einbau der Schienenverbindung an der vorhergehenden Drehscheibenposition

## **3.3.4.3 Betrieblicher Strahlenschutz**

### **3.3.4.3.1 Geltendes Regelwerk**

Für die Lagerung der Transport- und Lagerbehälter (Differenzbetrachtung) gilt dasselbe Regelwerk wie im Kapitel 3.3.2.3.1 für die Streckenlagerung (Variante B1) beschrieben.

### **3.3.4.3.2 Maßnahmen des betrieblichen Strahlenschutzes**

Die Maßnahmen des betrieblichen Strahlenschutzes bei der Variante B2 sind dieselben wie die im Kapitel 3.3.2.3.2 beschriebenen Maßnahmen bei der Variante B1.

#### **3.3.4.3.2.1 Einteilung des Endlagers in Strahlenschutzbereiche**

Für die Lagerung der Transport- und Lagerbehälter (Differenzbetrachtung) gelten dieselben Regelungen bei der Einteilung der Strahlenschutzbereiche wie bei der Streckenlagerung (Variante B1) im Kapitel 3.3.2.3.2.1.

#### **Kontrollbereiche**

Zum Kontrollbereich bei der Lagerung der Transport- und Lagerbehälter (Differenzbetrachtung) zählen dieselben übertägigen und untertägigen Räume und Bereiche des Endlagers wie bei der Streckenlagerung (Variante B1) im Kapitel 3.3.2.3.2.1.

#### **Überwachungsbereiche**

Als Überwachungsbereich können alle Bereiche, die den Kontrollbereich umgeben, ausgewiesen werden.

#### **Sperrbereiche**

Bei der Lagerung von Transport- und Lagerbehältern ist bislang kein Sperrbereich vorgesehen.

#### **3.3.4.3.2.2 Radiologische Überwachung**

Für die Lagerung von Transport- und Lagerbehältern (Differenzbetrachtung) gelten bei der radiologischen Überwachung die gleichen Aussagen wie bei der Streckenlagerung (Variante B1) im Kapitel 3.3.2.3.2.2.

#### 3.3.4.4 Bewetterung

Die bisherigen Ergebnisse der Konzeptstudie „DIREGT“ dienen als Grundlage für die weiteren Betrachtungen. In /BOL 11/ und im vorliegenden Bericht zum AP 6 wurde kein vollständiges Grubengebäude für die Einlagerung der TLB konzipiert.

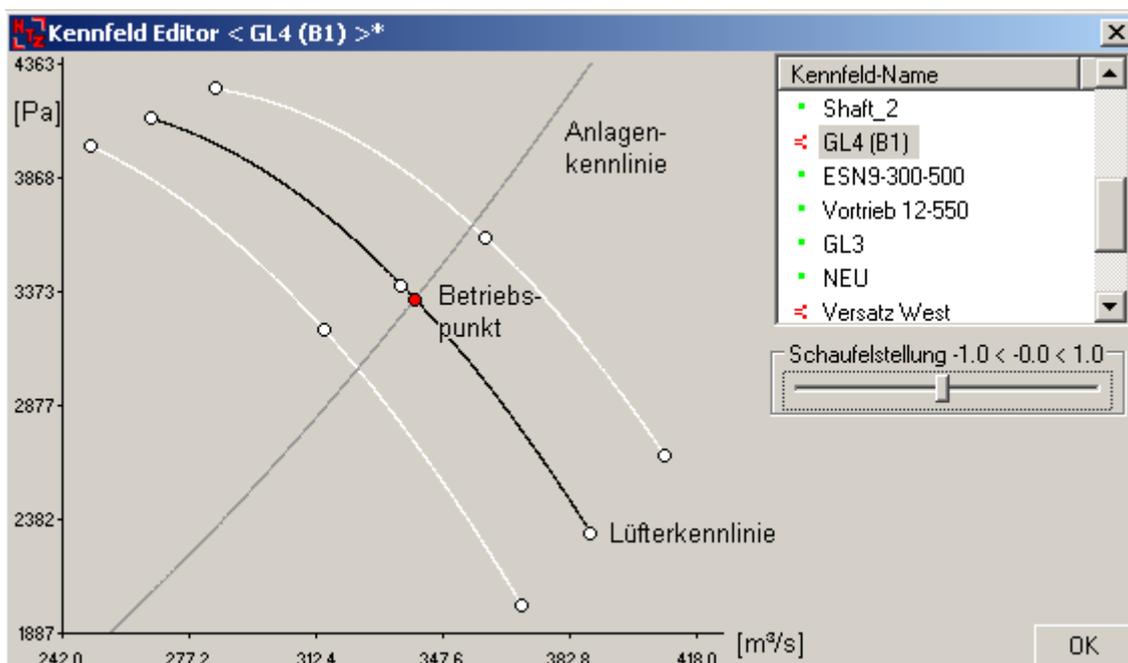
Von der Einlagerungstrecke aus werden am jeweiligen Einlagerungsort zwei horizontale Bohrungen errichtet. Die einzelnen Einlagerungsorte besitzen einen Abstand von 27,5 m, parallel zur Streckenachse. Der senkrechte Abstand zwischen Behältermitte und Streckenmitte beträgt 14 m. Innerhalb der Einlagerungstrecken entstehen an den Einlagerungsorten regelmäßige Aufweitungen mit einer Breite von 9,3 m. Der regelmäßig wechselnde Streckenquerschnitt führt aus wettertechnischen Gesichtspunkten zu einer Erhöhung des Streckenwiderstandes und somit zu strömungstechnisch ungünstigeren Verhältnissen.

Die Bewetterung der Variante B2 soll wie auch bei den anderen Varianten einsöhlig und rückläufig erfolgen. Aus dem bekannten Einlagerungsschema wurde für die wettertechnischen Betrachtungen anhand des aktuellen Mengengerüsts die Ausprägung eines möglichen Grubengebäudes abgeschätzt. Die Einlagerungstrecken befinden sich, wie auch in Variante C, querschlägig zwischen den Richtstrecken. Die Richtstrecken besitzen die gleichen Querschnitte wie in der Variante B1 23 m<sup>2</sup> in der Richtstrecke Süd und 24 m<sup>2</sup> in der Richtstrecke Nord. Mit dem gewählten Layout wird ein minimaler Auffahrungsaufwand erreicht. Die Streckenlänge variiert je nach den einzuhaltenden Sicherheitsabständen zu den relevanten geologischen Schichtgrenzen. Das Grubengebäude weist somit eine ähnliche Ausdehnung wie das der Variante B1 auf.

Bedingt durch den gegenwärtigen Planungsstand der Variante B2 ergeben sich für den Betriebsablauf noch Unsicherheiten bezüglich der genauen Anzahl und Arbeitsweise der Betriebspunkte. Da die Betriebsabläufe während der Einlagerung den Vorgängen der Bohrlochlagerung (Variante C) ähneln, werden dieselben Betriebspunkte und Wettermengen angenommen. Daraus ergibt sich ein mittlerer Wetterbedarf von 5.800 m<sup>3</sup>/min. Wie auch bei den vorangegangenen Betrachtungen zur Variante B1 und C muss die Bewetterung für das gesamte Grubengebäude erfolgen. Infrastrukturbereich und Grubenteil der optionalen Variante A werden mit berücksichtigt.

Aus den getroffenen Annahmen leitet sich ein Bewetterungsschema ab, in dem die zu erwartenden Volumenströme zwischen 20.000 m<sup>3</sup>/min und 22.000 m<sup>3</sup>/min liegen und

somit den Erkenntnissen aus den Betrachtungen zur Variante B1 und C entsprechen. Der über die Betriebszeit weitgehend konstante Volumenstrom begründet sich daraus, dass zwar das Grubengebäude stetig kleiner wird, die Betriebsabläufe und somit die Wettermengen aber bestehen bleiben. Dieser Sachverhalt ist auch bei den anderen Varianten festzustellen. Zu Beginn der Einlagerung beläuft sich der zu erwartende Druckbedarf am Lüfter auf rund 3.800 Pa. Mit kleiner werdendem Grubengebäude sinkt auch der Druckbedarf weiter. Volumen- und Druckbedarf ähneln den Kenngrößen der Variante B1. Wie auch bei der Streckenlagerung wurde die Kennlinie des Hauptgrubenlüfters aus einem für axiale Grubenventilatoren typischen Kennfeld ausgewählt.



**Abb. 3.58** Kennfeld Hauptgrubenlüfter

Aus den Erkenntnissen der Modellbetrachtungen zur Variante B1 und C können die Bedingungen innerhalb eines möglichen Grubengebäudes der Variante B2 abgeleitet werden. Die erstellten Modelle zeigen, dass unter den gewählten Parametern die einschichtige Bewetterung des Grubengebäudekonzeptes mit den getroffenen Annahmen möglich ist.

### 3.3.4.5 Verfüll- und Verschlussmaßnahmen

Die Variante B2 unterscheidet sich von der Variante B1 dadurch, dass im Ostflügel des Endlagers die wärmeentwickelnden Abfälle nicht in POLLUX®-Behältern in horizontale

Strecken eingelagert, sondern in Transport- und Lagerbehältern in einzelne, dafür hergestellte horizontale Bohrungen geschoben werden. Der Ringraum von wenigen Zentimetern zwischen Einlagerungsbohrlochwand und Transport- und Lagerbehälter wird mit Salzgrus verfüllt.

Im Verfüllkonzept ist für die Variante B2 vorgesehen, die Begleitstrecken mit Salzgrus zu versetzen und deren Endbereiche ähnlich wie bei den Querschlägen in der Variante B1 mit Pfropfen aus Sorelbeton A1 zu verschließen.

Es werden keine zusätzlichen Anforderungen an das Verfüll- und Verschlusskonzept der Variante B2 gestellt. Deshalb wird für die Richtstrecken und die übrigen Grubenbaue das gleiche Verfüllkonzept wie bei der Variante B1 vorgesehen. Das gilt auch für die technischen Verschlussmaßnahmen, die Streckenverschlüsse und die Schachtverschlüsse. Auch hier gelten keine zusätzlichen Anforderungen. Eine separate Masenermittlung wurde nicht erstellt.

#### **3.3.4.6 Rückholungskonzept**

In Variante B2 wird die Einlagerung von Transport- und Lagerbehältern in einer Streckenlagerung betrachtet. Im Gegensatz zur Streckenlagerung von POLLUX<sup>®</sup>-Behältern der Variante B1 werden diese jedoch nicht auf einer Einlagerungsstrecke abgelegt, sondern einzeln in horizontale Bohrlöcher geschoben.

Die Betrachtung der Rückholung zu dieser Variante erfolgt analog der Betrachtung der Rückholung zu Variante B1.

##### **3.3.4.6.1 Anforderungen, Annahmen und Randbedingungen zur Rückholung**

Für die Anforderungen, Annahmen und Randbedingungen zur Rückholung gelten die in Kapitel 3.3.2.6.1 formulierten Ausführungen.

### **3.3.4.6.2 Rückholkonzept**

Für die Erstellung des Rückholkonzeptes zu Variante B2 sind zwei wesentliche Unterschiede zu Variante B1 zu benennen.

1. Layout der Einlagerungsfelder
2. Masse der einzulagernden Endlagerbehälter

Wie in Abb. 3.49 gezeigt, werden die Transport- und Lagerbehälter nicht der Ausrichtung der Einlagerungsstrecke folgend abgelegt, sondern senkrecht zur Einlagerungsstrecke in horizontale Bohrlöcher geschoben.

Die Masse eines Transport- und Lagerbehälters ist mit bis zu 160 Mg deutlich höher, als die Masse eines POLLUX<sup>®</sup>-Behälters (65 Mg).

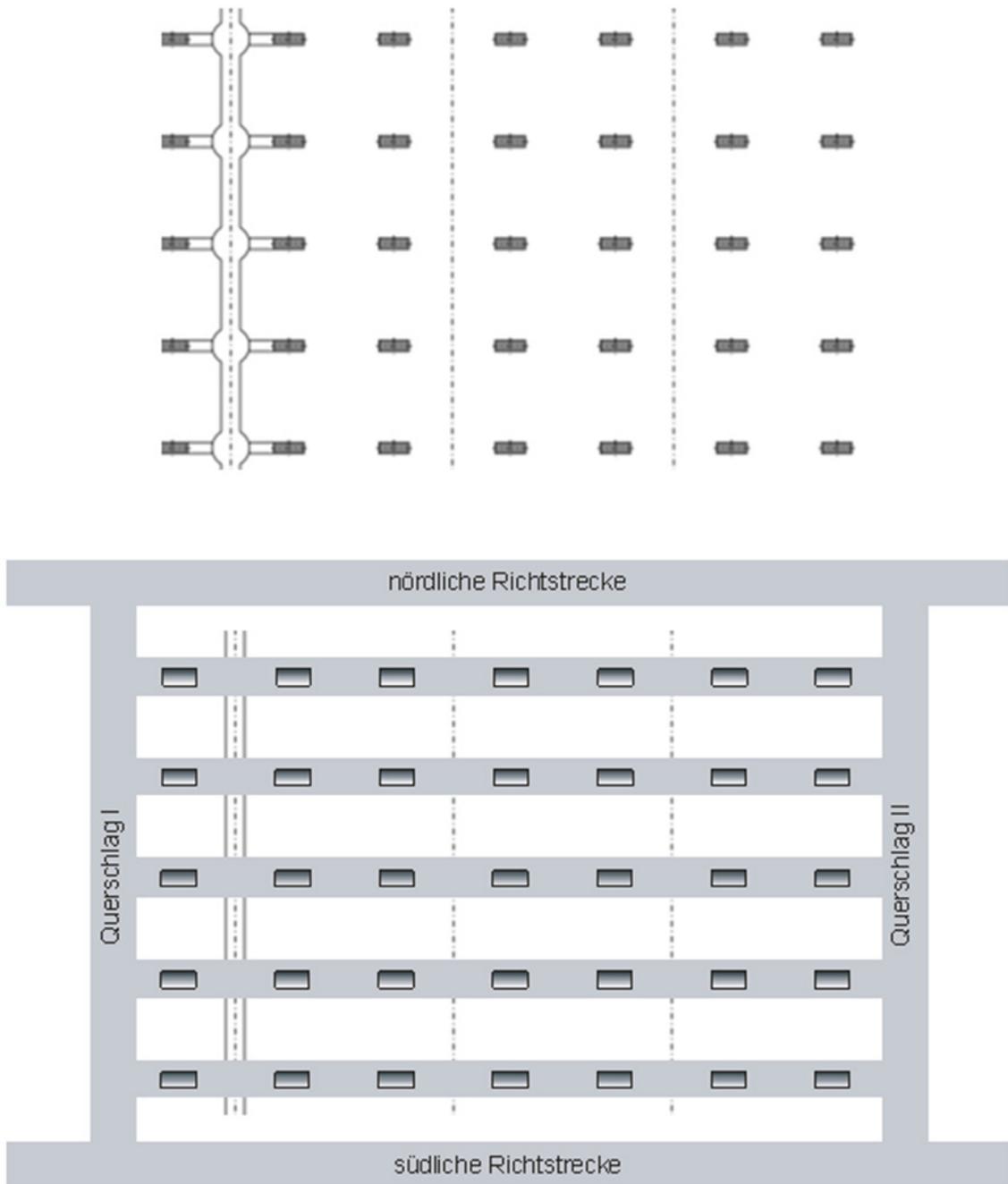
#### **Zeitpunkt der Rückholung**

Es gelten die in Kapitel 3.3.2.6.2 formulierten Ausführungen.

#### **Prozessschritte der Rückholung**

Die Prozessschritte der Rückholung für Variante B2 können wie folgt benannt werden:

- Wiederauffahren von Richtstrecken
- Auffahren von Querschlägen
- Auffahren von durchschlägigen Rückholstrecken
- Kühlung der aufgefahrenen Rückhofelder
- Freilegen der Transport- und Lagerbehälter
- Aufnahme der Transport- und Lagerbehälter
- Transport der Transport- und Lagerbehälter unter und über Tage



**Abb. 3.59** Ausschnitt eines Einlagerungsfeldes für Variante B2

Abb. 3.59 zeigt den Ausschnitt eines Einlagerungsfeldes für Variante B2. Nördlich und südlich des Feldes befinden sich die Richtstrecken des Grubengebäudes. Zwischen den Richtstrecken werden die Einlagerungsstrecken aufgefahren. Querschläge sind für die Einlagerung dieser Variante nicht notwendig.

Für die Rückholung der Transport- und Lagerbehälter werden in einem ersten Schritt die Richtstrecken neu aufgefahren. Diese werden darauf folgend mit Querschlägen verbunden (siehe Abb. 3.59).

Senkrecht zu den ehemaligen Einlagerungsstrecken werden längs der eingelagerten Transport- und Lagerbehälter beidseitig durchschlägige Rückholstrecken mit einem Querschnitt von 24 m<sup>2</sup> zwischen den Querschlägen aufgefahren. Sind die Rückholstrecken eines Feldes aufgefahren, erfolgt die Kühlung des Feldes.

Das Freilegen der Behälter erfolgt durch die in Kapitel 3.3.2.6.2 beschriebene Maschinentechnik. Sind die Transport- und Lagerbehälter in Gänze freigelegt, können die Transport- und Lagerbehälter durch eine Rückholvorrichtung gemäß Variante B1, die an die Massen der TLB angepasst wurde, aufgenommen werden. Im Gegensatz zu Variante B1 werden die TLB nicht auf eine Rückholstrecke gezogen, sondern direkt durch die Rückholvorrichtung aufgenommen. Der Transport der Behälter kann durch die für die Einlagerung vorgesehene Maschinentechnik erfolgen.

Für die Punkte

- Schema der Streckenauffahrung,
- Abschätzung und Beherrschung der klimatischen Bedingungen,
- Betrachtungen zur Gebirgsmechanik,
- Zeitplanung der Rückholung,
- radiologisches Monitoring

gelten die in Kapitel 3.3.2.6.2 beschriebenen Inhalte.

### **Zwischenlagerung**

Sind die Transport- und Lagerbehälter der Variante B2 zurückgeholt, ist der weitere Verbleib der Abfälle zu betrachten. Zurückgeholt werden im Wesentlichen Transport- und Lagerbehälter des Typs CASTOR<sup>®</sup>.

Diese CASTOR<sup>®</sup>-Behälter besitzen eine Zulassung als Transport- und Lagerbehälter. Eine Konditionierung der Abfälle nach erfolgter Rückholung ist daher nicht notwendig. Für den Zeitpunkt der Rückholung jedoch ist eine hinreichende Lagerkapazität für die

mit rückgeholten Abfällen beladenen Transport- und Lagerbehälter vorzusehen. Hierfür sind Zwischenlager in der Konzeption zu berücksichtigen.

#### **3.3.4.7 Bergung von Transport- und Lagerbehältern**

Die Anforderungen an die Abfallbehälter gelten im Wesentlichen auch gemäß Kapitel 3.3.2.7. Jedoch wird für Transport- und Lagerbehälter nicht die Anforderung formuliert, dass diese über ihre Tragzapfen handhabbar sein sollen.

### **3.4 Zeitabschätzung**

Im Rahmen der Endlagerplanungen wurde der grobe Zeitbedarf für die Phasen von der Erkundung bis zur Inbetriebnahme, für den Betrieb und die Stilllegung abgeschätzt. Für die Realisierung eines Endlagers am Standort Gorleben sind demnach verschiedene Phasen zu durchlaufen. Bis zum Zeitpunkt der Betriebsaufnahme sind folgende Phasen abzuschließen bzw. durchzuführen:

- Abschluss der untertägigen Erkundung einschließlich geowissenschaftlicher Auswertung und Bewertung
- Planung des Endlagers mit den Schwerpunkten Konzept- und Entwurfsplanung, Durchführung der Sicherheitsanalyse mit dem Ziel einer Eignungsaussage sowie Erstellung von Planunterlagen inkl. der Umweltverträglichkeitsprüfung
- Parallele Planung, Entwicklung, Bau und Demonstration von Transport-, Einlagerungs-/ Rückholmaschinen und Einrichtungen
- Durchführung des Planfeststellungsverfahrens mit dem Einreichen des Plans, der Begutachtung, Auslegung, Erörterung und dem Planfeststellungsbeschluss
- Ausführungsplanung des Endlagers und Errichtung sowie Inbetriebnahme der über- und untertägigen Anlagen und Einrichtungen

In den thermischen Berechnungen zur Variante B1 und zur Variante C wurde unter Berücksichtigung aller vorgegebenen Rahmenbedingungen (Abschaltzeitpunkt der letzten Reaktoren, Behälterkonzept, Zwischenlagerzeit etc.) festgestellt, dass die Betriebszeit des Endlagers aufgrund dieser Bedingungen frühestens Ende 2074 abgeschlossen werden kann.

Betriebliche Gründe, wie Anforderungen an die Bewetterung sowie Logistik, sprechen dafür, mit der Einlagerung thermisch nicht relevanter Endlagerbehälter im Jahr 2035 zu beginnen. Damit wird die im Rahmen des AP 5 geschätzte Betriebszeit von 40 Jahren für das Endlager Gorleben bestätigt.

Für die Einlagerung von Transport- und Lagerbehälter (Variante B2) kann davon ausgegangen werden, dass eine ähnliche Betriebszeit benötigt wird. Falls die Einlagerung von nicht wärmeentwickelnden Abfällen (Variante A) tatsächlich mit realisiert wird, ist die Betriebszeit dafür parallel zur Einlagerung der wärmeentwickelnden Abfälle und der ausgedienten Brennelemente ausreichend.

Nach Abschluss der Betriebszeit folgt die Stilllegungsphase. Die Verfüllmaßnahmen erfolgen zum überwiegenden Teil, mit Ausnahme der Infrastrukturbereiche, bereits während der Betriebsphase. Abschließend werden die Streckenverschlüsse errichtet, der Infrastrukturbereich mit den festgelegten Maßnahmen verfüllt und die Schächte verfüllt und verschlossen. Nach dem Auflegen des Schachtdeckels als Abschluss werden die letzten Tagesanlagen beseitigt und das Gelände renaturiert. Für diese Stilllegungsmaßnahmen wird eine Dauer von ca. fünf Jahren abgeschätzt.



## **4 Optimierungsmöglichkeiten**

Im Rahmen der Endlagerplanungen und -auslegungen der VSG wurden die nach vorliegenden Kenntnissen und bekannten Anforderungen technisch optimalen Lösungen entwickelt und beschrieben. Der Optimierungsprozess wird unter Berücksichtigung der Ergebnisse der innerhalb der VSG durchgeführten Sicherheitsanalyse bei einer nächsten Sicherheitsanalyse weitergeführt und ist somit eine Verpflichtung, kontinuierlich für die jeweils geltenden Anforderungen – die mit wachsenden Erkenntnissen variieren können – technisch optimierte Lösungen zu entwickeln.

### **4.1 Optimierungsziele**

Optimierungsziele für die Planungsphase und den Betrieb eines HAW-Endlagers sind im Kapitel 5 der BMU-Sicherheitsanforderungen /BMU 10/ definiert. Dort heißt es im Artikel 5.1, dass vor wesentlichen Entscheidungen eine Optimierung auf Basis von Sicherheitsanalysen und Sicherheitsbewertungen durchzuführen sind. Dabei wird darauf hingewiesen, dass der Tiefgang der Untersuchungen sich nach der Bedeutung der jeweiligen Entscheidung richtet. Weiter heißt es dort: „Diese Optimierung ist unter Berücksichtigung aller Aspekte des Einzelfalls und unter Beachtung der Ausgewogenheit folgender Optimierungsziele zu leisten:

- Strahlenschutz in der Betriebsphase
- Langzeitsicherheit
- Betriebssicherheit des Endlagers
- Zuverlässigkeit und Qualität des langfristigen Einschlusses der Abfälle
- Sicherheitsmanagement
- technische sowie finanzielle Realisierbarkeit“

Unter Abwägung dieser Ziele soll das Endlager schrittweise entwickelt werden. Für die Optimierungen sollen im Rahmen der Planungsarbeiten zur VSG die Endlagerauslegung für die betrachteten Varianten hinsichtlich erkennbarer Optimierungsmöglichkeiten untersucht und erste Ansätze aufgezeigt werden. Unter Berücksichtigung der abschließenden Ergebnisse der VSG wären in einer nachfolgenden Planungsphase weitere Optimierungen durchzuführen. Insofern konzentrieren sich die nachfolgenden

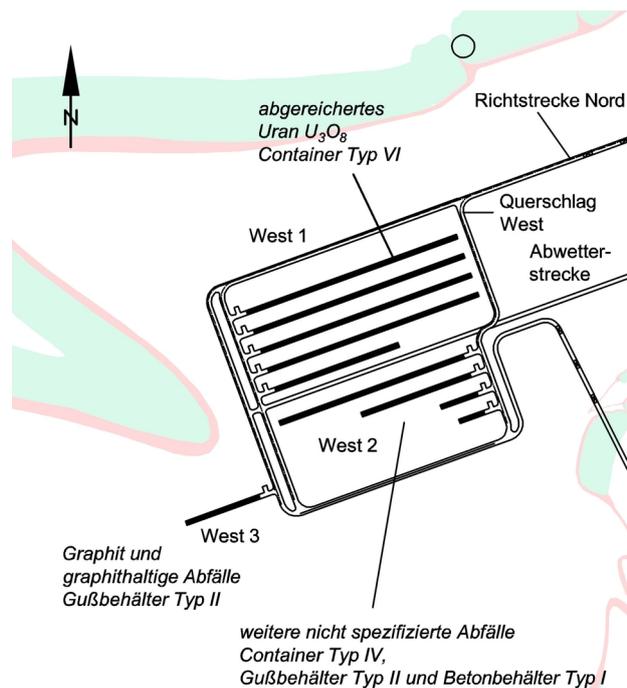
Überlegungen auf erste Optimierungsmöglichkeiten der Endlagerauslegung basierend auf den Erkenntnissen der VSG. Dabei wurden auch Erkenntnisse und Zwischenergebnisse aus anderen Arbeitspaketen berücksichtigt. Dieses waren zum einen die Planungen für die geotechnischen Barrieren und zum anderen Zwischenergebnisse aus der Konsequenzenanalyse. Die Optimierungsmaßnahmen, die daraus abgeleitet wurden, betreffen Aspekte der Grubengebäudegestaltung für den Bereich, der mit vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfällen gefüllt ist, Aspekte der Wetterführung (zusätzliche Abwetterstrecken) sowie die Position von Endlagerbehältern mit Strukturteilen von ausgedienten Brennelementen. Überlegungen dazu sind in den nachfolgenden Kapiteln beschrieben. Im Einzelnen handelt es sich um die Themen:

- Langzeitsicherheit (Zuverlässigkeit und Qualität der langfristigen Verschlüsse)
- Betriebssicherheit
- Zukünftiges unbeabsichtigtes menschliches Eindringen (Human intrusion)
- Optimierungsmöglichkeiten für Endlagerbehälter
- Optimierungsmöglichkeiten für Rückholungskonzepte

## **4.2 Optimierungsmöglichkeiten von Endlagerkonzepten**

### **4.2.1 Kammerlagerung (optionale Variante A)**

Eine Optimierungsmöglichkeit für die Kammerlagerung wird in einer Komprimierung der Einlagerungsfelder gesehen, wobei das aktuelle Mengengerüst berücksichtigt wird. Hierbei verkürzen sich die Transportwege und die genutzte Endlagerfläche verringert sich erheblich. Abb. 4.1 zeigt den möglichen Aufbau der Einlagerungsfelder West unter Nutzung der erforderlichen Mindestpfeilerbreiten zwischen Strecken und Kammern. Es ist zu prüfen, ob die langzeitsicherheitlichen Aspekte eventuell längere Pufferstrecken zwischen den belegten Kammern und den Streckenverschlüssen, die die Zufahrtsstrecken und die Wetterstrecke zum Schacht hin abdichten, erfordern.



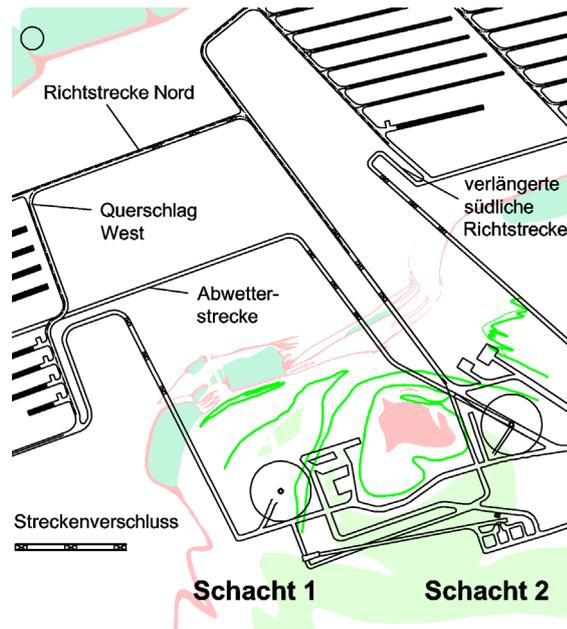
**Abb. 4.1** Einlagerungsfelder West für radioaktive Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung (optimiert)

#### 4.2.2 Streckenlagerung (Variante B1)

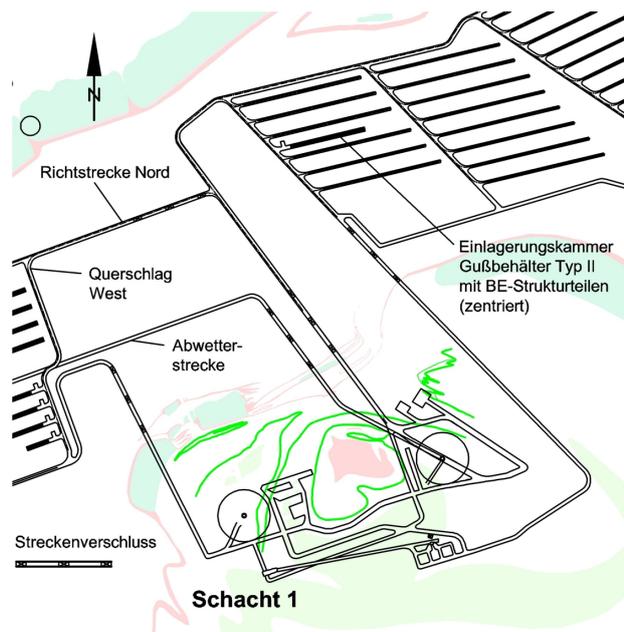
Die langzeitsicherheitlichen Untersuchungen zeigten, dass die Lage der Einzelstrecke für Brennelement-Strukturteile im Feld Ost 12, Strecke 7 (Kammer am Rand des Feldes), hinsichtlich eines frühen, dichten Einschlusses ungünstig gewählt wurde. Folgende Optimierungsvarianten stehen zur Auswahl:

- Verlängerung des Weges zwischen dem Streckenverschluss zum Schacht und der Einlagerungskammer oder
- Integration der Einlagerungskammer in die Mitte des Feldes, um eine deutliche Beschleunigung der Konvergenz aufgrund des thermischen Einflusses durch die in den Nachbarstrecken eingelagerten POLLUX<sup>®</sup>-Behälter mit ausgedienten Brennelementen zu erreichen.

Beide Varianten sind in Abb. 4.2 und in Abb. 4.3 dargestellt.



**Abb. 4.2** Endlagerkonzept mit verlängerter südlicher Richtstrecke



**Abb. 4.3** Zentrale Lage der BE-Strukturteile-Einlagerungskammer in Feld Ost 12

Welche Optimierungsmöglichkeit in Frage kommt, kann abschließend erst nach einer Bewertung der langzeitlichen Auswirkungen beider Möglichkeiten entschieden werden.

### 4.3 Betriebssicherheit

Der Nachweis des sicheren Endlagerbetriebes ist Voraussetzung für eine Betriebsgenehmigung. Insofern werden im Rahmen der VSG die betrieblichen Abläufe im Endlager hinsichtlich der Einhaltung von Sicherheitsvorschriften untersucht und mit Blick auf die in den Sicherheitsanforderungen des BMU /BMU 10/ formulierten Optimierungsziele im Arbeitspaket 12 bewertet /PEI 12/.

Für die vorliegenden Endlagerkonzepte wurde untersucht, ob es bereits zu Beginn der Endlagerplanung grundlegende Anforderungen aus Sicht der Betriebssicherheit gibt, die direkten Einfluss auf die Wahl der Variante haben. So ist z. B. eine zu überprüfende Grundanforderung an den Betrieb des Endlagers, ob mit den geplanten Betriebsabläufen und der verfügbaren Betriebstechnik die Sicherheitsanforderungen des Bergbaus und des Strahlenschutzes im bestimmungsgemäßen Betrieb sowie bei Betriebsstörungen durch geeignete technische und/oder organisatorische Maßnahmen gewährleistet werden.

In einer vorläufigen Bewertung wurde in /PEI 12/ festgestellt, dass für die Variante B1 (Streckenlagerung von POLLUX<sup>®</sup>-Behältern) diese Fragestellung im Rahmen des FuE-Programms DIREGT dem Stand von Wissenschaft und Technik gemäß untersucht worden ist. Im Rahmen des FuE-Programms wurde festgestellt, dass ein sicherer Transport und eine sichere Handhabung und Einlagerung von POLLUX<sup>®</sup>-Behältern gegeben ist. Insofern werden hierfür keine weiteren Anforderungen gestellt.

Für die Variante C (Bohrlochlagerung von Brennstabkaskillen und Triple-Packs) stehen diese Untersuchungen zum Teil noch aus. Die Einlagerungsvorrichtung, die Bohrlochschleuse und der Transferbehälter wurden gemäß Anforderungen aus KTA 3902 /KTA 99/ ausgelegt und gefertigt. Dies wurde durch unabhängige Sachverständige überprüft und bestätigt. Eine Ausnahme bildet hierbei das einsträngige Hubseil, das – um vollständige Kompatibilität zur KTA 3902 herzustellen – zweisträngig auszuführen ist.

Die Auslegung und Fertigung der Brennstabkaskille respektive des Triple-Packs erfolgte bisher nicht in hinreichendem Tiefgang.

Weiterhin ist festzuhalten, dass das Herstellen von 300 m tiefen vertikalen Bohrlöchern in Serie mit den geforderten Genauigkeiten in der tolerierbaren Abweichung von der Vertikalen noch zu zeigen ist.

In einer Demonstrationsanlage konnte nachgewiesen werden, dass mit der Einlagerungsvorrichtung eine sichere Einlagerung von Brennstabkaskillen und Triple-Packs in ein künstliches Bohrloch von 10 m Tiefe möglich ist. Für tiefere Einlagerungsbohrlöcher, so wie es in der Variante C geplant ist, steht der Nachweis noch aus, dass die Maschine auch unter untertägigen Betriebsbedingungen sicher und zuverlässig betrieben werden kann.

#### **4.4 Human Intrusion**

In den Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle /BMU 10/ sind in Kapitel 5.1 Optimierungsziele genannt. Diese beziehen sich u. a. auf Strahlenschutz in der Betriebsphase, Betriebssicherheit des Endlagers und Zuverlässigkeit und Qualität des langfristigen Einschusses der Abfälle. Die Optimierung des Endlagers hinsichtlich Human Intrusion gemäß Kapitel 5.2 /BMU 10/ ist nachrangig zu den oben angeführten Optimierungszielen durchzuführen. Es wird dort in diesem Zusammenhang darauf hingewiesen, dass zukünftige menschliche Aktivitäten nicht prognostiziert werden können und deswegen Referenzszenarien für ein unbeabsichtigtes menschliches Eindringen in das Endlager zu analysieren seien. Diese Aufgabe wird in der VSG im AP 11 „Human Intrusion“ /BEU 12/ bearbeitet.

Im Rahmen der Konzeptfindungsphase für die Varianten B1 (Streckenlagerung) und C (Bohrlochlagerung) wurde in Kooperation mit den Bearbeitern des AP 11 untersucht, ob es Anforderungen im Hinblick auf die Reduktion der Wahrscheinlichkeit unbeabsichtigten menschlichen Eindringens (Human Intrusion) bzw. der Minimierung entsprechender radiologischer Konsequenzen gibt, die a priori Auswirkungen auf die Wahl des Einlagerungskonzeptes haben können. Dazu wurden systematisch Optimierungsmöglichkeiten zur Verhinderung möglichen unbeabsichtigten menschlichen Eindringens ins Endlager (Abteufen von Bohrungen, Herstellen von Kavernen, Auffahren eines Bergwerkes) überprüft. Als Ergebnis wurde festgestellt, dass es nur zwei Maßnahmen gibt, die sich sinnvoll umsetzen ließen. Dazu gehört das Einfärben der Versatzmaterialien (Salzgrus und Schotter) und – bei entsprechender Anpassung des Abstandes zwi-

schen Erkundungs- und Einlagerungssohle – das Einbringen von setzungsarmem Versatz (z. B. Sand, Kies, Schotter) in die Erkundungssohle /BEU 12/.



## 5 Nachweis der Unterkritikalität

### 5.1 Einleitung

Bei der direkten Endlagerung von ausgedienten Brennelementen aus Druck- und Siedewasserreaktoren (DWR, SWR) sowie Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken und Forschungsreaktoren ist zu berücksichtigen, dass sich auch im abgebrannten Zustand nicht vernachlässigbare Mengen an spaltbaren Nukliden im Brennstoff befinden. Dies sind im Wesentlichen  $^{235}\text{U}$  und  $^{239}\text{Pu}$ . Deshalb ist nach den Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle /BMU 10/ nachzuweisen, dass die Sicherstellung der Unterkritikalität sowohl in der Betriebs- als auch in der Nachverschlussphase des Endlagers während des gesamten Betrachtungszeitraums gewährleistet ist:

Abschnitt 7.2.4 Ausschluss von Kritikalität: „Es ist zu zeigen, dass sich selbst erhaltende Kettenreaktionen sowohl bei wahrscheinlichen wie auch bei weniger wahrscheinlichen Entwicklungen ausgeschlossen sind.“

Als Zeitraum sind dabei 1 Mio. Jahre ab dem Zeitpunkt der Stilllegung des Endlagers zu betrachten. Dazu sind neben einer Veränderung des Nuklidinventars durch radioaktiven Zerfall auch mögliche Veränderungen der Endlagergebäude durch geologische und geochemische Prozesse zu berücksichtigen, sofern sie als wahrscheinlich einzustufen sind und Einfluss auf die Unterkritikalität der eingelagerten Brennelemente haben können. Das Ziel der Untersuchungen ist es, zu prüfen, ob und unter welchen Randbedingungen und Anforderungen die Unterkritikalität des Kernbrennstoffs in der Nachverschlussphase des Endlagers nachsorgefrei gegeben ist.

Dabei ist zu beachten, dass für das Eintreten einer Kritikalität unter Endlagerbedingungen der Zutritt von Lösungen zu den eingelagerten Kernbrennstoffen und die damit verbundene Moderatorwirkung einerseits sowie die korrosionsbedingte Änderung geometrischer Anordnungen andererseits eine notwendige Voraussetzung ist. Da dies als unwahrscheinliches Ereignis angesehen wird, basieren die durchgeführten Analysen zur Kritikalitätssicherheit auf einem postulierten Wasserzutritt in einem Behälter. Hypothetische Ereignisabläufe, die auf dieser Basis zu kritischen Konfigurationen führen könnten, werden nicht als denkbare Szenarien, sondern als postulierte Betrachtungsfälle analysiert. Wahrscheinlichkeiten zum Eintritt dieser Betrachtungsfälle im Langzeit-

verhalten wurden im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht diskutiert. Deshalb sind die hier beschriebenen Analysen grundsätzlich deterministisch, obwohl probabilistische Ansätze in der Kritikalitätssicherheitsanalyse für die Nachverschlussphase des Endlagers nach DIN 25472 grundsätzlich zulässig sind /DIN 11/.

Dieses Kapitel fasst die Ergebnisse der im Rahmen der VSG durchgeführten Untersuchungen zum Kritikalitätsausschluss überblicksartig zusammen. Alle in diesem Vorhaben durchgeführten Arbeiten sind im Detail im Technischen Bericht zum Kritikalitätsausschluss /KIL 12/ beschrieben.

## **5.2 Rechenverfahren und Modellannahmen**

Aufbauend auf früheren Arbeiten zur Unterkritikalität bei der Endlagerung ausgedienter Kernbrennstoffe in tiefen geologischen Formationen /GMA 01a/, /GMA 01b/, /GMA 04/, /GMA 09/ wurden in der vorliegenden Arbeit Aspekte der Kritikalitätssicherheit bei den Endlagerkonzepten „Streckenlagerung“ (Varianten B1 und B2) und „Bohrlochlagerung“ (Variante C) in einem Salzstock untersucht und diskutiert. Dabei lag der Schwerpunkt der Betrachtung auf den zugrunde liegenden Behälterkonzepten. Eine Akkumulation der Nuklidinventare aus mehreren Behältern wird dabei – wegen der Verkettung mehrerer Ereignisse und geochemischer Prozesse – als nicht zu erwartender Betrachtungsfall angenommen und im Folgenden nicht unterstellt. Ebenfalls nicht analysiert wurden Betrachtungsfälle, die ein unbeabsichtigtes menschliches Eindringen in den Einlagerungsbereich mit entsprechenden Konsequenzen wie Integritätsverlust mehrerer Behälter und Lösungszutritt unterstellen.

### **Rechenmethoden**

Für die Kritikalitätsrechnungen kamen die Monte-Carlo-Codes KENO Va und KENO VI aus dem amerikanischen Codepaket SCALE 6 /SCA 09/ zum Einsatz. Verwendet wurden hierbei die mitgelieferten ENDF/B-VII.0 /CHA 06/ Wirkungsquerschnitte in 238 Energiegruppen. Zusätzlich wurde der Monte-Carlo-Code MCNP 5 Version 1.51 /BRO 09/ eingesetzt. Hier wurden kontinuierliche ENDF/B-VII.0 Wirkungsquerschnitte verwendet. Daneben wurden zu Vergleichszwecken für das Nuklid <sup>35</sup>Cl auch weitere Daten aus anderen Wirkungsquerschnittsbibliotheken verwendet. Zur Berechnung des Neutronenmultiplikationsfaktors  $k_{\text{eff}}$  wurden pro Rechnung, je nach Modellkomplexität und Rechenverfahren, genügend Neutronenschicksale verfolgt, um eine ausreichende Konvergenz der Rechnungen zu gewährleisten. Die eingesetzten Rechenverfahren

sind international bekannt, anerkannt und qualifiziert /MOS 02/, /MAR 12/ und werden in großem Umfang für Kritikalitätssicherheitsanalysen eingesetzt.

### **Behältermodell**

Als Behältertypen für ausgediente Leichtwasserreaktor-Brennstoffe wurden die Brennstabkockille BSK-3 im Fall der Bohrlochlagerung und der Endlagerbehälter POLLUX<sup>®</sup>-10 im Fall der Streckenlagerung untersucht. Zusätzlich wurden generische Betrachtungen zur direkten Endlagerung von Transport- und Lagerbehältern, wie sie gegenwärtig in Deutschland zur Zwischenlagerung eingesetzt werden, durchgeführt. Die in die Behälter verbrachten Brennelemente wurden in den Berechnungen im Rahmen dieser Arbeit konservativ als unbestrahlt angenommen, eine Berücksichtigung der Reaktivitätsverminderung durch den Abbrand /GMA 04/, /GMA 09/ wird aber in /KIL 12/ diskutiert.

Für die beiden Endlagerbehältertypen BSK-3 und POLLUX<sup>®</sup>-10 konnte auf bereits bestehende Rechenmodelle für KENO Va bzw. MCNP aus früheren Vorhaben zurückgegriffen werden. Details zu den Modellen sowie relevante Ergebnisse dieser Vorhaben sind in den Berichten /GMA 04/ , /GMA 09/ dokumentiert. In Anlehnung an den Transport- und Lagerbehälter vom Typ CASTOR<sup>®</sup> V/19 konnte auf ein vorhandenes, generisches Rechenmodell in MCNP zurückgegriffen werden. Zudem wurde je ein vereinfachtes generisches Rechenmodell in Anlehnung an die Behältertypen CASTOR<sup>®</sup> V/19 und CASTOR<sup>®</sup> V/52 für den Code KENO VI neu erstellt. Die beiden letzten Modelle tragen entsprechend die Bezeichnungen DBB19 (Druckwasserreaktor-Brennelemente-Behälter) und SBB52 (Siedewasserreaktor-Brennelemente-Behälter).

Zusätzlich zu Brennstoffen aus Leichtwasserreaktoren wurde auch die Machbarkeit der direkten Endlagerung von ausgedienten Brennelementen aus Forschungs- und Prototypreaktoren in aktuellen Transport- und Zwischenlagerbehältern hinsichtlich Kritikalitätsausschluss unter Endlagerbedingungen evaluiert. Aufgrund der großen Bandbreite an in Frage kommenden Brennstoffarten konnte dies im Rahmen der vorliegenden Arbeit teilweise nur sondierend durchgeführt werden.

### **Gesättigte Salzlösung als Moderator**

Der Zutritt von Wasser zu einer Spaltstoffanordnung erhöht in der Regel den Anteil thermischer Neutronen und damit die Reaktivität der Anordnung (Moderationseffekt). Im Falle eines Lösungszutritts zu den Endlagergebänden ist im Salzstock gesättigte

Salzlösung entsprechend der lokalen Salzzusammensetzung zu erwarten. Neben der gegenüber reinem Wasser veränderten Dichte und reduziertem Wasseranteil pro Liter ist insbesondere der hohe Anteil des Nuklids  $^{35}\text{Cl}$  in diesen salinaren Wässern von Interesse, welches in der natürlichen Zusammensetzung von Chlor einen Isotopenanteil von 75,76 % aufweist. Mit einem Absorptionsquerschnitt für thermische Neutronen der Energie 0,0253 eV von 43,7 barn /MAG 06/ kann dieses Nuklid eine deutliche Reduzierung des Neutronenmultiplikationsfaktors  $k_{\text{eff}}$  bewirken. Deshalb ist es sinnvoll, das Chlorid des gelösten Salzanteils in den Kritikalitätsrechnungen zu berücksichtigen. Das Nachweiskonzept der Unterkritikalität wird im Rahmen der VSG somit nicht auf die Reaktivitätsminderung durch Berücksichtigung des Abbrands (s. o.), sondern auf die Neutronen absorbierende Wirkung des Nuklids  $^{35}\text{Cl}$  begründet, welches in einem Salzstock in hohen Mengen allgegenwärtig vorliegt.

In der vorliegenden Arbeit werden die Lösungen, die im Salzstock auftreten können und die im Folgenden kurz als „Salzlösung“ bezeichnet werden, repräsentativ auf Basis der gemessenen Lösungsprobe 02YEQO2 RZ039.001 aus dem Erkundungsbergwerk Gorleben /BFS 02/ angenommen, welche im Wesentlichen auf gesättigter Magnesiumchlorid-Lösung basiert. Für einzelne Parameterstudien wurde auch reine Magnesiumchlorid-Lösung unterschiedlicher Konzentrationen modelliert.

### **5.3 Ausgediente Kernbrennstoffe aus Leichtwasserreaktoren**

Ausgediente Brennelemente aus Leichtwasserreaktoren stellen den weit überwiegenden Anteil an endzulagernden Brennstoffen dar. Zum Nachweis der Unterkritikalität wurden hierfür repräsentative Brennelemente basierend auf Urandioxid und U-Pu-Mischoxid (MOX) modelliert, mit Anreicherungen und Plutoniumgehalt, wie sie in Deutschland typischerweise zum Einsatz kamen und noch kommen. Es wurde kein Abbrand angenommen, d. h., die Reaktivität von unbestrahltem Brennstoff wurde konservativ unterstellt. Untersucht wurden die Endlagerbehälter BSK-3 und POLLUX<sup>®</sup>-10, sowie generische Modelle von Transport- und Zwischenlagerbehältern, die eng an die gegenwärtig genehmigten Behältertypen angelehnt sind und exemplarisch für diese untersucht wurden.

Für geflutete Behälter mit intakten Innenstrukturen ist die Unterkritikalität durch die Auslegung der Behälter sichergestellt. Dies gilt insbesondere auch für die im Zusammenhang mit Störfallbetrachtungen postulierte Flutung mit reinem Wasser. In einem

Endlager in Salzgestein ist zudem mit dem Auftreten von gesättigter Salzlösung entsprechend der lokalen Salzzusammensetzung anstelle von reinem Wasser zu rechnen. Dies reduziert den Neutronenmultiplikationsfaktor gegenüber Moderation mit reinem Wasser je nach betrachtetem Behälter und Brennstoff deutlich. Die Ursache dafür ist die gute Absorptionsfähigkeit für Neutronen durch das Nuklid  $^{35}\text{Cl}$ , welches in dem Salzgestein und in gesättigter Lösung in hoher Konzentration vorliegt. Zusätzlich zu den intakten Behälterstrukturen wurde eine Reihe von Betrachtungsfällen zur Degradation der Behälter und der darin eingelagerten Brennstoffe analysiert. Dazu gehörten der sukzessive Verlust einer eventuellen Borierung (Neutronenabsorber) in der inneren Behälterstruktur, der Zerfall dieser Strukturen sowie die Bildung sekundärer Uranmineralephasen im Behälterinneren nach Korrosion des Brennstoffs. Dabei konnte eine Reihe von Konfigurationen identifiziert werden, welche bei (nicht zu erwartender) Moderation durch reines Wasser Multiplikationsfaktoren größer als eins, d. h. Kritikalität, erreichen können.

Bei Berücksichtigung der absorbierenden Wirkung des Chlors bleibt der errechnete Multiplikationsfaktor, selbst für unbestrahlten Brennstoff, für alle betrachteten Behälter, LWR-Brennstoffe und Degradationsfälle, stets unter eins.

Ein Anspruch auf Vollständigkeit der untersuchten Betrachtungsfälle wird an dieser Stelle nicht erhoben. Allerdings sind gegenwärtig keine Konfigurationen erkennbar, die auf Basis des Inventars eines einzelnen Behälters zu deutlich höheren Multiplikationsfaktoren oder gar  $k_{\text{eff}} \geq 1,0$  führen könnten.

Außerdem werden keine Aussagen zur Eintrittswahrscheinlichkeit derartiger Konfigurationen getroffen. Möglicherweise werden hierzu weitere Untersuchungen erforderlich.

Insgesamt basiert das hier verfolgte Nachweiskonzept zur Sicherstellung der Unterkritikalität wesentlich auf der Neutronen absorbierenden Wirkung des Nuklids  $^{35}\text{Cl}$ . Deshalb ist eine Validierung der eingesetzten Rechenverfahren hinsichtlich der integralen Wirksamkeit dieses Nuklids erforderlich /DIN 94/. Typischerweise erfolgt dies durch Nachrechnung kritischer Benchmark-Experimente, um eventuelle systematische Abweichungen des eingesetzten Rechenverfahrens zu quantifizieren. Allerdings liegen derartige Experimente, die signifikante Mengen an Chlor enthalten, bislang nicht in der nötigen Anzahl und Qualität vor. Vergleichsrechnungen mit Daten aus mehreren unterschiedlichen Wirkungsquerschnittsbibliotheken für das Nuklid  $^{35}\text{Cl}$  liefern aber konsistente Ergebnisse für den Neutronenmultiplikationsfaktor. Somit ist bislang kein Hinweis

auf mögliche Defizite in diesen Bibliotheken hinsichtlich der Neutronenabsorption durch  $^{35}\text{Cl}$  erkennbar.

Um ggf. den Nachweis der Unterkritikalität ohne Berücksichtigung des Brennelemente-Abbrands und ohne Berücksichtigung der Absorptionswirkung des Nuklids  $^{35}\text{Cl}$  zu überprüfen, wurden für einige Behältertypen verschiedene Verfüllvarianten in Kritikalitätsrechnungen überprüft. Dabei wurden vorhandene Hohlräume im Behälterinneren, die bei einer unterstellten Flutung als Moderator zur Verfügung stehen, als mit Versatzstoffen verfüllt angenommen. Diese können zur reinen Volumenbelegung und damit zur Moderatorverdrängung dienen oder auch selbst Neutronen absorbierende Komponenten enthalten. Erste Untersuchungen indizieren eine grundsätzliche Machbarkeit des Kritikalitätsausschlusses auf diesem Wege. Die entsprechenden Arbeiten sind bislang aber als exemplarisch und noch nicht abdeckend zu betrachten. Auch sind etwaige Verfüllsubstanzen in die Langzeitentwicklung der Gebinde mit einzubeziehen. Insbesondere ist zu gewährleisten, dass eventuelle Neutronenabsorber, welche die Unterkritikalität sicherstellen sollen, während des gesamten Betrachtungszeitraums an Ort und Stelle verbleiben und ihre Wirksamkeit nicht einbüßen.

Grundsätzlich ist der Nachweis der Unterkritikalität in der Nachverschlussphase des Endlagers für ausgediente Brennelemente aus Leichtwasserreaktoren durchführbar. Sowohl die Validierung der Wirksamkeit des  $^{35}\text{Cl}$  als Neutronenabsorber als auch alternativ die Wahl geeigneter Verfüllmaterialien stellen nach derzeitigem Kenntnisstand gangbare Wege dar.

Weiterführende Details zu den durchgeführten Analysen sind in /KIL 12/ dargestellt und diskutiert.

#### **5.4 Ausgediente Kernbrennstoffe aus Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken und Forschungsreaktoren**

Brennstoffe aus Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken und Forschungsreaktoren weisen typischerweise einige Unterschiede zu denjenigen aus Leichtwasserreaktoren zur Energiegewinnung auf. Zum einen liegen sie oft nicht in oxidischer, sondern anderer chemischer Form vor, z. B. als Uran-Aluminium-Legierung oder als Silizid. Dies kann bei der Untersuchung etwaiger Betrachtungsfälle zur Degradation von Bedeutung sein. Zum anderen weisen sie zumeist eine deutlich höhere Anfangsanreicherung bis

zu 93 Gew.-%  $^{235}\text{U}$  bzw. einen deutlich höheren Plutoniumanteil auf. Dies führt zu einer gegenüber LWR-Brennstoffen wesentlich erhöhten Reaktivität und damit einhergehend einer deutlich geringeren kleinsten kritischen Masse.

In der vorliegenden Arbeit wurden Brennstoffe aus den Forschungsreaktoren RFR (Rossendorf) und FRM-II (Garching) betrachtet. Diese sind aufgrund ihrer hohen Anreicherung auch abdeckend für die Brennstoffe des BER-II (Berlin) und FRMZ (Mainz) sowie die Brennelemente aus dem Antrieb des früheren Nuklearschiffs „Otto Hahn“. Als Endlagerbehälter wurden jeweils die gegenwärtigen Transport- und Zwischenlagerbehälter CASTOR<sup>®</sup> MTR2 unterstellt. Dabei konnte für die hier betrachteten Brennstoffe außer dem FRM-II unter Berücksichtigung der Neutronenabsorption durch  $^{35}\text{Cl}$  Unterkritikalität für einzelne Behälter nachgewiesen werden. Dazu genügte die Abschätzung der in salinärer Umgebung erforderlichen kleinsten kritischen Masse des jeweiligen Brennstoffs im Vergleich zu der in einem einzelnen Behälter enthaltenen Brennstoffmenge. Im Falle des Brennstoffs aus dem FRM-II übersteigt eine Behälterbeladung die kleinste kritische Masse für diesen Brennstoff um ein Mehrfaches. Hier ist zur Sicherstellung der Unterkritikalität eine entsprechende Konditionierung des Brennstoffs erforderlich. Hierfür sind z. B. eine geeignete Verfüllung des Behälters oder die Reduzierung der in einen Behälter verbrachten Brennstoffmasse durch Verringerung der Anzahl der Brennelemente vorstellbar. Die Masse eines einzelnen FRM-II Brennelements unterschreitet die für eine kritische Anordnung notwendige Mindestmasse in salinärer Umgebung.

Weiterhin wurden Brennstoffe aus den Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken AVR/THTR und KNK-II betrachtet. Im Fall der AVR/THTR-Brennstoffe ist die Unterkritikalität eines einzelnen Behälters aufgrund der enthaltenen Brennstoffmasse selbst ohne Berücksichtigung der Absorptionwirkung des  $^{35}\text{Cl}$  gegeben. Für den Brennstoff aus der Anlage KNK-II ist der Kritikalitätsausschluss durch eine einfache Abschätzung nicht möglich, da eine einzelne Behälterbeladung die kleinste kritische Masse dieses Materials in salinärer Umgebung signifikant überschreitet. Hier werden, ähnlich zu dem Brennstoff aus dem Forschungsreaktor FRM-II, geeignete Konditionierungsmaßnahmen erforderlich.

Es gibt jedoch nach derzeitigem Kenntnisstand keine Hinweise, die die Sicherstellung der Unterkritikalität von Brennstoffen aus Forschungs- und Prototypreaktoren in der Nachverschlussphase bei geeigneter Konditionierung (z. B. Verdünnung, Vergiftung, modifiziertes Behälterkonzept) grundsätzlich in Frage stellen.

Weiterführende Details zu den durchgeführten Analysen sind in /KIL 12/ dargestellt und diskutiert.

## **5.5 Bewertung**

Wesentliche Randbedingungen und Parameter, die beim Nachweis der Unterkritikalität in der Nachverschlussphase des Endlagers eine Rolle spielen, sind zum einen der Zustand des endzulagernden Kernbrennstoffes selbst, wie z.B. dessen Zusammensetzung, Anfangsanreicherung, Abbrand, Art der Konditionierung, sowie die Auslegung der Endlagerbehälter. Zum anderen sind die möglichen Einwirkungen auf die Endlagerbehälter, die bis hin zum Integritätsverlust mit Degradation der Behältereinbauten und der Brennelementstruktur sowie im Weiteren das Lösen und der Transport von Radionukliden in das umgebende Wirtsgestein führen können, zu untersuchen. Zur Bewertung und Einschätzung der Wahrscheinlichkeit für das Auftreten einer ungewollten Kritikalität von ausgedienten Kernbrennstoffen in der Nachverschlussphase eines Endlagers ist daher das Zusammenwirken verschiedener Fachgebiete erforderlich. Aus Sicht der Kritikalitätssicherheit können Nachweise zur Einhaltung der Unterkritikalität für intakte Behälter sowie für eine Reihe von Betrachtungsfällen beschädigter oder korrodierter Behälter erbracht werden. Darüber hinaus können hypothetische Konfigurationen und Verteilungen des eingelagerten Kernbrennstoffes ermittelt werden, unter denen eine Kritikalität möglich wäre. Aus Sicht der Geochemie und Geologie sollte dann bewertet werden, ob derartige Konfigurationen und Verteilungen, ausgehend von den intakten Behältern, im Laufe der Nachverschlussphase eines tiefen geologischen Endlagers als wahrscheinlich, weniger wahrscheinlich oder als ausgeschlossen einzustufen sind.

Es ist festzustellen, dass der Zutritt von Wasser bzw. Salzlösung zu den Kernbrennstoffen eine generelle Voraussetzung für alle hier analysierten Betrachtungsfälle in der Nachverschlussphase darstellt, die zu einem Anstieg des Neutronenmultiplikationsfaktors  $k_{\text{eff}}$  führen. Bei der Endlagerung von niedrig angereicherten Kernbrennstoffen ist eine Kritikalität ausgeschlossen, wenn kein Wasser oder Lösungszutritt erfolgt. Der Zutritt von Wasser bzw. Salzlösung zu den Kernbrennstoffen wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit postuliert. Zeitpunkt und Eintrittswahrscheinlichkeit dieses Geschehens waren hierbei nicht Gegenstand der Untersuchung.

Nach gegenwärtigem Ermessen erscheint die Bildung einer sich selbst erhaltenden Kettenreaktion in einem Endlager in einem chloridbasiertem Salzgestein auf Basis des Nuklidinventars eines einzelnen Endlagerbehälters der Typen BSK 3, POLLUX<sup>®</sup>-10 sowie bei der direkten Endlagerung von Zwischenlagerbehältern CASTOR<sup>®</sup> mit ausgedienten LWR-Brennstoffen auch bei Lösungszutritt als ausgeschlossen. Eine wesentliche Randbedingung für die Nachweisführung ist dabei die Berücksichtigung der Neutronen absorbierenden Wirkung des Nuklids <sup>35</sup>Cl. Während die Behälter auf Basis ihrer Auslegung im intakten Zustand Unterkritikalität sicherstellen, sind nach dem Verlust ihrer Integrität Evolutionsszenarien vorstellbar, in denen ohne Berücksichtigung des <sup>35</sup>Cl und ohne Berücksichtigung des Abbrands rein rechnerisch Multiplikationsfaktoren  $k_{\text{eff}} > 1,0$  erreicht werden können. Unter Berücksichtigung des <sup>35</sup>Cl in der Konzentration, die in MgCl<sub>2</sub>-gesättigter Lösung auftritt, bleiben alle diese betrachteten Systeme und Betrachtungsfälle unterkritisch, so dass das Nachweiskonzept der Kritikalitätssicherheit für LWR-Brennstoffe darauf abgestützt werden kann. Für einige höher angereicherte Brennstoffe aus Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken und Forschungsreaktoren können – je nach Brennstoffart und Behälterkonzept – dennoch zusätzlich Konditionierungsmaßnahmen erforderlich werden. Dies gilt insbesondere für die höher angereicherten Brennstoffe der Reaktoren FRM-II und KNK-II. Eine genaue Einschätzung erfordert jedoch tiefer gehende Untersuchungen, die über den Rahmen der gegenwärtigen vorläufigen Sicherheitsanalyse hinausgehen.

Zusätzlich wurden verschiedene Formen möglicher Behälterverfüllungen exemplarisch untersucht. Je nach Behältertyp und Brennstoffart, v. a. CASTOR<sup>®</sup> V/19 und CASTOR<sup>®</sup> MTR2, kann durch eine geeignete Verfüllung von Behälterhohlräumen der Nachweis der Unterkritikalität nach derzeitigem Stand ggf. auch ohne Berücksichtigung des Chlorids auf Basis von frischem Brennstoff geführt werden. Um dies abschließend zu bewerten, müssen aber genau definierte Randbedingungen vorliegen, welche augenblicklich nicht gegeben sind. Es ist dabei auch zu beachten, dass etwaige Verfüllungen in denkbaren Degradationsbetrachtungsfällen geeignet berücksichtigt werden müssen. Für andere Behältertypen, insbesondere die Endlagerbehälter BSK-3 und POLLUX<sup>®</sup>-10, in denen keine kompletten Brennelemente, sondern kompakt Brennstäbe eingebracht werden, ist der vorhandene Behälterhohlraum deutlich geringer, so dass hier die Zweckmäßigkeit einer möglichen Verfüllung noch überprüft werden müsste.

Folgende Punkte sind anzumerken:

1. Die Wahrscheinlichkeit des Eindringens von Lösung in den Endlagerbereich bzw. in den Behälter wird in der vorliegenden Untersuchung nicht bewertet. Da eine Änderung der Moderationsverhältnisse sowie der geometrischen Konfiguration der Kernbrennstoffe eine wesentliche Voraussetzung für den Eintritt von Kritikalität darstellt, wird dieser Zutritt postuliert. Die Analyse wird im Rahmen der VSG rein deterministisch durchgeführt. Ggf. können ergänzend entsprechende probabilistische Untersuchungen durchgeführt werden.
2. Die hier für die Transport- und Lagerbehälter erstellten generischen Rechenmodelle entsprechen nicht exakt dem aktuellen Design der in der Praxis eingesetzten CASTOR<sup>®</sup>-Behälter. Die Unterschiede, die sich daraus für die berechneten expliziten Werte von  $k_{\text{eff}}$  ergeben, werden jedoch die hier gewonnenen Erkenntnisse qualitativ nicht verändern.
3. Im Zusammenhang mit der Absorberwirkung des Nuklids <sup>35</sup>Cl ist zu prüfen, ob der in den Kritikalitätsrechnungen erzielte Effekt durch zusätzliche Validierung der nuklearen Daten, z. B. durch kritische Experimente, weiter untermauert werden kann. Dies ist insbesondere von Interesse, wenn das Nachweiskonzept nicht auf dem erreichten Abbrand, geeigneten Verfüllmaterialien o. a., sondern einzig auf der Absorberwirkung von <sup>35</sup>Cl basiert.
4. Hinsichtlich einer Abbrandberücksichtigung ist zu klären, inwieweit in der Praxis die Einhaltung eines Mindestabbrands nachgewiesen werden könnte. Dies ist Voraussetzung für die Berücksichtigung der reaktivitätsmindernden Wirkung des Brennelementabbrandes in den entsprechenden Kritikalitätsanalysen.
5. Die Möglichkeit weiterer Betrachtungsfälle im Steinsalz, insbesondere im Hinblick auf Migration und Ablagerung von Radionukliden, ist unter Einbeziehung des einschlägigen Kenntnisstandes zu prüfen. Die eingehendere Untersuchung der Bildung von Mineralphasen im Behälterinneren für die verschiedenen Behältertypen unter Berücksichtigung der jeweiligen Massenbelegung mit Spaltstoffen ist zu empfehlen. Auch homogene und heterogene Durchmischungen von Behälter- und Brennstoffkorrosionsprodukten sind denkbar. Der mögliche Einfluss von verschiedenen denkbaren Behälterverfüllungen ist hierbei bislang ebenfalls nicht abdeckend geklärt.

6. Durch die bisherigen Untersuchungen nicht abschließend behandelt sind Brennstoffe mit höherem Spaltstoffgehalt, insbesondere Brennelemente aus Forschungsreaktoren. Dazu sind noch weitere Betrachtungsfälle und Kritikalitätsanalysen für diese Brennstoffe durchzuführen.

Zusammenfassend sind aus Sicht der Kritikalitätssicherheit jedoch keine Aspekte erkennbar, die bei einer Endlagerung in einem Chlorid-basierten Salzgestein und geeigneter Konditionierung der Brennelemente dem Ausschluss einer Kritikalität in der Nachverschlussphase grundsätzlich entgegenstehen. Die Berücksichtigung der Neutronen absorbierenden Wirkung des Nuklides  $^{35}\text{Cl}$  als Spezifikum dieses Wirtsgesteins kann dabei einen wesentlichen zusätzlichen Effekt hinsichtlich des Ausschlusses einer Kritikalität in der Nachverschlussphase bedeuten.

Insgesamt haben die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit zum Kritikalitätsausschluss in der Nachverschlussphase des Endlagers grundsätzlich den Charakter einer Darstellung der Machbarkeit und können nicht als abschließender Nachweis für einen Kritikalitätsausschluss gewertet werden, der in einem Genehmigungsverfahren erforderlich ist.



## **6 Zusammenstellung identifizierter notwendiger FuE-Arbeiten**

Im vorliegenden Bericht wurden technische Planungen und Auslegungen für ein Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle und optional auch für Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung durchgeführt und weitere Optimierungen beschrieben. In diesem Zusammenhang kamen Fragestellungen auf, für die weitergehende Untersuchungen, die über den Zeit- und Kostenrahmen der Vorläufigen Sicherheitsanalyse Gorleben hinausgehen, als notwendig erachtet werden. Im Folgenden sind diese Themenbereiche zusammenfassend beschrieben.

### **Endlagerbehälter**

Für die zu berücksichtigende Art und Menge von wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen wurden in der Konzeption Endlagerbehälter ausgewählt, die geeignet erscheinen, die an sie gestellten Anforderungen zu erfüllen. Für keinen dieser Behälter gibt es bisher genehmigungsreife Planungen oder bereits erteilte Zulassungen. Insofern wird es als notwendig angesehen, für die betrachtete

- Variante B1: POLLUX<sup>®</sup>-10, POLLUX<sup>®</sup>-9
- Variante C: Brennstabkokillen (BSK-R)  
Triple-Packs  
(modifizierte Brennstabkokillen)
- Variante B2: Transport- und Lagerbehälter (z. B. CASTOR<sup>®</sup>-Behälter)

die Behälterplanungen dahingehend weiterzuführen, dass die Genehmigungsreife erreicht wird.

In den BMU-Sicherheitsanforderungen /BMU 10/ wird gefordert, dass 500 Jahre nach Schließung des Endlagers eine Handhabung der Behälter und damit eine Bergung (als Notfallmaßnahme) möglich sein muss. Insofern sind zukünftige Untersuchungen an Endlagerbehältern bzw. deren Weiterentwicklung auch dahingehend zu führen, dass die Handhabbarkeit für einen solchen Zeitraum gewährleistet bleibt. Die Eigenschaften der Gebinde gehen in die handhabungstechnischen (Bohrlochlagerung mit Rückholung) und die sicherheitstechnischen Untersuchungen zur Betriebs- und Nachbetriebsphase ein.

## **Transport- und Einlagerungstechnik**

Die Genehmigungsfähigkeit von Transport- und Einlagerungstechniken für Endlagerbehälter für wärmeentwickelnde Abfälle (POLLUX<sup>®</sup>-Behälter für Variante B1) und Brennstabkockillen (für Variante C) wurde im Rahmen von Demonstrationsversuchen in übertägigen Anlagen grundsätzlich gezeigt. Die Zulässigkeit der Übertragung aller dabei erzielten Ergebnisse auf Verhältnisse in einem Endlagerbergwerk im Salzgestein steht noch aus und wäre durch ein gezieltes in-situ Untersuchungsprogramm zu überprüfen. Für den Transport und die direkte Einlagerung von Transport- und Lagerbehältern (Variante B2: Differenzbetrachtung zur POLLUX<sup>®</sup>-Einlagerung) werden derzeit konzeptionelle Planungen angestellt. Die Genehmigungsreife eines solchen Einlagerungskonzeptes muss im Rahmen vertiefter Planungen unter Berücksichtigung von Demonstrationsprojekten nachgewiesen werden.

## **Verfüll- und Verschlussmaßnahmen**

Die Verfüllung der Grubenbaue im Endlagerbergwerk ist grundsätzlich mit arteigenem Salzgrus vorgesehen. In den Einlagerungsstrecken und -feldern soll dieser trocken, in den sonstigen Strecken und Grubenbauen angefeuchtet (ca. 0,6 Gew.-%) eingebracht werden. Während für den trockenen Einbau bereits in-situ Versuche durchgeführt wurden, gibt es solche für feuchten Versatz noch nicht. Bei solchen Untersuchungen sind zum einen Befeuchtungs- und Einbringverfahren zu entwickeln und zu erproben (ggf. zu optimieren) und zum anderen die thermo- und hydromechanischen Prozesse zu untersuchen und zu beschreiben. Insbesondere die Entwicklung der Porosität und Permeabilität des Salzgrusversatzkörpers über die Zeit ist für das Prozessverständnis von Bedeutung.

Für die Grubenbaue im Infrastrukturbereich ist eine Verfüllung mit Basalt- respektive Serpentin-Schotter vorgesehen. Auch hierfür sind optimierte Einbringverfahren zu entwickeln und zu erproben.

Als Verschlüsse sind Streckenverschlussbauwerke in den Hauptzugangsstrecken zum Endlagerbergwerk und Schachtverschlussbauwerke in den beiden Tagesschächten vorgesehen. Für beide Arten von Verschlussbauwerken kann auf Planungen und zum Teil auf erprobte Komponenten solcher Bauwerke im Rahmen der Stilllegung des ERA Morsleben und der Asse zurückgegriffen werden. Offene Fragen ergeben sich im Bereich des qualitätsgesicherten Einbaus der verschiedenen Baustoffe insbesondere bei

den Schachtverschlüssen. Hinzu kommen auch verfahrenstechnische Herausforderungen für den Einbau im Rückbauverfahren. Wie schon bei den vorgenannten Themen erwähnt, handelt es sich auch hier um Aufgabenstellungen, die über die VSG hinausgehen.

Diese drei genannten Aufgaben sind zum einen bereits Gegenstand von FuE-Arbeiten (z. B. REPOPERM /KRÖ 09/), zum anderen sind es neue Themen für FuE-Vorhaben.

### **Bergbauliche Fragestellungen**

Bei der Konzeption der Grubenbaue wurde deutlich, dass insbesondere für die Variante C (Bohrlochlagerung) das Teufen von vertikalen bis zu 300 m tiefen Bohrungen und ggf. der Einbau von Verrohrungen zur Gewährleistung einer Rückholung endgelagerter Endlagerbehälter unter Bergwerksbedingungen zu erproben sind.

### **Rückholung von Endlagergebinden**

FuE-Bedarf besteht sowohl für die Rückholungsoption bei der Streckenlagerung als auch bei der Bohrlochlagerung. Beide Konzepte sind vertieft zu planen und die Realisierbarkeit nachzuweisen. Für die Konzepte besteht Untersuchungsbedarf u. a. für die Punkte Anforderungen an die Behälter und Beherrschung der klimatischen Bedingungen bei einer Rückholung. Zu Variante C seien exemplarisch die Punkte Anforderungen an und Auswahl eines geeigneten Versatzmaterials innerhalb der Verrohrungen sowie die Herstellbarkeit der Verrohrungen unter Tage und die Anbindung der Verrohrung an das umgebende Gebirge genannt.

### **Nachweis der Durchführbarkeit der Endlagerung von Transport- und Lagerbehältern (TLB)**

Zurzeit existiert noch keine Schachtförderanlage, die in der Lage ist, bis zu 160 Mg schwere TLB nach unter Tage zu fördern. Ebenso ist der Transport sowie die Einlagerung unter Bergbaubedingungen erst übertägig und in der Folge untertägig zu demonstrieren. Die Ergebnisse erbringen den Nachweis zur grundsätzlichen Machbarkeit und die erforderlichen Eingangsdaten für weiterführende Sicherheitsanalysen.

## **Erkundungsergebnisse in horizontaler und vertikaler Richtung**

Für eine tiefere Planung werden geologische Daten vom gesamten Einlagerungsbereich in horizontaler und vertikaler Richtung benötigt. Damit ließen sich die Rechenergebnisse auf Basis getroffener Annahmen prüfen.

## **Thermische Leistung von ausgedienten Brennelementen**

Die Entwicklung von Abbrand und Brennstoffgehalt in den Brennelementen sollte aktualisiert werden. Als Beispiel kann ein DWR-Brennelement mit 70 GWd/tSM Abbrand und 4,7 % UO<sub>2</sub>-Anreicherung gegenüber einem DWR-Brennelement mit 50 GWd/tSM Abbrand und 4 % UO<sub>2</sub>-Anreicherung eine um den Faktor 1,5 bis 2 höhere thermische Leistung aufweisen.

## **Endlagerkonzepte**

Die bisher entwickelten Endlagerkonzepte und auch die darauf ausbauende Endlagerauslegung berücksichtigen bekannte Grundlagen und Basisdaten sowie bestimmte Anforderungen. Es sollte untersucht werden, ob eine anforderungsorientierte Vorgehensweise zu anderen technischen Lösungsvorschlägen und -ansätzen für Endlager führt

## **Nachweis der Unterkritikalität**

Zum Nachweis der Unterkritikalität ist folgender Forschungsbedarf identifiziert worden:

- Untersuchungen zu den Eintrittswahrscheinlichkeiten der angenommenen Konfigurationen für Kritikalitätsberechnungen
- Validierung der eingesetzten Rechenverfahren hinsichtlich der integralen Wirksamkeit des Nuklid, <sup>35</sup>Cl
- Vertiefung der Untersuchungen für höher angereicherte Brennstoffe aus Versuchs- und Prototypkraftwerken hinsichtlich zusätzlich erforderlicher Konditionierungsmaßnahmen
- Überprüfung, ob die Hohlräume in den Endlagerbehältern BSK 3 und POLLUX<sup>®</sup>-10 verfüllt werden müssen.
- Ergänzung des deterministischen Ansatzes durch probabilistische Untersuchungen
- Untersuchungen zur Zulässigkeit der Berücksichtigung eines Mindestabbrandes

- Untersuchungen zur Geochemie bei der Bildung von Mineralphasen in den Behältern und Ermittlung des Einflusses unterschiedlicher Behälterverfüllmaterialien



## 7 Zusammenfassung

Bei den Planungen für den Bau, den Betrieb und den Verschluss eines Endlagers für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle und ausgediente Brennelemente dient das zu Beginn des Vorhabens VSG erarbeitete Sicherheits- und Nachweiskonzept /MÖN 12/ als Leitlinie. Mit den entwickelten Endlagerkonzepten und den dazu geplanten technischen Komponenten, Systemen und Prozessen soll das in /MÖN 12/ skizzierte Sicherheitskonzept für die Betriebsphase und die Nachverschlussphase umgesetzt werden. Dies beinhaltet zum einen den sicheren Einschluss der radioaktiven Stoffe durch Auswahl von dafür geeigneten Endlagerbehältern sowie entsprechender Transport- und Handhabungssysteme für den Endlagerbetrieb. Zum anderen bildet ein auf den langfristig sicheren Einschluss der Endlagerbehälter durch das Wirtsgestein ausgelegtes Endlagerbergwerk und ein dafür konzipiertes Verfüll- und Verschlusskonzept die zweite Gruppe von Maßnahmen zur Umsetzung des Sicherheitskonzeptes.

Für die Endlagerkonzeption wurden in der VSG zu Vergleichszwecken zwei grundsätzlich unterschiedliche, durch vorlaufende Forschungs- und Entwicklungsarbeiten bereits generisch untersuchte Varianten (Streckenlagerung und Bohrlochlagerung) betrachtet. Für die Variante der Streckenlagerung wurde darüber hinaus im Sinne einer Differenzbetrachtung untersucht, ob und wie dieselbe Art und Menge von wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen und ausgedienten Brennelementen mittels Transport- und Lagerbehältern endgelagert werden kann.

Optional wurde darüber hinaus eine abgeschätzte Menge von Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung berücksichtigt. Die Varianten wurden vereinfacht mit Buchstaben gekennzeichnet und wie folgt definiert:

**Streckenlagerung:** Einlagerung aller wärmeentwickelnden radioaktiven Abfälle in Endlagerbehältern mit Abschirmung in horizontalen Strecken (**Variante B1**)

Zusätzlich wurde im Sinne einer Differenzbetrachtung die Einlagerung aller wärmeentwickelnden Abfälle in den zur Zwischenlagerung genutzten Transport- und Lagerbehältern in horizontalen Bohrlöchern untersucht (**Variante B2**).

**Bohrlochlagerung:** Einlagerung aller wärmeentwickelnden radioaktiven Abfälle in tiefen, vertikalen Bohrlöchern (Brennstabkokillen, Triple-Packs) (**Variante C**)

**Kammerlagerung:** Einlagerung von Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung in horizontalen Einlagerungskammern (**Variante A**)

Im ersten Planungsschritt wurden die für Planung und Auslegung eines Endlagers für wärmeentwickelnde, radioaktive Abfälle relevanten Grundlagen und Randbedingungen zusammengestellt. Dabei sind zwei Parameter von grundlegender Bedeutung. Zum einen müssen hinreichende Kenntnisse über Art und Menge der einzulagernden radioaktiven Abfälle und ausgedienten Brennelemente vorliegen. Zum anderen werden Kenntnisse über die geologischen Bedingungen am Standort für das geplante Endlager benötigt. Für die Art und Menge der radioaktiven Abfälle wurde das aktualisierte Abfallmengengerüst nach dem Ausstiegsbeschluss vom Sommer 2011 /PEI 11b/ zugrunde gelegt und dazu für die vorgenannten Varianten die Anzahl an Endlagerbehältern ermittelt. Weiterhin werden die für die Endlagerauslegung wesentlichen geologischen Randbedingungen, so wie sie in dem entsprechenden BGR-Bericht /MRU 11/ dokumentiert sind, berücksichtigt und thermische sowie geothermische Grundlagen und Parameter zusammengestellt.

Als zusätzliche und neue Grundlage für die Endlagerauslegung waren die BMU-„Sicherheitsanforderungen für die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle“ vom 30.09.2010 /BMU 10/ zu berücksichtigen: In /BOL 11/ war das noch nicht vollumfänglich, insbesondere hinsichtlich der Anforderung zur Rückholbarkeit und Bergung von Abfallgebinden, erfolgt.

Sofern zum Zeitpunkt einer vorläufigen Planung nicht alle notwendigen Kenntnisse vorliegen, müssen sinnfällige Annahmen getroffen werden. In diesem Zusammenhang wurde für die vorliegende Endlagerauslegung wie bereits bei der Endlagerkonzeption /BOL 11/ angenommen, dass alle Salzrechte vorliegen und keine weiteren regulatorischen Einschränkungen bestehen.

Auf der Grundlage der in /BOL 11/ erarbeiteten Endlagerkonzepte, die als initiales Arbeitsmodell für alle weiteren technischen und sicherheitstechnischen Planungen und Modellbildungen in der VSG dienten, wurde in einem zweiten Schritt die Endlageraus-

legung durchgeführt. Dazu gehörten für jede betrachtete Variante folgende Planungsschritte:

- Thermische Berechnungen
- Grubengebäudeplanungen
- Betrieblicher Strahlenschutz
- Bewetterung
- Verfüll- und Verschlussmaßnahmen sowie
- Bewertung der Varianten hinsichtlich Rückholung und Bergung von Endlagerbehältern

Thermische Berechnungen wurden durchgeführt, um die erforderlichen Abstände zwischen den Endlagerbehältern und Einlagerungsstrecken (Variante B1) respektive Einlagerungsbohrlöchern in den Überfahrungsstrecken (Variante C) zu ermitteln. Die Rechenergebnisse zeigten in allen Fällen, dass die Temperatur von 200 °C zu jedem Zeitpunkt an jedem Punkt im Endlagerbergwerk bei den gewählten Abständen nicht überschritten wird. Für die Auslegung des Grubengebäudes unter dem Aspekt eines möglichst geringen Flächenbedarfs bedeutet dies, dass für die zugrunde gelegte Konditionierung der ausgedienten Brennelemente für die Streckenlagerung (B1) und die Bohrlochlagerung (C) eine Zwischenlagerzeit von ca. 50 Jahren anzusetzen ist. Weiterhin zeigten die thermischen Berechnungen eine ähnliche Temperaturerhöhung am Salzspiegel. Sie beträgt 9 K bei der Streckenlagerung und 8 K bei der Bohrlochlagerung.

Die für den Betrieb eines Endlagers geltenden Schutzziele werden durch das Atomgesetz (AtG) und die Strahlenschutzverordnung (StrlSchV) vorgegeben. Zu den Maßnahmen des betrieblichen Strahlenschutzes gehörte die Einteilung des Endlagers in Strahlenschutzbereiche und die radiologische Überwachung. Diese Einteilung ist erforderlich aufgrund der Strahlung sowie einer möglichen Kontamination bzw. Freisetzung von Radionukliden aus den Endlagerbehältern.

Die Entwicklung eines angemessenen und stets sicheren Bewetterungssystems orientierte sich an der in den Sicherheitsanforderungen des BMU enthaltenen Vorgabe, im Rahmen der Endlagerauslegung Auffahrungen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich (ewG) zu minimieren. Um dieser Anforderung gerecht zu werden, sollen die vor-

handenen Grubenbaue der Einlagerungssohle zur Bewetterung genutzt werden. Somit wird nur das vorhandene Endlagerbergwerk mit Hilfe einer einsöhligen Bewetterung mit frischen Wetterern versorgt. Die wettertechnische Nutzung der über dem Einlagerungsniveau liegenden Erkundungssohle ist nicht vorgesehen. Deshalb wurde ein Bewetterungskonzept gewählt, das gewährleistet, dass im Grubengebäude eine rückläufige Wetterführung entsteht. Das bedeutet, dass die frischen Wetter über den einziehenden Schacht (Schacht 1) der Doppelschachanlage in das Grubengebäude ziehen. Hier teilt sich der Wetterstrom in drei Teilströme; den Einlagerungsbereich im Ostflügel (Variante B1) des Grubengebäudes, den Einlagerungsbereich im Westflügel (Variante A) und den Infrastrukturbereich. Durch Berechnungen konnte für jede Variante nachgewiesen werden, dass jeder Betriebspunkt mit hinreichend Frischwetter versorgt werden kann.

Grundlage des Verfüll- und Verschlusskonzeptes ist das Sicherheitskonzept in /MÖN 12/. Dort sind auch maßgebliche Sicherheitsprinzipien für das Verfüll- und Verschlusskonzept definiert, wie z. B. die Einlagerung der radioaktiven Abfälle im einschlusswirksamen Gebirgsbereich (ewG). Die während der Erstellung des Endlagerbergwerkes aufgefahrenen Hohlräume sowie die beiden Tagesschächte stellen eine Durchörterung der geologischen Barriere dar. Im Sicherheitskonzept, dessen Leitgedanke neben der sicheren Betriebsführung des Endlagerbergwerkes der sichere Einschluss der radioaktiven Abfälle ist, wird deshalb eine schnelle und wirksame Abdichtung dieser Durchörterungen gefordert, um langfristig die Integrität der geologischen Barriere wieder herzustellen. Schnell wirksame Verschlussmaßnahmen sind die Streckenverschlüsse in den Hauptzugangstrecken zu den beiden Schächten sowie die Verfüllung und der dichte Verschluss der beiden Tagesschächte. Als langfristig wirksame Verfüllmaßnahmen wurden folglich das Verfüllen der Richtstrecken im Norden und Süden mit angefeuchtetem Salzgrus und der restlichen Grubenbaue mit trockenem Salzgrus geplant. Ausgenommen davon sind die Infrastrukturbereiche, die zur Gewährleistung eines Speicherraums mit Hartgesteinsschotter verfüllt werden.

Gemäß den Sicherheitsanforderungen des BMU wird als „Rückholbarkeit“ „die geplante technische Möglichkeit zum Entfernen der eingelagerten radioaktiven Abfallbehälter aus dem Endlagerbergwerk“ /BMU 10/ bezeichnet. Diese Forderung bezieht sich laut /BMU 10/ auf die Betriebsphase eines Endlagers. Die Rückholung der Endlagerbehälter ist demnach bereits in der Konzeption und Planung des Endlagerbergwerkes zu berücksichtigen. Dies betrifft alle Verfahren und Techniken sowie die zur Einlagerung vorgesehenen Endlagerbehälter. Für die betrachteten Varianten wurden die technischen Randbedingungen und Möglichkeiten einer solchen Rückholung überprüft. Da-

bei konnte festgestellt werden, dass mit konventioneller Technik sowohl eine Rückholung von POLLUX<sup>®</sup>-Behältern, von Transport- und Lagerbehältern als auch von in verrohrten Bohrungen eingelagerten Kokillen machbar erscheint. Für die Rückholung von POLLUX<sup>®</sup>-Behältern und Brennstabkokillen kann auf bereits erprobte Techniken zurückgegriffen werden. Für die Rückholung von Transport- und Lagerbehältern sind weitere Entwicklungsarbeiten erforderlich. In jedem Fall sind Demonstrationsversuche unter Tage erforderlich. Im Hinblick auf die dafür notwendige Streckenauffahrung der Rückholungsstrecken sind die thermischen Anforderungen für die Bohrlochlagerung (Variante C) geringer als bei der Streckenlagerung. Von der Forderung nach Rückholung ausgenommen sind nach Kapitel 1 der BMU-Sicherheitsanforderungen die im Westflügel optional eingelagerten Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung.

In den Sicherheitsanforderungen des BMU wird als Bergung „die Rückholung radioaktiver Abfälle aus dem Endlager als Notfallmaßnahme“ bezeichnet. Für die Bergung der Abfallbehälter aus dem stillgelegten Endlager ist ein neues Bergwerk zu errichten. Die Machbarkeit wurde in /ENG 95/ für eingelagerte POLLUX<sup>®</sup>-Behälter beschrieben. Für die Transport- und Lagerbehälter gilt diese Aussage sinngemäß. Für die Variante C gilt die Anforderung, dass die Abfallbehälter über den betrachteten Zeitraum von bis zu 500 Jahren nach Betriebsende formstabil bleiben und ihre mechanische Stabilität uneingeschränkt gewährleistet ist. Das Ziehen der rückholbaren Kokillen aus der Verrohrung und die Transportvorgänge unter und über Tage dürfen nicht zu einer Beschädigung der Kokillen führen, aus der radiologische Konsequenzen entstehen.

Als weiterer Arbeitsschritt im Rahmen der Endlagerauslegung wurde der Ausschluss der Kritikalität von direkt endgelagerten, ausgedienten Brennelementen aus Druck- und Siedewasserreaktoren (DWR, SWR) sowie Forschungs- und Prototypreaktoren untersucht. Als Ergebnis lässt sich festhalten, dass nach gegenwärtigem Ermessen die Bildung einer sich selbst erhaltenden Kettenreaktion in einem Endlager in einem chloridbasiertem Salzgestein auf Basis des Nuklidinventars eines einzelnen Endlagerbehälters der Typen BSK-3, POLLUX<sup>®</sup>-10 sowie bei der direkten Endlagerung von Transport- und Zwischenlagerbehältern Typ CASTOR<sup>®</sup> mit ausgedienten LWR-Brennstoffen ausgeschlossen ist. Eine wesentliche Randbedingung für die Nachweisführung ist dabei die Berücksichtigung der Neutronen absorbierenden Wirkung des Nuklids <sup>35</sup>Cl. Wie die Rechenergebnisse für die gewählten Betrachtungsfälle zeigten, wird durch die Neutronen absorbierende Wirkung des Nuklids <sup>35</sup>Cl, das in hoher Konzentration in einer gesättigten Chloridsalzlösung vorliegt, ein stark reaktivitätsmindernder Effekt im Vergleich zu reinem Wasser erreicht. Eine Berücksichtigung des Ab-

brands der Brennelemente wird in diesem Fall nicht erforderlich. Im Hinblick auf mögliche Langzeiteffekte wurden in den Kritikalitätsrechnungen ausgewählte Degradationsszenarien wie Flutung des Behälterinnenraums mit Wasser bzw. Salzlösung, Verlust des eingebauten Neutronenabsorbers oder Auflösung des Brennelementkorbes modelliert. Unter Berücksichtigung des  $^{35}\text{Cl}$  in der Konzentration, die in  $\text{MgCl}_2$ -gesättigter Lösung vorliegt, bleiben alle diese betrachteten Systeme und Betrachtungsfälle unterkritisch, so dass das Nachweiskonzept der Kritikalitätssicherheit für LWR-Brennstoffe darauf abgestützt werden kann. Für einige höher angereicherte Brennstoffe aus Forschungs- und Prototypreaktoren können – je nach Brennstoffart und Behälterkonzept – dennoch zusätzlich Konditionierungsmaßnahmen erforderlich werden. Dies gilt insbesondere für die höher angereicherten Brennstoffe der Reaktoren FRM-II und KNK-II. Eine genaue Einschätzung erfordert jedoch tiefer gehende Untersuchungen, die über den Rahmen der VSG hinausgehen.

In einem letzten Planungsschritt wurden die in den Sicherheitsanforderungen des BMU geforderten Optimierungsmöglichkeiten behandelt. Im Rahmen der Endlagerplanung und Endlagerauslegung wurden Optimierungen vorgenommen, insbesondere hinsichtlich der Minimierung der Durchörterung des ewG. Konkret bedeutet dies, dass das Grubengebäude hinsichtlich Streckenquerschnitte, Anzahl und Länge der Strecken und sonstigen Grubenbaue auf das Notwendigste beschränkt wurde. Das gilt auch hinsichtlich der Wetterführung. Dabei orientierte sich in der vorliegenden Arbeit die Optimierung an einer Minimierung des unter Tage benötigten Flächen- und Hohlraumbedarfs. In künftigen, weiteren Optimierungsschritten können Zielstellungen wie z. B. Minimierung der Temperaturerhöhung im Salzstockspiegel oder im Einlagerungsbereich oder eine noch schnellere Umschließung der Abfälle von Bedeutung sein.

## Literaturverzeichnis

- /ABU 66/ Allgemeine Bergverordnung über Untertagebetriebe, Tagebaue und Salinen im Oberbergamtsbezirk Clausthal-Zellerfeld (ABVO), in der Fassung vom 2. Februar 1966 (Nds. MBl. Nr. 15/1966 S. 337).
- /ABV 12/ Bergverordnung für alle bergbaulichen Bereiche (Allgemeine Bundesbergverordnung - AB BergV), in der Fassung vom 23. Oktober 1995 (BGBl. I S. 1466), zuletzt geändert durch Artikel 5 Absatz 5 des Gesetzes vom 24. Februar 2012 (BGBl. I S. 212).
- /AME 05/ Amelung, P., Jobmann, M., Lerch, C., Polster, M., Schonebeck, M.: Berechnungen zur Endlagerauslegung im Steinsalz und Tongestein - Eine vergleichende Gegenüberstellung, Präsentation auf dem Workshop "Gegenüberstellung von Endlagerkonzepten im Salz und Tonstein" - GEIST: Peine, 2005.
- /ATG 11/ Gesetz über die friedliche Verwendung der Kernenergie und den Schutz gegen ihre Gefahren (Atomgesetz - AtG) vom 23. Dezember 1959 (BGBl. I S. 814) in der Fassung der Bekanntmachung vom 15. Juli 1985 (BGBl. I S. 1565) (BGBl. III S. 751-1), zuletzt geändert durch Artikel 1 des Gesetzes vom 31. Juli 2011 (BGBl. I S. 1704).
- /BBG 09/ Bundesberggesetz (BBergG) vom 13. August 1980 (BGBl. I S. 1310), zuletzt geändert durch Artikel 15a des Gesetzes vom 31. Juli 2009 (BGBl. I S. 2585).
- /BEC 04/ Bechthold, W., Smailos, E., Heusermann, S., Bollingerfehr, W., Bazargan Sabet, B., Rothfuchs, T., Kamlot, P., Grupa, J., Olivella, S., Hansen, F.D.: Backfilling and Sealing of Underground Repositories for Radioactive Waste in Salt (BAMBUS-II Project). EUR 20621 EN, European Commission, Nuclear Science and Technology: Luxembourg, 2004.

- /BEU 12/ Beuth, T., Baltés, B., Bollingerfehr, W., Buhmann, D., Charlier, F., Filbert, W., Fischer-Appelt, K., Mönig, J., Rübél, A., Wolf, J.: Untersuchungen zum menschlichen Eindringen in ein Endlager. Bericht zum Arbeitspaket 11, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-280, ISBN: 978-3-939355-56-4, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, 2012.
- /BFS 90/ Bundesamt für Strahlenschutz (BfS): Fortschreibung des zusammenfassenden Zwischenberichtes über bisherige Ergebnisse der Standorterkundung Gorleben vom Mai 1983. Bericht ET-2/90, ISBN: 0937-4434: Salzgitter, April 1990.
- /BFS 02/ Bundesamt für Strahlenschutz (BfS): Lösungsverzeichnis Gorleben, 1. Fortschreibung, Anlage 1: Datenblätter und Analysenblätter Erkundungsbergwerk - ohne Schächte. 15. November 2002.
- /BGR 00/ Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Erkundungsbergwerk Gorleben - Gebirgsmechanische Beurteilung der Integrität der Salzbarriere im Erkundungsbereich EB1 für das technische Endlagerkonzept 1 (Bohrlochlagerung, BSK3). Ergebnisbericht: Hannover, 2000.
- /BGR 02/ Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Endlagerprojekt Gorleben - Geologische Bearbeitung der Erkundungssohle (Geologie, Mineralogie, Geochemie). 2. Geologischer Fachbericht (Geologische Schnitte zur Untertägigen Erkundung): Hannover, 2002.
- /BGR 03a/ Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Projekt Gorleben - Das natürliche Temperaturfeld im Erkundungsbereich 1. Abschlussbericht: Hannover, 2003.
- /BGR 03b/ Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Projekt Gorleben - Erkundungsbegleitende großräumige gebirgsmechanische Berechnungen. Abschlussbericht: Hannover, 2003.

- /BIL 05/ Bilgin, N., Balci, C.: Performance prediction of mechanical excavators in tunnels. [PDF], ITA/AITES-Training Course Tunnel Engineering, erreichbar unter: [http://www.ita-aites.org/fileadmin/filemounts/general/pdf/Ita Association/ProductAndPublication/Training/TrainingCourses/T\\_C\\_Bilgin\\_2005.pdf](http://www.ita-aites.org/fileadmin/filemounts/general/pdf/Ita_Association/ProductAndPublication/Training/TrainingCourses/T_C_Bilgin_2005.pdf), zitiert am 01.10.2012.
- /BIR 40/ Birch, F., Clark, H.: The Thermal Conductivity of Rocks and its Dependence upon Temperature and Composition. American Journal of Science, Vol. 238, S. 529-558, 1940.
- /BLO 10a/ Blohm + Voss Oil Tools: Pipe Handling Equipment - VES-SD Elevator. Version 10/10.2010, Blohm + Voss Repair GmbH: Hamburg, 2010.
- /BLO 10b/ Blohm + Voss Oil Tools: Pipe Handling Equipment - PS-1000 Power Slip. Version 07/10.2010, Blohm + Voss Repair GmbH: Hamburg, 2010.
- /BMU 10/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU): Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle. Bonn, Stand: 30. September 2010.
- /BOL 11/ Bollingerfehr, W., Filbert, W., Lerch, C., Tholen, M.: Endlagerkonzepte. Bericht zum Arbeitspaket 5, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-272, ISBN 978-3-939355-48-9, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, 2011.
- /BOR 91/ Bornemann, O.: Zur Geologie des Salzstocks Gorleben nach den Bohrergebnissen. BfS-Schriften 4/91, 67 Seiten, Bundesamt für Strahlenschutz (BfS): Salzgitter, 1991.
- /BOR 08/ Bornemann, O., Behlau, J., Fischbeck, R., Hammer, J., Jaritz, W., Keller, S., Mingerzahn, G., Schramm, M.: Description of the Gorleben site. Part 3: Results of the geological surface and underground exploration of the salt formation. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Hannover, 2008.

- /BRÄ 11/ Bräuer, V., Eickemeyer, R., Eisenburger, D., Grisseemann, C., Hesser, J., Heusermann, S., Kaiser, D., Nipp, H.-K., Nowak, T., Plischke, I., Schnier, H., Schulze, O., Sönke, J., Weber, J.R.: Description of the Gorleben site Part 4: Geotechnical exploration of the Gorleben salt dome. ISBN 978-3-9814108-0-8, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Hannover, 2011.
- /BRO 09/ Brown, F.B., Bull, J.S., Goorley, J.T., Sood, A., Sweezy, J.E.: MCNP5-1.51 Release Notes. LA-UR-09-00384, 2009.
- /CHA 06/ Chadwick, M.B., Oblozinsky, P., Herman, M., Greene, N.M., McKnight, R.D.: ENDF/B-VII.0: Next Generation Evaluated Nuclear Data Library for Nuclear Science and Technology. Nuclear Data Sheets 107, 2931-3060 Seiten, Oktober 2006.
- /DBE 87/ Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe mbH (DBE): Direkte Endlagerung ausgedienter Brennelemente DEAB, Vorversuche zur Auswahl eines Versatzverfahrens. Abschlussbericht, DEAB T 7: Peine, 1987.
- /DBE 89/ Engelmann, H.-J., Schrimpf, C.: Direkte Endlagerung ausgedienter Brennelemente - Handhabungsversuch HHV. Brief an das Forschungszentrum Karlsruhe, Abt. PAE vom 27.01.1989. T-E/Dr.Schr/He/DM/81300/BA/AE/0010/, Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe mbH (DBE): Peine, 1989.
- /DBE 92/ Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe mbH (DBE): Direkte Endlagerung ausgedienter Brennelemente DEAB (02 E 8201), LinSourPrePost - Verifikation, Validierung und Fehlerabschätzung. DEAB T 53: Peine, 1992.
- /DBE 94/ Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe mbH (DBE): Direkte Endlagerung ausgedienter Brennelemente DEAB, Simulation des Schachttransportes Hauptband. DEAB T 41: Peine, 1994.

- /DBE 95/ Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe mbH (DBE): Direkte Endlagerung ausgedienter Brennelemente DEAB (02 E 8191), Handhabungsversuche zur Streckenlagerung. Abschlussbericht, Hauptband, DEAB T 60: Peine, September 1995.
- /DBE 98/ Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe mbH (DBE): Aktualisierung des Konzeptes "Endlager Gorleben". Abschlussbericht: Peine, 1998. (unveröffentlicht)
- /DIN 84/ Deutsches Institut für Normung (DIN) e.V. 15018-2: Krane; Stahltragwerke; Grundsätze für die bauliche Durchbildung und Ausführung. Beuth Verlag: Berlin, November 1984.
- /DIN 94/ Deutsches Institut für Normung (DIN) e.V. 25478: Einsatz von Berechnungssystemen beim Nachweis der Kritikalitätssicherheit. Beuth Verlag: Berlin, Juli 1994.
- /DIN 11/ Deutsches Institut für Normung (DIN) e.V. 25472: Kritikalitätssicherheit bei der Endlagerung ausgedienter Kernbrennstoffe. Beuth Verlag: Berlin, November 2011.
- /DRO 01/ Droste, J.; Feddersen, H.-K.; Rothfuchs, T.: Experimental Investigations on the Backfill Behaviour in Disposal Drifts in Rock Salt (VVS-Project). GRS – 173. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Braunschweig, Juli 2001.
- /ENG 95/ Engelmann, H.-J., Lommerzheim, A., Biurrun, E., Hubert, R., Pöhler, M.: Direkte Endlagerung ausgedienter Brennelemente DEAB (02E8371), Untersuchung zur Rückholbarkeit von eingelagertem Kernmaterial in der Nachbetriebsphase eines Endlagers. Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe (DBE), 1995.
- /FEU 99/ Feuser, W., Vijgen, H., Barnert, E.: Final disposal in 300 m deep boreholes. Radioactive Waste Management and Environmental Remediation, American Society of Mechanical Engineers (ASME), 1999.

- /FIL 07/ Filbert, W., Jobmann, M., Uhlig, L., Wehrmann, J.: Untersuchungen zur direkten Endlagerung von Transport- und Lagerbehältern (TLB) - AP 3: Auswirkungen der TLB-Einlagerung auf das technische Endlagerkonzept. DBE TECHNOLOGY GmbH: Peine, 2007 (unveröffentlicht).
- /FIL 10/ Filbert, W., Bollingerfehr, W., Heda, M., Lerch, C., Niehues, N., Pöhler, M., Schulz, J., Schwarz, T., Toussaint, M., Wehrmann, J.: Optimization of the Direct Disposal Concept by Emplacing SF Canisters in Boreholes. Abschlussbericht zum FuE-Vorhaben "Optimierung der Direkten Endlagerung durch Kokillenlagerung in Bohrlöchern" 02E9854, DBE TECHNOLOGY GmbH: Peine, Juni 2010.
- /FOK 03/ Fokkens, J.H.: BAMBUS II WP 7.2 - Thermal and Mechanical 3-D Analysis of Deep Lined Boreholes in Rock Salt used for the Retrievable Storage of Heat Producing Vitrified Radioactive Waste. 20533/02.49115/I, Nuclear Research and consultancy Group (NRG): Petten, 2003.
- /FRE 85/ Freude, E.: Quellterm für die Mobilisierung von Radionukliden aus verglastem Abfall. Projekt Sicherheitsstudien Entsorgung (PSE), Fachband 10, Hahn-Meitner-Institut für Kernforschung GmbH: Berlin, 1985.
- /GMA 01a/ Gmal, B., Moser, E.: Kritikalitätsanalysen zur Nachbetriebsphase eines Endlagers für abgebrannte Brennelemente. GRS-A-2880: Köln, Januar 2001.
- /GMA 01b/ Gmal, B., Moser, E., Thiel, J.: Criticality Analyses for a Final Disposal of Spent Nuclear Fuel and Fissible Material Containing Waste in Germany, Proceedings of the American Nuclear Society (ANS) Topical Meeting on Practical Implementation of Nuclear Criticality Safety: Reno NV, 11. - 15.11.2001.
- /GMA 04/ Gmal, B., Hesse, U., Hummelsheim, K., Kilger, R., Krzykacz-Hausmann, B., Moser, E.F.: Untersuchungen zur Kritikalitätssicherheit in der Nachbetriebsphase eines Endlagers für ausgediente Kernbrennstoffe in unterschiedlichen Wirtsformationen. GRS-A-3240, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: München, Dezember 2004.

- /GMA 09/ Gmal, B., Kilger, R., Krzykacz-Hausmann, B., Herbert, H.-J., Moser, F.-E., Peschke, J.: Weiterführende Bearbeitung spezieller Themen im Rahmen generischer Sicherheitsanalysen zur Kritikalität von Kernbrennstoffen in der Nachbetriebsphase eines geologischen Endlagers. 174 Seiten, GRS-A-3486, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Garching, August 2009.
- /GNB 98/ Gesellschaft für Nuklear-Behälter (GNB) mbH: Transportbehälterlager Gorleben (TBL-G), Antrag zur Aufbewahrung von Kernbrennstoffen und sonstigen radioaktiven Stoffen in Transport- und Lagerbehältern im Transportbehälterlager Gorleben, Thermische Auslegung des Transport-, Lager- und Endlagerbehälters POLLUX-10 DWR-/30 SWR-BE für den bestimmungsgemäßen Betrieb im Lager. GNB B 010/96, Rev. 1: Essen, 1998 (unveröffentlicht).
- /HAH 88/ Hahne, K.: Vergleich von Methoden zur Berechnung der zeitabhängigen Temperaturverteilung in einem Endlager für radioaktive Abfälle. Fortschritt-Berichte Verband Deutsche Ingenieure (VDI) Reihe 15 Band 59, ISBN 9783181459157, VDI-Verlag: Düsseldorf, 1988.
- /HER 10/ Herrenknecht Vertical: Terra Invader 350T Slingshot. Version 04.2010, Herrenknecht Vertical: Schwanau, 2010.
- /ITA 06/ ITASCA: FLAC3D: Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions - Manuals. Users Guide. 3. Edition, Version 3.1, ITASCA Consulting Group Inc.: Minneapolis, Minnesota, USA, 2006.
- /KBV 83/ Bergverordnung zum Schutz der Gesundheit gegen Klimaeinwirkungen (Klima-Bergverordnung - KlimaBergV), in der Fassung vom 9. Juni 1983 (BGBl. I S. 685).
- /KIL 12/ Kilger, R., Bock, M., Moser, E., Gmal, B.: Betrachtungen zum Kritikalitätsausschluss in der Nachverschlussphase. Technischer Bericht zum Arbeitspaket 6, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: München, März 2012.

- /KOC 12/ Kock, I., Eickemeier, R., Frieling, G., Heusermann, S., Knauth, M., Minkley, W., Navarro, M., Nipp, H.-K., Vogel, P.: Integritätsanalyse der geologischen Barriere. Bericht zum Arbeitspaket 9.1, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-286, ISBN: 978-3-939355-62-5, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, 2012.
- /KOR 96/ Korthaus, E.: Consolidation and Deviatoric Deformation Behaviour of Dry Crushed Salt at Temperatures up to 150°C. 4th Conference on the Mechanical Behaviour of Salt: Montreal, June 1996.
- /KRÖ 09/ Kröhn, K.-P., Stührenberg, D., Herklotz, M., Heemann, U., Lerch, C., Xie, M.: Restporosität und -permeabilität von kompaktierendem Salzgrus-Versatz, REPOPERM - Phase 1. Abschlussbericht, GRS-254, ISBN 978-3-939355-29-8, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), DBE TECHNOLOGY GmbH, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Braunschweig, September 2009.
- /KTA 99/ Kerntechnischer Ausschuss (KTA): Sicherheitstechnische Regel des KTA, Auslegung von Hebezeugen in Kernkraftwerken. KTA 3902, Fassung 6/1999, 1999.
- /LEU 12/ Leuger, B., Staudtmeister, K., Zapf, D.: The thermo-mechanical behavior of a gas storage cavern during high frequency loading. In: Mechanical Behavior of Salt VII, Tijani, M., Berest, P., Ghoreychi, M., Hadj-Hassen, F. (Editoren), S. 363-369, ISBN Print 978-0-415-62122-9, 2012.
- /MAG 06/ Magill, J., Pfennig, G., Galy, J.: Karlsruher Nuklidkarte. Report EUR 22276 EN, ISBN 92-79-02175-3, European Commission Joint Research Centre (EC-JRC), Forschungszentrum Karlsruhe (FZK), 2006, revised printing 2011.
- /MAR 12/ Marshall, W.J., Rearden, B.T.: Criticality Safety Validation of SCALE 6.1 with ENDF/B-VII.0 Libraries. 456-460 Seiten, Transactions of the American Nuclear Society (Trans. Am. Nucl. Soc.) 106, 2012.

- /MER 79/ Merz, E.: Endlagerformen für hochradioaktive Spaltproduktabfälle. atw, Vol. 24, Nr. 8/9, S. 409-413, 1979.
- /MÖN 12/ Mönig, J., Buhmann, D., Rübél, A., Wolf, J., Baltes, B.: Sicherheits- und Nachweiskonzept. Bericht zum Arbeitspaket 4, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-277, ISBN: 978-3-939355-53-3, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, 2012.
- /MOS 02/ Mosteller, R.D.: Validation Suites for MCNP™. 12th Biennial Radiation Protection and Shielding Div. (RPSD) Topical Meeting, LA-UR-02-0878: Santa Fe, New Mexico, 14. - 17.04.2002.
- /MRU 11/ Mrugalla, S.: Geowissenschaftliche Langzeitprognose. Bericht zum Arbeitspaket 2, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-275, ISBN 978-3-939355-51-9, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, Juli 2011.
- /MÜL 93/ Müller-Hoeppe, N., Biurrun, E.: LINSOURPREPOST – LINE SOURces suitable for PRE- and POSTprocessing. Revision 20.01.1993, Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe mbH (DBE): Peine, 1993.
- /MÜL 08/ Müller, B., Ewig, F.: Abschätzung der Standzeit von Endlagergebänden in einem zukünftigen HAW-Endlager im Salzgestein unter dem Einfluss der Korrosion. ISTec-A-1301, 44 Seiten: Köln, August 2008.
- /MÜL 12/ Müller-Hoeppe, N., Buhmann, D., Czaikowski, O., Engelhardt, H.J., Herbert, H.-J., Lerch, C., Linkamp, M., Wieczorek, K., Xie, M.: Integrität geotechnischer Barrieren – Teil 1: Vorbemessung. Bericht zum Arbeitspaket 9.2, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-287, ISBN: 978-3-939355-63-2, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, 2012.

- /NSE 12/ nse - international nuclear safety engineering GmbH, DBE TECHNOLOGY GmbH: Konzept Rückholung zu Variante C. MEMO 20120113-nse/DBE TECHNOLOGY GmbH zum Arbeitspaket 6, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, Januar 2012.
- /PEI 11a/ Peiffer, F., McStocker, B., Gründler, D., Ewig, F., Thomauske, B., Havenith, A., Kettler, J.: Abfallspezifikation und Mengengerüst. Basis Laufzeitverlängerung der Kernkraftwerke (September 2010). Bericht zum Arbeitspaket 3, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-274, ISBN 978-3-939355-50-2, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, Juli 2011.
- /PEI 11b/ Peiffer, F., McStocker, B., Gründler, D., Ewig, F., Thomauske, B., Havenith, A., Kettler, J.: Abfallspezifikation und Mengengerüst. Basis Ausstieg aus der Kernenergienutzung (Juli 2011). Bericht zum Arbeitspaket 3, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-278, ISBN 978-3-939355-54-0, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, September 2011.
- /PEI 12/ Peiffer, F., McStocker, B.: Einschätzung betrieblicher Machbarkeit von Endlagerkonzepten. Bericht zum Arbeitspaket 12, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-279, ISBN 978-3-939355-55-7, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, März 2012.
- /POP 12/ Popp, T., Salzer, K., Schulze, O., Stührenberg, D.: Hydro-mechanische Eigenschaften von Salzgrusversatz - Synoptisches Prozessverständnis und Datenbasis. Memorandum, Institut für Gebirgsmechanik (IFG), Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Leipzig, 30.05.2012.
- /REI 06/ Richtlinie zur Emissions- und Immissionsüberwachung kerntechnischer Anlagen (REI), in der Fassung vom 7. Dezember 2005 (GMBI. 2006, Nr. 14-17, S. 254).
- /REU 89/ Reuther, E.U.: Lehrbuch der Bergbaukunde. Vol. 1, 11. Edition, ISBN 3-7739-0493-2, Glückauf, 1989.

- /ROT 86/ Rothfuchs, T.: Untersuchung der thermisch induzierten Wasserfreisetzung aus polyhalitischem Steinsalz unter in situ Bedingungen. Temperaturversuch 5 im Salzbergwerk Asse. Abschlussbericht, Kommission der Europäischen Gemeinschaften, EUR 10392 DE: Luxembourg, 1986.
- /SCA 09/ SCALE: A Modular Code System for Performing Standardized Computer Analyses for Licensing Evaluation. Vol. I-III, Edition 6, ORNL/TM-2005/39, Available from Radiation Safety Information Computational Center at Oak Ridge National Laboratory as CCC-750, Oak Ridge National Laboratory (ORNL): Oak Ridge, Tennessee, January 2009.
- /SSV 11/ Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen (Strahlenschutzverordnung - StrlSchV), in der Fassung vom 20. Juli 2001 (BGBl. I S. 1714, ber. BGBl. 2002 I S. 1459), zuletzt geändert durch Art. 1 VO zur Änd. strahlenschutzrechtlicher VO vom 4. Oktober 2011 (BGBl. I S. 2000).
- /STE 96/ Stein, E., Barthold, F.-J.: Elastizitätstheorie. In: Der Ingenieurbau, Grundwissen: Werkstoffe, Elastizitätstheorie, Mehlhorn, G. (Editor), S. 165-428, ISBN 3-433-01570-8, erreichbar unter: <http://www.bauwesen.tu-dortmund.de/nmi/Medienpool/Skripte/eth-ges.pdf>, Ernst & Sohn: Berlin, 1996.
- /THI 12/ Thienel, K.-C.: Bauchemie und Werkstoffe des Bauwesens - Chemie und Eigenschaften mineralischer Baustoffe und Bindemittel. [HTML], Stand vom 25.09.2012, erreichbar unter: [www.unibw.de/bauv3/lehre/skripten](http://www.unibw.de/bauv3/lehre/skripten).
- /THU 02/ Thuro, K.: Geologisch-felsmechanische Grundlagen der Gebirgslösung im Tunnelbau. Münchner Geologische Hefte, Reihe B: Heft 18, Habilitationsschrift, XIV, 2002.
- /VOß 81/ Voß, J.: Grubenklima: Grundlagen, Vorausberechnung, Wetterkühlung; Mit Arbeitsblättern und Berechnungsbeispielen für die bergbauliche Praxis. Vol. 27, Glückauf-Betriebsbücher, Verlag Glückauf GmbH: Essen, 1981.

- /WIE 12/ Wieczorek, K., Lerch, C., Navarro, M., Müller-Hoeppe, N., Czaikowski, O., Navarro, M.: Zusammenstellung von Stoffparametern für Salzgrus. Technischer Bericht, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Braunschweig, August 2012.
- /WOL 12/ Wolf, J., Behlau, J., Beuth, T., Bracke, G., Bube, C., Buhmann, D., Dresbach, C., Hammer, J., Keller, S., Kienzler, B., Klinge, H., Krone, J., Lommerzheim, A., Metz, V., Mönig, J., Mrugalla, S., Popp, T., Rübel, A., Weber, J.R.: FEP-Katalog für die VSG. Dokumentation. Bericht zum Arbeitspaket 7, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-283, ISBN: 978-3-939355-58-8, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, 2012.

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1	BSK-R (rückholbare Kokille für Brennstäbe und für Kokillen) /NSE 12/....	13
Abb. 2.2	Geologischer Vertikalschnitt Querschlag 1 West mit Projektion eines Einlagerungsfeldes mit zehn Einlagerungsstrecken in der Variante B1 /BGR 02/.....	21
Abb. 2.3	Vereinfachter schematischer Schnitt /BOR 91/ .....	22
Abb. 2.4	Thermische Leistung eines Brennelementes in Abhängigkeit von der Zeit, beladungsäquivalent zu einem DWR-BE, sowie die thermische Leistung einer CSD-V .....	25
Abb. 3.1	Einlagerungsfelder West für radioaktive Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung .....	37
Abb. 3.2	Profil und Draufsicht der befüllten Einlagerungskammer (Gussbehälter Typ II) .....	38
Abb. 3.3	Einlagerungsfelder West 1 – 3 für radioaktive Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung (optimiert) .....	40
Abb. 3.4	Schematische Darstellung der Berechnungsmodelle B1M2 bis B1M4 in der Variante B1.....	43
Abb. 3.5	Zeitlicher Verlauf der Temperatur am thermischen Auslegungspunkt des Behälters für unterschiedliche Modellvarianten (POLLUX <sup>®</sup> -10, DWR- UO <sub>2</sub> ).....	49
Abb. 3.6	Zeitlicher Verlauf der Temperatur am thermischen Auslegungspunkt der Behälter in den einzelnen Strecken, B1M3: POLLUX <sup>®</sup> -10, DWR mix 89/11, 49a ZLZ, zehn Strecken, zeitgleiche Einlagerung in jeweils zwei Strecken .....	51
Abb. 3.7	Zeitlicher Verlauf der Porosität von Salzgrus in den Querschnitten „Behältermitte“ und „Mitte Behälterabstand“ in den Strecken 1 und 5, B1M3: POLLUX <sup>®</sup> -10, DWR mix 89/11, 49a ZLZ, zehn Strecken, zeitgleiche Einlagerung in jeweils zwei Strecken .....	53

Abb. 3.8	Porositätsverlauf von Salzgrus in den Querschnitten „Behältermitte“ (oben) und „Mitte Behälterabstand“ (unten) in der Einlagerungsstrecke 1 (links) und der Einlagerungsstrecke 5 (rechts) zum Zeitpunkt von ca. zwei Jahren nach Einlagerung, B1M3: POLLUX®-10, DWR mix 89/11, 49a ZLZ, zehn Strecken, zeitgleiche Einlagerung in jeweils zwei Strecken .....	54
Abb. 3.9	Vergleich des Anteils aus Kriechklasse und Temperatur an der stationären Kriechrate (rot – Standort Gorleben, VSG) und der stationären Kriechrate (blau – Standort Asse, TSS-Versuchsfeld) in Abhängigkeit von der Erwärmung .....	56
Abb. 3.10	Verlauf der Wärmeleitfähigkeit in ausgewählten Querschnitten der Strecken 1 und 5 in Abhängigkeit von der Porosität und der Temperatur .....	57
Abb. 3.11	Temperaturverteilung der Behälter im Endlager zum Zeitpunkt 70 Jahren nach Einlagerungsbeginn, B1M4: Behälter mit Brennstäben aus Leistungsreaktoren und CSD-V .....	59
Abb. 3.12	Zeitlicher Verlauf der Temperatur an der Oberfläche ausgewählter Behälter in den Einlagerungsfeldern Ost 3 (CSD-V), Ost 4 (WWER), Ost 7 (DWR mix 89/11) und Ost 10 (DWR mix 89/11), B1M4 .....	61
Abb. 3.13	Zeitlicher Verlauf der Temperatur im Einlagerungsfeld Ost 8 (DWR mix 89/11), B1M4 .....	62
Abb. 3.14	Zeitlicher Verlauf der Temperatur entlang der Umfahrung und im Infrastrukturbereich, B1M4 .....	64
Abb. 3.15	Zeitlicher Verlauf der Temperatur an den geplanten Verschlussstandorten und entlang der Schachtachse, B1M4 .....	65
Abb. 3.16	Zeitlicher Verlauf der Temperatur im Abstand von 50 m zur Umfahrung und am Salzspiegel, B1M4 .....	66
Abb. 3.17	Einlagerungsfelder Ost – Streckenlagerung für ausgediente Brennelemente, wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle sowie Brennelement-Strukturteile .....	68
Abb. 3.18	Modell des Grubengebäudes für die Streckenlagerung (Variante B1) und die Kammerlagerung (Variante A) mit Wetterströmen .....	80

Abb. 3.19	Beispiel Lüfter B1.....	83
Abb. 3.20	Position Streckenverschlüsse auf der 870 m-Sohle .....	91
Abb. 3.21	Wiederaufzufahrender Bereich des Grubengebäudes .....	97
Abb. 3.22	Beanspruchung der Anschlagpunkte in axialer und radialer Richtung.....	99
Abb. 3.23	Ziehen der Endlagerbehälter mit Ziehstange (links) oder Seil (rechts) in die Rückholstrecke .....	99
Abb. 3.24	Schema Streckenauffahrung .....	100
Abb. 3.25	Mögliches Konzept der Auffahrung und Bewetterung von Parallelstrecken in einem Einlagerungsfeld.....	103
Abb. 3.26	Streckenaustrittstemperatur der Wetter bei $v = 3$ m/s in Bezug auf die Auskühlzeit bei $200\text{ °C}$ Oberflächentemperatur .....	105
Abb. 3.27	Streckenaustrittstemperatur der Wetter bei $v = 3$ m/s in Bezug auf die Streckenlänge bei Gebirgstemperatur $200\text{ °C}$ .....	106
Abb. 3.28	Streckenaustrittstemperatur der Wetter bei $v = 3$ m/s in Bezug auf die Streckenlänge bei Gebirgstemperatur $150\text{ °C}$ .....	107
Abb. 3.29	Blockmodell zur Berechnung des Zeitaufwandes für die Rückholung ....	111
Abb. 3.30	Ablauf und Harmonisierung der Rückholung für zwei Felder.....	113
Abb. 3.31	Ablaufplan Rückholung .....	114
Abb. 3.32	Schematische Darstellung der Berechnungsmodelle CM2 bis CM5 in der Variante B1.....	121
Abb. 3.33	Maximaltemperatur im Steinsalz in Abhängigkeit von der Zeit für unterschiedliche Modelle der Variante C, DWR mix 89/11, 50 Jahre Zwischenlagerzeit, Bohrlochabstand 50,6 m.....	124
Abb. 3.34	Temperaturverteilung entlang der Verrohrung der Einlagerungsbohrlöcher mit stark wärmeentwickelnden Abfällen zum Zeitpunkt von 300 Jahre (nur Einlagerungsbohrlöcher) nach Einlagerungsbeginn, Berechnungsmodell CM5 (Endlagerauslegung).....	126

Abb. 3.35	Zeitlicher Verlauf der Temperatur an der Oberfläche ausgewählter Verrohrungen der Einlagerungsfelder in einer Teufe von 1.025 m, Berechnungsmodell CM5 (Endlagerauslegung).....	127
Abb. 3.36	Zeitlicher Verlauf der Temperatur auf der Sohle der Überfahrungen, Teufe 870 m, im Einlagerungsfeld Ost 2, Berechnungsmodell CM5 (Endlagerauslegung) .....	129
Abb. 3.37	Zeitlicher Verlauf der Temperatur entlang der Umfahrung und im Infrastrukturbereich, Teufe 870 m, Berechnungsmodell CM5 (Endlagerauslegung).....	130
Abb. 3.38	Zeitlicher Verlauf der Temperatur an den Streckenverschlüssen und entlang der Schachtachse, Berechnungsmodell CM5 (Endlagerauslegung).....	131
Abb. 3.39	Zeitlicher Verlauf der Temperatur von ausgewählten Punkten im Abstand von 50 m zur Umfahrung projiziert in die Teufe von 1.025 m und am Salzspiegel, Berechnungsmodell CM5 (Endlagerauslegung) ....	132
Abb. 3.40	Einlagerungsfelder Ost – Bohrlochlagerung für ausgediente Brennelemente, wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle sowie Brennelement-Strukturteile.....	134
Abb. 3.41	Ermittlung der Normalspannung für eine Stapelung von 50 Kokillen.....	137
Abb. 3.42	Modell asymmetrische Druckverteilung auf Rohrwandung.....	138
Abb. 3.43	Ermittlung Belastung auf Rohrwandung (Wandstärke 50 mm).....	139
Abb. 3.44	Raise-Boring-Maschine /HER 10/ .....	140
Abb. 3.45	Freie Konvergenz in einem Bohrloch (Teufenlage 870 bis 1.170 m, Kriechklasse 5) /BOL 11/ .....	141
Abb. 3.46	Beispiel Kennfelder des Einzellüfters und der Parallelschaltung .....	147
Abb. 3.47	Wiederaufzufahrender Bereich des Grubengebäudes .....	151
Abb. 3.48	Schema Streckenauffahrung .....	154
Abb. 3.49	Variante B2: Einlagerungsfeld für 70 TLB.....	160

Abb. 3.50	Prinzipdarstellung der Variante ähnlich /DBE 94/.....	162
Abb. 3.51	Fördergestell mit Zwischenboden ähnlich /DBE 94/.....	163
Abb. 3.52	Füllort mit bereitstehender Umladevorrichtung.....	164
Abb. 3.53	Transport- und Lagerbehälter-Umladevorrichtung.....	165
Abb. 3.54	Situation am Einlagerungsort für die TLB-Einlagerung.....	167
Abb. 3.55	Verlorener Schlitten mit aufgesetztem CASTOR® V/19.....	168
Abb. 3.56	Konventionelle Drehscheibe .....	169
Abb. 3.57	Streckentransport- und Einlagerungsvorrichtung (STEV).....	171
Abb. 3.58	Kennfeld Hauptgrubenlüfter .....	177
Abb. 3.59	Ausschnitt eines Einlagerungsfeldes für Variante B2.....	180
Abb. 4.1	Einlagerungsfelder West für radioaktive Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung (optimiert).....	187
Abb. 4.2	Endlagerkonzept mit verlängerter südlicher Richtstrecke.....	188
Abb. 4.3	Zentrale Lage der BE-Strukturteile-Einlagerungskammer in Feld Ost 12.....	188



## Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1	Mengengerüst der ausgedienten Brennelemente aus Leistungsreaktoren .....	6
Tab. 2.2	Mengengerüst der hochradioaktiven und wärmeentwickelnden Wiederaufarbeitungsabfälle .....	7
Tab. 2.3	Mengengerüst der ausgedienten Brennelemente (BE)/Brennstäbe (BS) aus Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken und Forschungsreaktoren.....	7
Tab. 2.4	Mengengerüst der Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung.....	8
Tab. 2.5	Abmessungen und Massen der Endlagerbehälter für die Variante B1 (Streckenlagerung) .....	10
Tab. 2.6	Abmessungen und Massen der Endlagerbehälter für die Variante B2 (Differenzbetrachtung) .....	11
Tab. 2.7	Abmessungen und Masse der BSK-R für die Variante C (Bohrlochlagerung) .....	14
Tab. 2.8	Abmessungen und Massen der Abfallgebinde für die Variante A.....	15
Tab. 2.9	Anzahl der Endlagerbehälter für die Variante B1 – Streckenlagerung.....	16
Tab. 2.10	Anzahl der Endlagerbehälter für die Variante B2 – Differenzbetrachtung zur Streckenlagerung .....	17
Tab. 2.11	Anzahl der Endlagerbehälter für die Variante C – Bohrlochlagerung .....	18
Tab. 2.12	Anzahl der Endlagerbehälter für die Variante A – radioaktive Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung .....	18
Tab. 2.13	Gesamtmasse und -volumen der Endlagerbehälter für die Variante B1 – Streckenlagerung.....	19
Tab. 2.14	Gesamtmasse und -volumen der Endlagerbehälter für die Variante B2 – Streckenlagerung.....	19

Tab. 2.15	Gesamtmasse und -volumen der Endlagerbehälter für die Variante C – Bohrlochlagerung.....	19
Tab. 2.16	Gesamtmasse und -volumen der Endlagerbehälter für die Variante A – radioaktive Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung .....	20
Tab. 2.17	Thermomechanische Koppelparameter der vorliegenden Gesteinseinheiten und von Salzgrus.....	28
Tab. 3.1	Belegung der Einlagerungsfelder (Kammerlagerung, Variante A).....	39
Tab. 3.2	Charakteristische thermische Einlagerungsgrößen eines beladenen POLLUX®-Behälters, Berechnungsergebnisse aus B1M1 – Einzelbehälter und B1M2 – Elementarzelle.....	45
Tab. 3.3	Vergleich der Bedingungen im TSS-Versuch und den VSG-Prognoserechnungen .....	55
Tab. 3.4	Belegung der Einlagerungsfelder (streckengenau, Variante B1).....	68
Tab. 3.5	Arbeitspunkte und Wetterbedarf der Variante B1 .....	78
Tab. 3.6	Arbeitspunkte und Wetterbedarf der optionalen Variante A.....	79
Tab. 3.7	Vergleich wettertechnischer Sollwerte und berechneter Ist-Werte an unterschiedlichen Betriebspunkten .....	82
Tab. 3.8	Versatz- und Verfüllbaustoffe.....	93
Tab. 3.9	TSM Klassen /THU 02/, /BIL 05/ .....	101
Tab. 3.10	Daten für die Planung der Rückholung .....	111
Tab. 3.11	Belegung der Einlagerungsfelder (Bohrlochlagerung, Variante C) .....	135
Tab. 3.12	Vergleich wettertechnischer Sollwerte und berechneter Ist-Werte an unterschiedlichen Betriebspunkten .....	148

## Glossar/Abkürzungen/Stichwortverzeichnis

AP	Arbeitspaket
BE	Brennelement
BSK-3	Kokille, die Brennstäbe aus drei DWR-Brennelementen aufnehmen kann
BSK-R	Kokille, die wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle und Brennstäbe ungebundener Brennelemente aufnehmen kann und für eine Rückholung konzipiert wurde
DEAB	Direkte Endlagerung ausgedienter Brennelemente – abgeschlossenes Forschungsvorhaben der DBE
DIREGT	Untersuchungen zur direkten Endlagerung von Transport- und Lagerbehältern – Laufendes Forschungsvorhaben der DBE TECHNOLOGY GmbH
ELVIS	im Rahmen des Forschungsprojektes DEAB entwickelte und erprobte Einlagerungsvorrichtung zur Einlagerung von POLLUX®-Behältern in Strecken
ewG	einschlusswirksamer Gebirgsbereich
FLAC 3D	Software zur Berechnung dreidimensionaler Multiphysics-Modelle auf Basis der Finiten-Elemente-Methode
KB	Kontrollbereich
KENO Va und VI	Bestandteil der SCALE 6 Software, Monte-Carlo-Code basiertes Programm zur Kritikalitätsberechnung, erlaubt die Modellierung komplexer dreidimensionaler Geometrien
Koepe-Förderung	Treibscheibenförderung, Förderseil wird durch Reibschluss mit der Treibscheibe bewegt
KTA	Kerntechnischer Ausschuss
LinSour	Software zur Berechnung thermischer Prozesse im dreidimensionalen Raum
NetzCAD	Software zur Berechnung kompressibler Stömungsnetze, speziell für die Wetternetzberechnung im untertägigen Bergbau
Raise boring	Bohrverfahren zur Herstellung großer Bohrlochdurchmesser, bei dem entlang einer Pilotbohrung eine kreisrunde Bohrung zwischen einem unterirdischen Hohlraum und einer höheren Ebene erstellt werden kann
REPOPERM	Forschungsvorhaben zur Untersuchung der Entwicklung von Restporosität und Restpermeabilität im kompaktierenden Salzgrus-Versatz in einem HAW-Endlager zur Verbesserung der Modelle der Langzeitsicherheitsanalyse
Rohrschüsse	einzelne Segmente eines Rohres

SCALE 6	Standardized Computer Analyses for Licensing Evaluation Modular Code System for Workstations and Personal Computers, Software zur standardisierten Analyse und Beurteilung von Kernbrennstoffanlagen und Verpackungsdesigns
STEV	Streckentransport- und Einlagerungsvorrichtung
TLB	Transport- und Lagerbehälter
t <sub>SM</sub>	Tonne Schwermetall
ÜB	Überwachungsbereich
UCS	Uniaxial Compressive Strength - Einaxiale Gesteinsfestigkeit
UVV	Unfallverhütungsvorschriften

## **A Anhang A: Bewetterung und Auswirkungen von Betriebsstörungen**

### **A.1 Einführung in das Programm NetzCAD**

Die verwendete Software NetzCAD (Version 2.15.) ermöglicht die Berechnung und Analyse von kompressiblen Strömungsnetzen und wurde speziell für die Simulation von Wetternetzen in Bergwerken entwickelt. Im Erkundungsbergwerk Gorleben wird die Software für betriebseigene Wetternetzberechnungen eingesetzt. Dort gemessene Parameter wie z. B. Reibungswerte in Strecken stimmen mit den berechneten Werten gut überein. Die Struktur des Wetternetzes basiert auf Knoten und Zweigen, die durch Widerstände, geometrische Eigenschaften, Temperaturen, Druckquellen und die Lage im Raum charakterisiert sind. Im Programm erfolgt die grafische Darstellung des Grubengebäudes. In dieses Layout sind die einzelnen Knoten und Zweige eingefügt. Änderungen im erstellten Wetternetz werden von der Software sofort eingerechnet, so dass die aktuellen Bedingungen und Auswirkungen im Wetternetz direkt nach Eingabe ablesbar sind.

Der künstliche Wetterstrom wird im Endlagerbergwerk mit Hilfe von Lüftern erzeugt. Hauptgrubenlüfter und zusätzliche Lüfter für die Sonderbewetterungsanlagen werden im Programm durch entsprechende Lüfterkennlinien beschrieben. Die Lüfterkennlinien dienen zur Darstellung des Betriebsverhaltens, mit Hilfe der beiden wesentlichen Kenngrößen Gesamtdruckerhöhung und erzeugtem Volumenstrom. Die Anlagenkennlinie des entsprechenden Grubenteils beschreibt den Zusammenhang zwischen gefördertem Volumenstrom und zu überwindendem Druck. Sie ist vom jeweiligen Grubengebäude abhängig. Der Schnittpunkt beider Kurven bildet den Arbeitspunkt des Lüfters. Dieser Punkt definiert den Volumenstrom, den der Lüfter unter den herrschenden Bedingungen aufbringen kann. Um einen möglichst hohen Wirkungsgrad des Motors zu erzielen, sollte der Betriebspunkt im mittleren Teil der Lüfterkennlinie liegen.

Das Programm NetzCAD berechnet keine Temperaturänderungen innerhalb des Wetterstromes, auch Wärmequellen, wie beispielsweise Maschinen, können nicht dargestellt werden. Temperaturveränderungen in einer Strecke und im gesamten Grubengebäude können lediglich durch Berechnungen außerhalb des Programms und Festlegungen der Streckenanfangs- und Endtemperatur als Randbedingungen bestimmt werden. Zur möglichst realitätsnahen Darstellung wurde in die Modelle eine Tempera-

turerhöhung im Grubengebäude eingebunden. Der gewählte Temperaturverlauf entspricht dabei einem möglichen Zustand im Grubengebäude. Der Temperaturverlauf innerhalb des Wetternetzes wird vom Programm mit aufgenommen.

## A.2 Modellannahmen

Im Erkundungsbergwerk Gorleben wird für eigene Wetternetzberechnungen ebenfalls die Planungssoftware NetzCAD genutzt. Dieser Umstand wurde genutzt, um Ergebnisse der durchgeführten Modellrechnungen im Rahmen der VSG sowie einzelne Parameter und Berechnungsgrößen (z. B. Streckenwiderstände, Reibungswiderstände in den Lutten) mit den tatsächlichen Bedingungen und den vorhandenen Erfahrungen am Standort zu vergleichen. Der Vergleich bestätigt die getroffenen Annahmen und Berechnungen (Tab. A.1). Die berechneten Parameter stimmen mit den im realen Bergwerk festgestellten Größen überein und sind im Rahmen der im Vorhaben VSG getroffenen Annahmen einsetzbar. Gleichzeitig bestätigen die Erfahrungen am Standort, dass die Software die tatsächlichen Bedingungen im Bergwerk sehr genau simulieren und wiedergeben kann. Auch der in der Simulation entstandene natürliche Wetterzug stimmt mit den Bedingungen am bereits existierenden Erkundungsbergwerk Gorleben überein. Die Aussagefähigkeit der Modellrechnung wurde somit durch ein reales Beispiel überprüft und als hoch eingeschätzt.

**Tab. A.1** Vergleich der Reibungsbeiwerte

Parameter	in der Simulation	im Erkundungsbergwerk
Reibungsbeiwert $\lambda$ Strecke	0,08	0,08
Reibungsbeiwert $\lambda$ Faltlutte	0,024	0,02

Für die Simulationen wurden eine Durchschnittstemperatur von 10°C und eine relative Luftfeuchte von 60 % bei Normaldruck gewählt. Jahreszeitliche Änderungen wurden ebenfalls berücksichtigt.

Um eine möglichst hohe Aussagefähigkeit der Modelle erzielen zu können, müssen neben den äußeren Bedingungen auch die Bedingungen im Grubengebäude exakt abgebildet werden. Das Programm NetzCAD ermittelt anhand der gewählten Geometrien und Reibungsfaktoren die Streckenwiderstände. Nicht berücksichtigt sind dabei Biegungen und Unregelmäßigkeiten in den Strecken. Diese Zusatzwiderstände werden durch die Erhöhung des jeweiligen Gesamtwiderstandes sowie entsprechende Beiwer-

te berücksichtigt. In den südlichen Richtstrecken beider Einlagerungsfelder und auch beider Varianten ist neben den Versorgungsmedien auch die Installation einer Bandanlage vorgesehen. Dies führt zu einer Reduzierung des freien Querschnitts um  $1 \text{ m}^2$  auf  $22 \text{ m}^2$ . An den aktiven Einlagerungstrecken führen in den Strecken stehende Aggregate (Stromversorgung, Entstaubung) und Sonderbewetterungseinrichtungen ebenfalls zu einer Reduzierung des freien Querschnitts. Zusätzliche Annahmen müssen im Infrastrukturbereich getroffen werden. Besonders die Lager und Werkstätten besitzen nutzungsbedingt größere Querschnitte. Da die genauen Abmessungen und Lokationen in der VSG-Planung nicht hinreichend definiert sind, wurden die Querschnitte des Infrastrukturbereiches pauschal mit  $30 \text{ m}^2$  angenommen. Diese Annahme begründet sich aus dem größeren Platzbedarf für Werkstätten und Lager. Durch die nicht bekannte Unterteilung ist es des Weiteren nicht möglich, einzelnen Strecken konkrete Wettermengen zuzuordnen. Vereinfacht teilt sich der im Vorfeld bestimmte Wetterbedarf von  $10.000 \text{ m}^3/\text{min}$  auf den im aktuellen Grubengebäude vorhandenen Infrastrukturbereich auf.

### **A.3 Betriebsstörungen und deren Einfluss auf die Bewetterung**

Neben der Untersuchung der grundsätzlichen Machbarkeit der einsöhligen Bewetterung für die Varianten B1, B2 und C, jeweils in Kombination mit der optionalen Variante A, ist es notwendig, mögliche auftretende Ausnahmesituationen und deren Auswirkungen auf die Bewetterung zu prüfen. Betriebsstörungen mit einer direkten Auswirkung auf die Bewetterung sind:

- Stromausfall im Grubengebäude
- Ausfall des Hauptgrubenlüfters
- Brandfall im Grubengebäude

#### **Stromausfall im Grubengebäude**

Ein Stromausfall im Grubengebäude hat zur Folge, dass alle oder Teile der Lüfter zur Sonderbewetterung ausfallen. Ohne die Gewährleistung einer ausreichenden Bewetterung sind die Arbeiten in den sonderbewetterten Strecken einzustellen. Sofern der Hauptgrubenlüfter funktionsfähig ist und den Wetterstrom in den durchschlägigen Grubenteilen aufrechterhält, ist eine Evakuierung des gesamten Grubengebäudes nicht

nötig. Der Hauptwetterstrom wird auch ohne die Zusatzlüfter bestehen bleiben. Es entsteht keine Gefährdung der Belegschaft.

### **Ausfall des Hauptgrubenlüfters**

Ein Ausfall des Hauptgrubenlüfters kann unterschiedliche Gründe haben. Unabhängig von der genauen Ursache bedeutet dieser Ausfall aber immer, dass eine ausreichende Bewetterung nicht mehr gewährleistet werden kann. Noch vorhandene Wetterbewegungen im Grubengebäude resultieren aus dem Impuls des Hauptgrubenlüfters und bei längeren Stillständen aus dem natürlichen Wetterzug.

Wie die Simulationen im Programm NetzCAD zeigen, ist der natürliche Wetterzug im Endlagerbergwerk in Hauptwetterrichtung ausgeprägt. Bei einem Ausfall des Hauptgrubenlüfters ist eine Wetterumkehr nicht zu erwarten. Die Größe des natürlichen Wetterzuges ist abhängig vom Dichteunterschied der Luft an der Tagesoberfläche und im Grubengebäude. In den Wintermonaten ist ein deutlich stärkerer natürlicher Wetterzug zu erwarten als in den Sommermonaten. Bei dauerhaft hohen Oberflächentemperaturen kann der natürliche Wetterzug zum Erliegen kommen.

Bei einem Ausfall des Hauptgrubenlüfters müssen die Arbeiten eingestellt werden. Ist es nicht möglich, innerhalb der vorgegebenen Frist den Reservelüfter in Betrieb zu setzen, muss die Belegschaft das Bergwerk verlassen.

### **Brandfall**

Trotz aller zu ergreifender Brandschutzmaßnahmen ist das Risiko eines Brandes nie ganz auszuschließen. Brände können sowohl im konventionellen Bergwerksteil (ÜB) als auch im kerntechnischen Teil (KB) auftreten.

Ein Brandfall im Grubengebäude hat weitreichende Auswirkungen auf die Wetter und die Belegschaft. Durch den Brand entstehen Brandschwaden mit deutlich erhöhten Konzentrationen an Schadstoffen. Der Wetterstrom ist in der Regel nicht in der Lage, diese Schadstoffkonzentration ausreichend zu verdünnen. Zusätzlich wird der Wetterstrom durch die Rauchentwicklung und den Temperaturanstieg belastet. Das Weiterarbeiten ist im Brandfall nicht möglich. Die Belegschaft muss die betroffenen Teile des Grubengebäudes über die entsprechenden Fluchtwege verlassen. Mögliche Brandursachen sind:

- Schweiß- oder Schneidarbeiten
- Umgang mit brennbaren Flüssigkeiten
- Wärmequellen an maschinellen Betriebsmitteln
- Schadhafte (elektrische) Anlagenteile
- Kollisionen oder ähnliche Unfälle von Betriebsmitteln

Im Brandfall müssen an jedem Ort im Grubengebäude zwei unabhängige Fluchtwege zur Verfügung stehen. Ausnahmen bilden nichtdurchschlägige Grubenbaue, wie etwa Vortriebe. Für diese Grubenteile gelten gesonderte Sicherheitsbestimmungen. Entsprechende Regelungen existieren für den konventionellen Bergbau und sind übertragbar. Beispielsweise müssen sonderbewetterte Strecken mit Streckenlängen über 400 m zum Schutz der Belegschaft mit Fluchtkammern bzw. Rettungskammern ausgestattet werden. Während des Endlagerbetriebes sind in allen betrachteten Varianten bei Vortrieben und Versatzstrecken Sonderbewetterungsstrecken länger als 400 m zu erwarten.

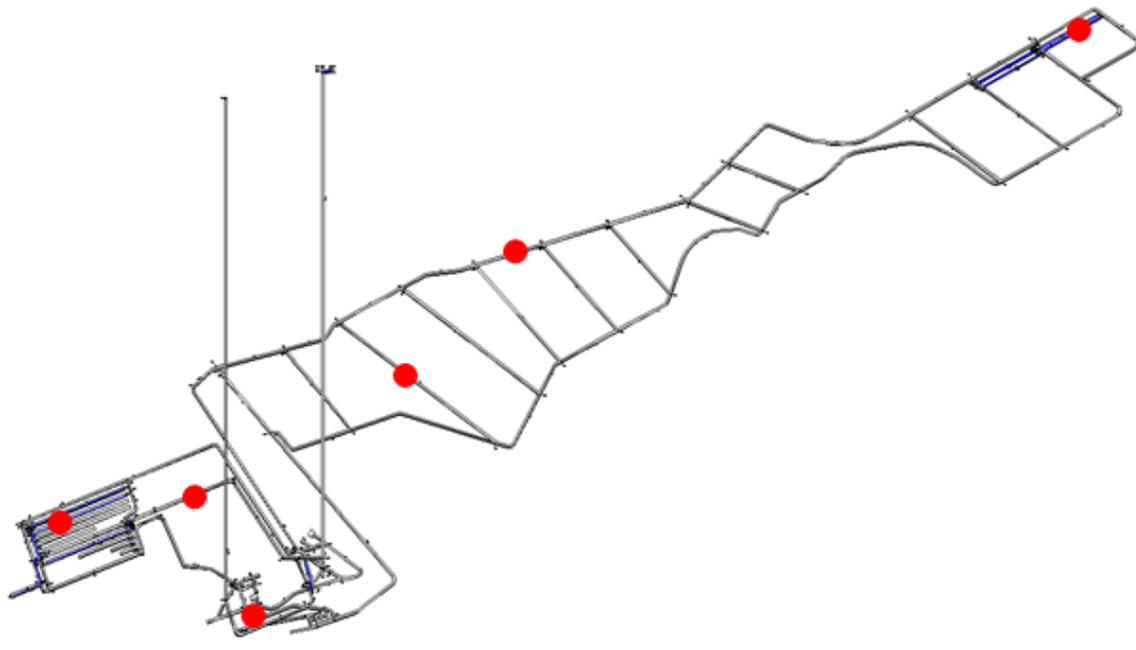
Ein Brandherd bildet, durch die hohen Temperaturen, eine zusätzliche Auftriebsquelle. Entsprechend des herrschenden Wetterregimes kann es zu einer Wetterumkehr kommen. Von diesem Phänomen gefährdet sind besonders abwärts bewetterte Strecken. Durch die einsöhlige Aus- und Vorrichtung des Endlagerbergwerkes sind derartige Grubenbaue nicht vorgesehen. Einen abwärts bewetternden Grubenbau bildet der Schacht 1. Bei einem Brandfall im Schacht 1 ist theoretisch eine Wetterumkehr im gesamten Grubengebäude möglich.

### **Fluchtwege bei der Einlagerungsvariante Streckenlagerung kombiniert mit Kammerlagerung**

Zur Bewertung der Fluchtwegsituationen können einzelne Brandstellen als Referenz betrachtet werden:

- Brand im Infrastrukturbereich
- Brand in der Richtstrecke Süd
- Brand in einem Querschlag
- Brand in einer Einlagerungsstrecke

- Brand in der Richtstrecke Nord
- Brand in der Abwetterstrecke A
- Brand im Einlagerungsbereich der Variante A (westlicher Grubenteil)



**Abb. A.1** Mögliche Brandherde in der Einlagerungsvariante Streckenlagerung kombiniert mit Kammerlagerung

Der Fluchtweg umfasst die Strecke vom jeweiligen Aufenthaltsort (Fluchtansatzpunkt) bis zum Erreichen eines, beim jeweiligen Brandereignis, unbelasteten Wetterstromes (Fluchtendpunkt). Im Regelbetrieb darf der Überwachungsbereich nicht vom Kontrollbereich aus befahren werden. Der Brandfall, als Abweichung vom Regelbetrieb, bildet eine Ausnahme. Der Übergang vom Kontrollbereich in den Überwachungsbereich ermöglicht der Belegschaft den Wechsel in den Frischwetterstrom und gibt die Möglichkeit, die Grube gefahrlos zu verlassen. Wie bereits beschrieben, erlauben die installierten Wetterdrosseln, -türen und -tore im Notfall einen ungehinderten Übergang der Belegschaft.

Im Infrastrukturbereich besitzen besonders die Werkstätten ein erhöhtes Brandrisiko. Im Brandfall begibt sich die Belegschaft im Infrastrukturbereich entweder Richtung Schacht 1 oder flüchtet in Wetterrichtung bis zu einem geeigneten Übergang zum Frischwetterbereich. Durch die Teilung der Wetterströme ist die Versorgung der Einlagerungsfelder nicht direkt betroffen. Da die Brandschwaden über den Schacht 2 das

Grubengebäude verlassen, ist dieser Zu-/Ausgang versperrt. Die Belegschaft muss über die südlichen Richtstrecken und den regulären Seilfahrtsschacht (Schacht 1) die Grube verlassen.

In der Richtstrecke Süd bildet die installierte Bandanlage eine potenzielle Brandquelle. Frischwetterseitig ist das Verlassen der Grube gegen den Wetterstrom, Richtung Schacht 1, möglich. Abwetterseitig erfolgt die Flucht in Wetterrichtung über die Querschläge und Richtstrecke Nord. An geeigneter Stelle kann über die Querschläge wieder in die Richtstrecke Süd und somit in den Frischwetterstrom gewechselt werden. Dabei wird vom Kontrollbereich in den Überwachungsbereich gewechselt. Ist dieser Übergang brandbedingt nicht möglich, führt der Fluchtweg über die Richtstrecke Nord bis zum Infrastrukturbereich.

Mögliche Brandherde in den Querschlägen können an den Maschinen und Arbeitspunkten der Nebenarbeiten, z. B. Erkundungsbohrungen, entstehen. Abwetterseitig erfolgt die Flucht in Wetterrichtung bis zum nächsten Querschlag, bei dem in den Frischwetterstrom der Richtstrecke Süd gewechselt werden kann. Frischwetterseitig kann das Grubengebäude über die südliche Richtstrecke und den Schacht 1 verlassen werden.

Bei einem Brand in einer Einlagerungsstrecke verlässt die Belegschaft diese und wechselt in den Frischwetterstrom im Querschlag. An anderen, vom Brand betroffenen Arbeitsplätzen wird wie in den vorher beschriebenen Fällen an geeigneter Stelle in den Frischwetterstrom gewechselt. In selber Weise wird auch bei einem Brand in der nördlichen Richtstrecke an geeigneter Stelle über die Querschläge in den Frischwetterstrom (südliche Richtstrecke) gewechselt.

Bei einem Brand in der Abwetterstrecke der Variante A ziehen die Brandschwaden in der Abwetterstrecke Richtung Schacht 2 und verlassen dort das Grubengebäude. Sollte sich im Brandfall Belegschaft in der Abwetterstrecke aufhalten, muss diese die Strecke in Wetterrichtung verlassen. Mögliche Brandlasten bilden die in der Strecke installierten Lüfter. Von einem Lüfterbrand wäre auch der angeschlossene Einlagerungsbereich betroffen, da mit Ausfall eines Lüfters die angeschlossene Sonderbewetterung versagen würde. Betroffene Bereiche müssen geräumt werden.

Durch die Wetterteilung ist der Wetterstrom des jeweils anderen Einlagerungsfeldes nicht direkt von einem Brand betroffen. Befahrungen erfolgen ausschließlich über den

Schacht 1. Der zweite Fluchtweg über den Schacht 2 steht im Brandfall nicht mehr zur Verfügung, da hier die Brandschwaden ausziehen. Die Befahrung des Schachtes 1 und der Wechsel vom KB in den ÜB ist jederzeit möglich.

### **Betriebsstörungen und Fluchtwege bei der Einlagerungsvariante Bohrlochlage- rung kombiniert mit Kammerlagerung**

Die Grubengebäude der Varianten B1 und C unterscheiden sich zum einen in der Gesamtausdehnung und zum anderen findet bei der Variante C die Einlagerung in zwischen den Richtstrecken aufgefahrenen Querschlägen, sogenannten Überfahrungsstrecken, statt. Schächte, Infrastrukturbereich und auch das Grubengebäude der Variante A sind in beiden Konzepten gleich. Aus diesem Umstand ergeben sich für Brandfälle innerhalb des Grubengebäudes der Variante C im Wesentlichen dieselben Fluchtwege wie bei der Variante B1.

Die bereits in B1 beschriebenen und auch für C geltenden Brandfälle und Fluchtwege sind:

- Brand im Infrastrukturbereich
- Brand in der Richtstrecke Süd
- Brand in einem Querschlag
- Brand in der Richtstrecke Nord
- Brand in der Abwetterstrecke A
- Brand im Einlagerungsbereich der Variante A (westlicher Grubenteil)

Bei Bränden in nichtdurchschlägigen Grubenbauen, wie etwa Vortrieben und Versatzstrecken, ergeben sich veränderte Fluchtwege. Vortriebe erfolgen im Überwachungsbereich von der Richtstrecke Süd aus. Im Brandfall verlässt die Belegschaft die sonderbewettete Strecke und begibt sich in der Richtstrecke Süd zum Schacht 1.

Versatzstrecken sind dem Kontrollbereich zuzuordnen und enden in der Richtstrecke Nord. Im Brandfall verlässt die Belegschaft die sonderbewettete Strecke und flüchtet in Abwetterrichtung innerhalb der Richtstrecke Nord. Den nächstmöglichen Fluchtendpunkt bildet der Standort des Lüfters zur Versorgung der Versatzstrecke oder der abwetterseitig nächstmögliche Übergang zur Richtstrecke Süd.

Ab einer Sonderbewetterungslänge von 400 m sind, wie bereits in den Ausführungen zur Streckenlagerung beschrieben, Fluchtkammern in den entsprechenden Strecken zu errichten. Bei der Variante C betrifft dies die Einlagerungsquerschläge der Teilfelder Ost 1 und 2 mit bis zu 770 m Länge (Ost 2.7). Die Kammern dürfen maximal 300 m von der Ortsbrust entfernt stehen.

### **Betriebsstörungen und Fluchtwege bei der Einlagerungsvariante Transport- und Lagerbehälter in horizontalen Bohrlöchern kombiniert mit Kammerlagerung**

Das Grubengebäude der Variante B2 ähnelt im grundsätzlichen Aufbau dem der Variante C. Zwischen den Richtstrecken verlaufen die durchschlägigen Einlagerungsstrecken. Bedingt durch diesen Aufbau lassen sich für die Variante B2 dieselben Fluchtwege wie für die Variante C beschreiben. Eine Besonderheit der Variante B2 bilden lange Einlagerungsstrecken. Während der Auffahrung entstehen Blindstrecken mit mehr als 400 m Länge. Diese sind für die Dauer der Auffahrung mit Fluchtkammern bzw. Rettungskammern auszustatten.



## **B           Anhang B: Thermische Grundlagen und Berechnungsmodelle**

Im vorliegenden Anhang B werden die für die thermische Auslegung des Endlagerbergwerkes relevanten Grundlagen und Berechnungsmodelle im Detail beschrieben. Dazu zählen die Herleitung der Wärmeleistungsdaten aus der zu berücksichtigenden Art und Menge an wärmeentwickelnden Abfällen und ausgedienten Brennelementen. Weiterhin werden für die zu berücksichtigenden Materialien des Wirtsgesteins und der Endlagerbehälter die Stoffgleichungen und Materialparameter beschrieben. Schließlich wird erläutert, wie die Berechnungsmodelle zur thermischen Auslegung der Varianten aufgebaut sind.

### **B.1           Ableitung der Wärmeproduktion und ihr Modell**

In der thermischen Auslegung des Grubengebäudes werden nur Abfälle berücksichtigt, die über eine hohe Wärmeleistung verfügen. Das Abfallmengengerüst wurde in /PEI 11b/ auf der Basis des Beschlusses zur Beendigung der friedlichen Nutzung der Kernenergie vom Sommer 2011 bestimmt. Von den dort behandelten Abfallströmen der bestrahlten Brennelemente aus Leistungsreaktoren, der radioaktiven Abfälle aus der Wiederaufarbeitung, der bestrahlten Brennelemente aus Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken und Forschungsreaktoren sowie der Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung sind aus thermischer Sicht nur die beiden zuerst genannten Typen von Bedeutung. Ihre, auf die Behälterlänge bezogene Wärmeleistung ist deutlich höher als bei den übrigen Abfalltypen. Werden die in /BOL 11/ genannten Behälterabmessungen und -abstände zusammen mit der Wärmeleistung der entsprechenden Abfälle berücksichtigt, liegt die längenspezifische thermische Leistung aus Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken und Forschungsreaktoren im in /PEI 11b/ angegebenen Zeitraum um mindestens eine halbe Größenordnung unter der längenspezifisch geringsten thermischen Leistung der beiden o. g. Abfallströme von Brennelementen aus Leistungsreaktoren und radioaktiven Abfälle aus der Wiederaufarbeitung. Die geringste thermische Leistung wird bei diesen beiden Abfallströmen bei einer Behälterbeladung mit WWER-DWR-BE erzielt. Vorabberechnungen haben gezeigt, dass der thermische Einfluss der mit WWER-DWR-BE beladenen Behälter sehr gering ist. Entsprechend ist der thermische Einfluss von Behältern, die mit Brennelementen aus Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken und Forschungsreaktoren beladen sind, noch geringer und ist daher vernachlässigbar.

In den thermischen Auslegungsberechnungen werden sowohl die in Tab. 2.1 genannten Mengen an ausgedienten Brennelementen als auch die in Tab. 2.2 genannten Mengen an CSD-V Kokillen aus der Wiederaufarbeitung berücksichtigt. Die Verteilung dieses Abfallaufkommens wird in /PEI 11b/ in Zeitscheiben von jeweils fünf Jahren Dauer angegeben. Als Bezugsgrößen werden dabei sowohl die Stückanzahl als auch die Masse an Schwermetall verwendet. Die zeitabhängige Wärmeleistung eines Abfalltyps  $W(t)/t_{SM}$  ist auf der Basis einer ausgewählten Abfallspezifikation angegeben (Tab. B.1). Entwicklungen, wie höhere Abbrände, sind unberücksichtigt geblieben. In Tab. B.1 bezeichnet DWR Druckwasserreaktoren westlicher Bauart und SWR Siedewasserreaktoren westlicher Bauart. Für die Brennelemente aus Druckwasserreaktoren russischer Bauart WWER wird von den beiden in /PEI 11b/ dokumentierten Abfallspezifikationen konservativ die des Kraftwerks Greifswald (KGR) verwendet.

**Tab. B.1** Abfallspezifikation der berücksichtigten wärmeentwickelnden Abfälle /PEI 11b/

Reaktortyp	Brennstoff	Element/ Nuklid	Anteil [%]	Abbrand [GWd/t <sub>SM</sub> ]
DWR	UO <sub>2</sub>	U-235	4,4	55
	MOX	Pu	8,6	
SWR	UO <sub>2</sub>	U-235	3,5	50
	MOX	Pu	6,3	
WWER (KGR)	UO <sub>2</sub>	U-235	3,6	30

Wird für die jeweiligen Abfallarten und für die in /PEI 11b/ angegebenen 5 Jahres-Zeitscheiben die Schwermetallmasse auf die Brennelementanzahl bezogen, ergeben sich Abweichungen gegenüber dem jeweiligen Mittelwert (Tab. B.2). Im Maximum wird eine um 9 % höhere Schwermetallmasse je Brennelement DWR-MOX im Zeitraum 2016 – 2020 ausgewiesen und im Minimum eine um 22 % geringere Schwermetallmasse je Brennelement DWR-UO<sub>2</sub> im Zeitraum 1991 – 1995. Im Rahmen der hier durchgeführten Auslegung wird von den Gesamtmittelwerten ausgegangen (Tab. B.2). Für jeden Abfalltyp wird so jeweils nur eine zeitabhängige Wärmefreisetzung verwendet, wobei die dabei berücksichtigte Schwermetallmasse je Brennelement dem Gesamtmittelwert aus Tab. B.2 entspricht.

**Tab. B.2** Schwermetallmasse pro Brennelement im Gesamtmittel sowie Größt- und Kleinstwert in den 5 Jahres-Zeitscheiben

Abfalltyp	Gesamtanzahl BE	Gesamtmasse SM [t <sub>SM</sub> ]	Masse SM/Anzahl BE		
			Gesamtmittelwert	5a-Zeitscheiben	
				Max.	Min.
DWR-UO <sub>2</sub>	12.450	6.415	0,515	0,525	0,400
DWR-MOX	1.530	765	0,500	0,545	0,400
SWR-UO <sub>2</sub>	14.350	2.465	0,172	0,174	0,150
SWR-MOX	1.250	220	0,176	0,182	0,171
WWER	5.050	580	0,115	0,115	0,115

Das Konzept für die Endlagerbehälter sieht vor, dass sowohl bei der Streckenlagerung in POLLUX<sup>®</sup>-Behältern, Kapitel 2.2.1, als auch bei der Bohrlochlagerung in Brennstabkokillen, Kapitel 2.2.3, 3 SWR-BE bzw. 2,5 WWER-BE beladungsäquivalent zu einem DWR-BE sind. In Abb. 2.4 wird die thermische Leistung der hier thermisch relevanten Abfälle in Form von DWR-äquivalenten Brennelementen angegeben. Zusätzlich zu den Brennelementen ist die zeitabhängige thermische Leistung der CSD-V Kokille angegeben. Für diese Kokille werden die Garantiewerte der Cogema verwendet, /PEI 11b/, Angaben über die Leistung der Kokillen aus Sellafield und Karlsruhe sind nicht verfügbar. Abb. 2.4 ist zu entnehmen, dass die Brennelemente eines DWR-Reaktors bei gleichem Brennstoff zu einem gegebenen Zeitpunkt stets mehr Wärme freisetzen als die DWR-äquivalente Anzahl an Brennelementen eines SWR-Reaktors. Es wird daher im Hinblick auf die thermische Auslegung des Grubengebäudes die für die Wärmefreisetzung thermisch konservative Annahme getroffen, dass die SWR-BE gemeinsam mit den DWR-BE behandelt werden.

In /AME 05/ wurde gezeigt, dass die Auslegungstemperatur von 200 °C von Steinsalz bei Behältern mit einer reinen MOX-Beladung nur eingehalten werden kann, wenn bei Behälternennbeladung von Brennstäben aus 10 BE eine unrealistisch lange Zwischenlagerzeit verwendet wird oder die Behälter nur teilbeladen werden, um eine akzeptable Zwischenlagerzeit zu ermöglichen. Eine Alternative bei einer vollen Behälterbeladung und gleichzeitig akzeptablen Zwischenlagerzeiten ist eine gemischte Behälterbeladung aus UO<sub>2</sub>-BE und MOX-BE. Aufgrund der unterschiedlichen Länge der Brennelemente beschränkt sich die Mischung auf die Brennelemente des jeweils gleichen Reaktortyps. Das in Abb. 2.4 enthaltene gemischte Brennelement mit einer Beladung aus 89 %

DWR-UO<sub>2</sub>-Anteil und 11 % DWR-MOX entspricht dem Mischungsverhältnis, welches sich aus dem Verhältnis der Gesamtmengen von DWR-UO<sub>2</sub>-BE und DWR-MOX-BE ableitet (Tab. B.2). Da das thermische Verhalten eines DWR-Brennelementes stets das eines DWR-äquivalenten SWR-Brennelementes abdeckt und der MOX-Anteil der SWR-BE mit ca. 8 % geringer ausfällt als der MOX-Anteil der DWR-BE, deckt das DWR-Mix 89/11-BE die Wärmefreisetzung eines auf der Basis der Gesamtwerte gemischten SWR-Mix-BE konservativ ab.

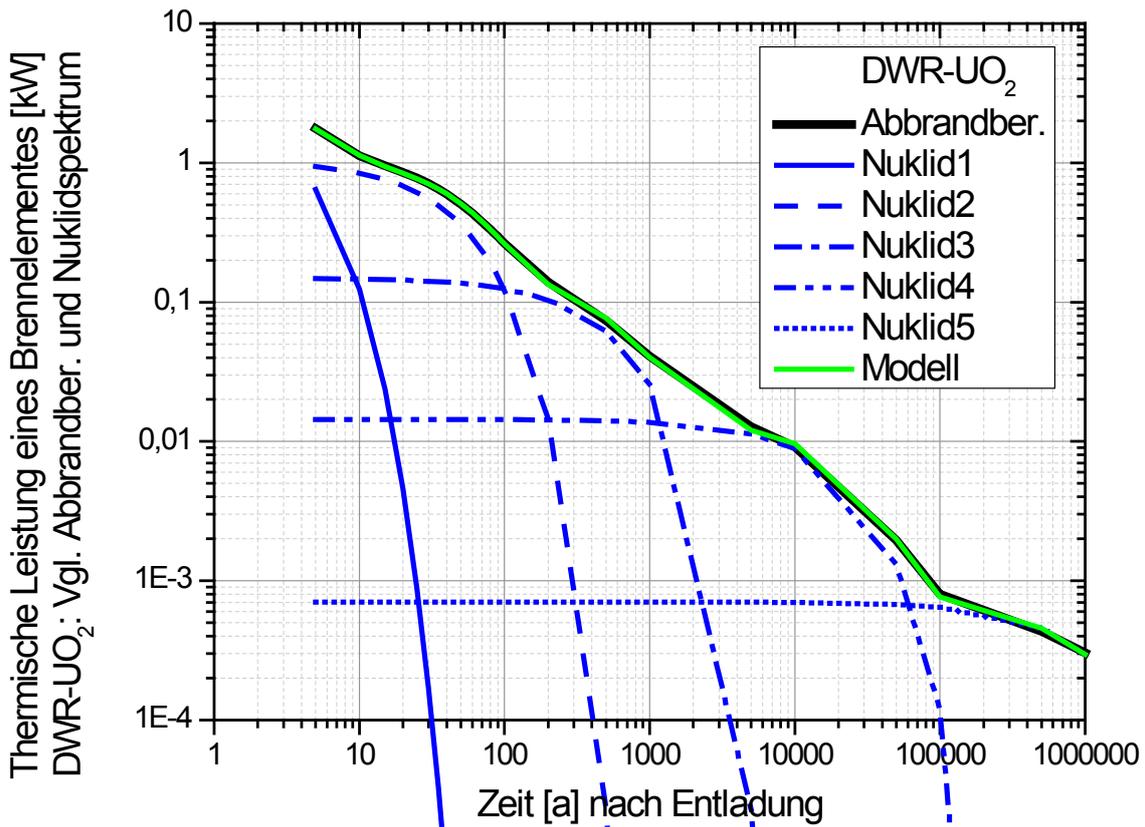
In den thermischen Auslegungsberechnungen werden die SWR-BE unter Berücksichtigung des DWR-Äquivalenzfaktors von 3 bei der Behälterbeladung zahlenmäßig berücksichtigt. Die thermisch konservative Behandlung der Wärmefreisetzung als DWR-Mix 89/11-BE führt in der Gesamtmenge rechnerisch zu einem zusätzlichen Wärmeeintrag in das Gebirge, der abhängig vom Zeitpunkt nach Reaktorentladung zwischen 5 % und 8 % liegt.

Die mathematische Beschreibung der in Abb. 2.4 dargestellten Wärmefreisetzung in Abhängigkeit von der Zeit wird in den Berechnungsmodellen vereinfacht über ein reduziertes thermisches Nuklidspektrum abgebildet. Diese Nuklide entsprechen keinem in der Abbrandberechnung verwendeten realen Nuklid /PEI 11b/, sondern dienen lediglich einer vereinfachten mathematischen Beschreibung, Abb. B.1. In der Approximation der thermischen Leistungsdaten, Abb. 2.4, wird ein Nuklidspektrum verwendet, das aus vier oder fünf Leitnukliden besteht.

$$P(t) = \sum_{i=1}^n p_i e^{-t \cdot \frac{\ln(2)}{t_{1/2,i}}} = \sum_{i=1}^n p_i e^{-t \cdot \lambda_i} \quad (\text{B.1})$$

mit

- P(t): Wärmefreisetzung in Abhängigkeit von der Zeit
- i: Laufindex
- p<sub>i</sub>: Wärmefreisetzung des Nuklids i zum Zeitpunkt der Reaktorentnahme
- t<sub>1/2, i</sub>: Halbwertszeit des Nuklids i
- t: Zeit seit Reaktorentnahme
- λ<sub>i</sub>: Zerfallskonstante des Nuklids i



**Abb. B.1** Anpassung der Wärmefreisetzung eines DWR-UO<sub>2</sub>-Brennelementes an ein Nuklidspektrum mit fünf Leitnukliden

Es zeigte sich, dass die gewählte Anzahl an Leitnukliden die thermische Leistung mit guter Genauigkeit beschreibt (Abb. B.1). Die Fehlerquadratmethode ergibt z. B. für die Anpassung der Wärmefreisetzung des DWR-UO<sub>2</sub>-BE einen mittleren relativen Fehler von 2 %. Die maximale relative Überschreitung beträgt 6 % und tritt zum Zeitpunkt von 500.000 Jahre nach Reaktorentladung auf, die maximale relative Unterschreitung beträgt 5 % und tritt zum Zeitpunkt von 5.000 Jahren nach Reaktorentladung auf. Wird nur ein sehr beschränkter Zeitbereich betrachtet, kann die Anzahl der Leitnuklide ggf. zugunsten der numerischen Effizienz weiter reduziert werden. Grundsätzlich liegen Daten erst ab einem Zeitpunkt von fünf Jahren nach Reaktorentnahme vor. Berechnungen mit Zwischenlagerzeiten unterhalb von fünf Jahren führen zu einer Unterschätzung des Wärmeeintrags und werden daher nicht durchgeführt. Die Parameterwerte des Nuklidspektrums sind in Tab. B.3 für die hier relevanten Quellterme angegeben.

**Tab. B.3** Nuklidspektren eines Brennelementes bzw. einer Kokille für die berücksichtigten wärmeentwickelnden Abfälle

		DWR-UO <sub>2</sub>	DWR-Mix 89/11	WWR (KGR)	CSD-V
Nuklid 1:					
Leistung p <sub>1</sub>	[ kW ]	3,364	3,318	3,980·10 <sup>-1</sup>	1,469
Halbwertszeit t <sub>1/2, 1</sub>	[ a ]	2,100	2,163	1,769	2,782·10 <sup>1</sup>
Nuklid 2:					
Leistung p <sub>2</sub>	[ kW ]	1,046	1,144	1,126·10 <sup>-1</sup>	4,549·10 <sup>-2</sup>
Halbwertszeit t <sub>1/2, 2</sub>	[ a ]	3,232·10 <sup>1</sup>	3,233·10 <sup>1</sup>	3,242·10 <sup>1</sup>	4,204·10 <sup>2</sup>
Nuklid 3:					
Leistung p <sub>3</sub>	[ kW ]	1,489·10 <sup>-1</sup>	2,225·10 <sup>-1</sup>	2,034·10 <sup>-2</sup>	1,101·10 <sup>-3</sup>
Halbwertszeit t <sub>1/2, 3</sub>	[ a ]	3,951·10 <sup>2</sup>	3,973·10 <sup>2</sup>	4,306·10 <sup>2</sup>	1,237·10 <sup>4</sup>
Nuklid 4:					
Leistung p <sub>4</sub>	[ kW ]	1,441·10 <sup>-2</sup>	2,112·10 <sup>-2</sup>	2,402·10 <sup>-3</sup>	1,074·10 <sup>-4</sup>
Halbwertszeit t <sub>1/2, 4</sub>	[ a ]	1,446·10 <sup>4</sup>	1,368·10 <sup>4</sup>	1,701·10 <sup>4</sup>	1,973·10 <sup>8</sup>
Nuklid 5:					
Leistung p <sub>5</sub>	[ kW ]	7,043·10 <sup>-4</sup>	9,342·10 <sup>-4</sup>	8,242·10 <sup>-4</sup>	-
Halbwertszeit t <sub>1/2, 5</sub>	[ a ]	7,997·10 <sup>5</sup>	7,607·10 <sup>5</sup>	1,090·10 <sup>6</sup>	

Die einzulagernden Behälter weisen zum Zeitpunkt ihrer Einlagerung bereits eine erhöhte Ausgangstemperatur auf. In den Berechnungen wird angenommen, dass die Ausgangstemperatur 70 °C beträgt. Diese Temperatur ist geringer als die in /DBE 89/ genannte Maximaltemperatur von 82 °C für ein Versandstück vom Typ B (U) ohne direkte Sonneneinstrahlung unter normalen Beförderungsbedingungen. Ebenso wird in /GNB 98/ mit 91 °C maximaler Außentemperatur ein höherer Wert angegeben, der jedoch für einen Behälter mit einer Nachzerfallsleistung von 8 kW unter Konvektionsbedingungen bestimmt wurde. Die Größe dieser Ausgangstemperatur hat auf die einzelnen Temperaturmaxima, insbesondere auf die zeitlich späten Maxima, keinen Einfluss.

## B.2 Stoffgleichungen und Materialparameter des thermischen Materialverhaltens

Von den in Abb. 2.2 und Abb. 2.3 dargestellten Homogenbereichen werden das Hauptsalz z2HS1 bis z2HS3, das Kaliflöz Staßfurt z2SF, der Hauptanhydrit z3HA sowie als gemeinsamer Bereich die weiteren Einheiten der Zechsteinfoolge z3 und der Zechsteinfoolge z4 berücksichtigt. Ebenso wird das Deckgebirge mit seinen einzelnen Schichten hier nur als ein homogener Bereich betrachtet. Zusätzlich zu den Gesteinen sind die

Materialien zu betrachten, die mit der Einlagerung des Abfalls zusammenhängen. Das sind der Abfall selbst, die Behältermaterialien, das Verfüllmaterial sowie im Fall der Bohrlochlagerung die Bohrlochverrohrung. Als Behältermaterial wird das Behältermaterial selbst sowie eine Moderatorplatte und bei dem POLLUX<sup>®</sup>-Behälter eine Moderatorzone in radialer Richtung betrachtet.

Der Energietransport wird allein durch die Wärmeleitung beschrieben. Dabei wird von einem isotropen Materialverhalten aller Materialgruppen ausgegangen. Der advective Transport und die Wärmestrahlung, wie sie im Behälter oder in porösem Versatzmaterial auftreten können, sind insoweit berücksichtigt, wie diese Prozesse bei der Bestimmung der Materialparameter mit erfasst worden sind.

$$\rho(\underline{x}, \eta) c_p(\underline{x}, T, \eta) \frac{\partial T(\underline{x}, t)}{\partial t} = \nabla \left( \lambda(\underline{x}, T, \eta) \nabla T(\underline{x}, t) \right) + \dot{q}(\underline{x}, t) \quad (\text{B.2})$$

mit

$c_p$	:	massespezifische Wärmekapazität
$\dot{q}$	:	volumenspezifischer Wärmestrom des Abfalls
$t$	:	Zeit
$\underline{x}$	:	Ortsvektor
$T$	:	Temperatur
$\lambda$	:	Wärmeleitfähigkeit
$\eta$	:	Porosität
$\rho$	:	Materialdichte
$\nabla$	:	Nabla-Operator

Die Materialparameter in Gleichung (B.2) sind die Wärmeleitfähigkeit und die spezifische Wärmekapazität. Beide Parameter sind von der Temperatur und – durch die unterschiedlichen Homogenbereiche – vom Ort abhängig. Zusätzlich besteht bei dem kompaktionsfähigen Salzgrus, der bei der Variante B1 als Versatzmaterial in der Einlagerungsstrecke verwendet wird, auch eine Porositätsabhängigkeit. Die Stoffgleichungen mit ihren Materialparametern für die Wärmeleitfähigkeit und die Wärmekapazität sind zusammen mit der Dichte für die einzelnen Materialbereiche in Tab. B.4 aufgelistet. In Abb. 2.2 und Abb. 2.3 ist die Verteilung des Quartärs und Tertiärs im Deckgebirge dargestellt. Wird das Deckgebirge in Berechnungsvarianten mit berücksichtigt, werden Quartär und Tertiär in einem Materialbereich zusammengefasst. Für dieses homogenisierte Deckgebirge werden deren Mittelwerte als Parameter verwendet. Salzgrus wird mit einer Anfangsporosität von 35 % angesetzt /KIL 12/. In einem aus numerischen Gründen vereinfachten Modell des POLLUX<sup>®</sup>-Behälters werden die Moderatorbereiche zusammen mit dem eigentlichen Behälter modelliert. Vergleichsbe-

rechnungen haben gezeigt, dass die für diese Variante in Tab. B.4 angegebene Wärmeleitfähigkeit eine gute Näherung für das detailliertere Modell ist.

**Tab. B.4** Thermische Eigenschaften der verwendeten Materialien

Material	Dichte [kg/m <sup>3</sup> ]	Wärmeleitfähigkeit $\lambda$ [W/(kg·K)]	Massespez. Wärme- kapazität $c_p$ [J/(kg·K)]
Deckgebirge /BGR 00/	2.200	$\lambda_{SF} = 2,2 \frac{W}{kg \cdot K}$	$c_{p,SF} = 864 \frac{J}{kg \cdot K}$
Steinsalz und Haupt- anhydrit /BGR 00/	2.200	$\lambda_{RS} = \frac{\lambda_{0,RS}}{1 + c_{T,RS} \cdot \vartheta}$ mit $c_{T,RS}$ : Temperaturparam. $c_{T,RS} = 0,0045 \frac{1}{K}$ $\lambda_{0,RS}$ : Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{0,RS} = 6,1 \frac{W}{kg \cdot K}$ $\vartheta$ : Temperatur [°C]	$c_{p,RS} = 864 \frac{J}{kg \cdot K}$
Kaliflöz Staßfurt /BGR 00/	2.200	$\lambda_{SF} = 1,5 \frac{W}{kg \cdot K}$	$c_{p,SF} = 903 \frac{J}{kg \cdot K}$
Salzgrus, trocken /WIE 12/	1.430 – 2.200	$\lambda_{CS} = \left(1 - \frac{\eta}{\eta_0}\right)^m \lambda_{RS} + \frac{\eta}{\eta_0} \lambda_G$ mit $m$ : Funktionsparameter $m = 1,14$ $\eta$ : aktuelle Porosität $\eta_0$ : Anfangsporosität $\eta_0 = 0,35$ $\lambda_G$ : Anfangswärmeleitfkt. $\lambda_G = \lambda_{0,CS} + c_{T,CS} \cdot \vartheta$ $\lambda_{0,CS} = 0,42 \frac{W}{kg \cdot K}$ $c_{T,CS} = 0,0027 \frac{W}{kg \cdot K^2}$	$c_{p,CS} = c_{p,RS} (1 - \eta)$
Sand	1.700	$\lambda_{Sa} = 0,4 \frac{W}{kg \cdot K}$	$c_{p,Sa} = 850 \frac{J}{kg \cdot K}$
Behältermaterial /GNB 98/ und Ver- rohrung	7.000	$\lambda_{Ca} = 40 \frac{W}{kg \cdot K}$	$c_{p,Ca} = 515 \frac{J}{kg \cdot K}$
Moderatorplatte /GNB 98/	6.500	$\lambda_{MP} = 5,9 \frac{W}{kg \cdot K}$	$c_{p,MP} = 320 \frac{J}{kg \cdot K}$
Moderatorzone POLLUX® /GNB 98/	4.200	$\lambda_{MZ} = 13 \frac{W}{kg \cdot K}$	$c_{p,MZ} = 515 \frac{J}{kg \cdot K}$
Abfall und Var. Voll- modell (POLLUX®)	7.800	$\lambda_{Wa} = 40 \frac{W}{kg \cdot K}$	$c_{p,Wa} = 500 \frac{J}{kg \cdot K}$

Material	Dichte [kg/m <sup>3</sup> ]	Wärmeleitfähigkeit $\lambda$ [W/(kg·K)]	Massespez. Wärmekapazität $c_p$ [J/(kg·K)]
Var. Vereinfachtes Modell (POLLUX <sup>®</sup> -Behälter und Moderator)	7.000	$\lambda_{CM} = 29 \frac{W}{kg \cdot K}$	$c_{p,CM} = 515 \frac{J}{kg \cdot K}$

### B.3 Stoffgleichungen und Materialparameter des mechanischen Materialverhaltens

Die in den Berechnungen zu berücksichtigenden Materialien sind das Hauptsalz z2HS1 bis z2HS3, das Kaliflöz Staßfurt z2SF, der Hauptanhydrit z3HA sowie als homogenisierter Bereich die weiteren Einheiten der Zechsteinfoolge z3 und der Zechsteinfoolge z4. Das Deckgebirge wird ebenso nur als ein gemeinsamer homogener Bereich betrachtet. Zusätzlich zu diesen Gesteinen sind der Abfall, das Behältermaterial, eine Moderatorplatte im Kopf- bzw. Fußbereich sowie eine Moderatorzone in radialer Richtung und Salzgrus als Verfüllmaterial der Strecke zu berücksichtigen.

Die theoretischen Grundlagen zur Beschreibung des mechanischen Verhaltens werden in /ITA 06/ beschrieben. Der Ansatzpunkt für das in diesem Kapitel enthaltene Materialverhalten ist die additive Zerlegung der Rate des Verzerrungstensors.

$$\underline{\dot{\underline{\epsilon}}}(T, \hat{\sigma}, \sigma_0, \eta) = \underline{\dot{\underline{\epsilon}}}_{el}(\eta) + \underline{\dot{\underline{\epsilon}}}_{vpl}(T, \hat{\sigma}, \sigma_0, \eta) + \underline{\dot{\underline{\epsilon}}}_{th}(T) \quad (B.3)$$

mit

$\underline{\dot{\underline{\epsilon}}}(T, \hat{\sigma}, \sigma_0, \eta)$ : Rate des totalen Verzerrungstensors

$\underline{\dot{\underline{\epsilon}}}_{el}(\eta)$ : Rate des elastischen Anteils des Verzerrungstensors

$\underline{\dot{\underline{\epsilon}}}_{vpl}(T, \hat{\sigma}, \sigma_0, \eta)$ : Rate des viskoplastischen Anteils des Verzerrungstensors

$\underline{\dot{\underline{\epsilon}}}_{th}(T)$ : Rate des thermischen Anteils des Verzerrungstensors

$T$ : Temperatur

$\hat{\sigma}$ : von Mises-Vergleichsspannung

$\sigma_0$ : mittlere Spannung

$\eta$ : Porosität

Das Materialverhalten wird als schädigungsfrei, bereichsweise homogen und isotrop beschrieben. Eine mögliche thermo-mechanisch induzierte Schädigung (Rissbildung) wirkt sich im Rahmen der hier behandelten Fragestellung nicht aus; Art und Umfang von Schädigungen werden im Rahmen der Integritätsanalyse in AP 9 des Vorhabens

VSG betrachtet. Der thermische Anteil resultiert aus der thermomechanischen Kopp-  
lung. Die Materialparameter dazu werden in Kapitel 2.6.3 angegeben.

Rein elastisches Materialverhalten wird für das Deckgebirge, den Hauptanhydrit und die technischen Materialien angesetzt. Die übrigen geologischen Gesteine werden als elastisch-viskoplastisches Material beschrieben. Salzgrus ist ein granulares Medium mit Steinsalzkörnern und weist ein kompaktionsfähiges elastisch-viskoplastisches Verhalten auf. Die Materialgleichungen für die einzelnen Bereiche sind zusammen mit ihren Parametern in Tab. B.5 zusammengefasst. Der elastische Anteil wird als linear-elastisch mit konstanten Materialparametern beschrieben, weshalb in Tab. B.5 ausschließlich die Parameterwerte angegeben werden. Nur zwei der vier möglichen Elastizitätsparameter sind unabhängig, daher beschränkt sich die Angabe auf den Elastizitätsmodul und die Querkontraktionszahl. Da keine behälterspezifische mechanische Auslegung erforderlich ist, werden der Behälter und die darin enthaltenen Stoffe aus mechanischer Sicht als ein Material behandelt. Als Behältermaterial ist Grauguss GGG 40 vorgesehen /GNB 98/. Eine Ausnahme bei der Beschreibung des elastischen Verhaltens bildet Salzgrus mit seinen porositätsabhängigen Modulen. Die in Tab. B.5 enthaltene Gleichung beschreibt einen kontinuierlichen Übergang zwischen einem anfänglich sehr weichen Material und bis zu einem steifen Materialverhalten analog des festen Steinsalzes nach vollständiger Kompaktion.

Das viskoplastische Verhalten von Kali- und Steinsalzen wird allein auf der Basis des stationären Kriechens modelliert. Für die hier betrachtete Aufgabenstellung stellt das eine konservative Annahme dar, da der zusätzliche (beschleunigte) Deformationsanteil aus dem transienten mechanischen Verhalten zu einer stärkeren Kompaktion des Salzgruses führt und damit zu günstigeren thermischen Bedingungen.

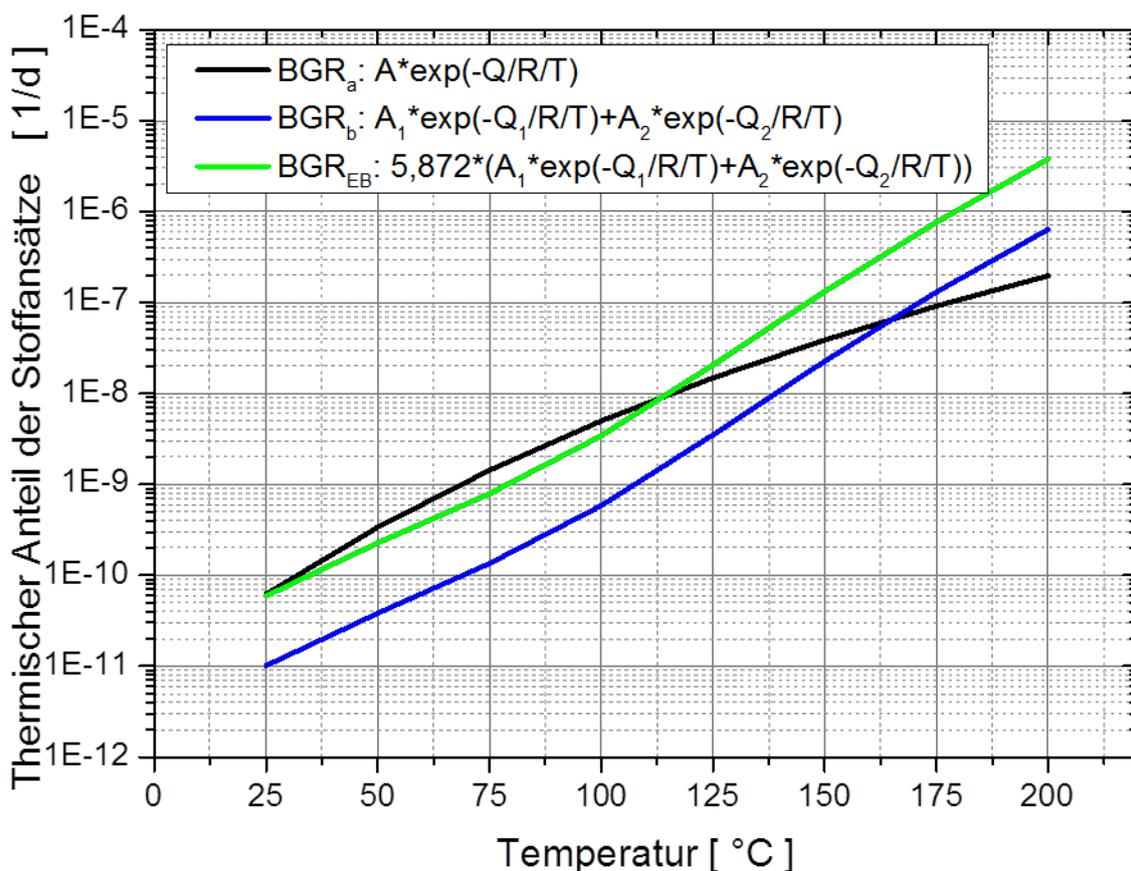
**Tab. B.5** Mechanische Eigenschaften der verwendeten Materialien

Material	Elastisches Verhalten Elastizitätsmodul E [GPa] Querkontraktionszahl $\nu$ [-]	Viskoplastisches Verhalten
Deckgebirge /BGR 03b/	$E_{DG} = 0,3 \text{ GPa}$ $\nu_{DG} = 0,33$	–
Steinsalz z2 /BGR 03b/	$E_{RS} = 25 \text{ GPa.}$ $\nu_{RS} = 0,27$	$\hat{\epsilon}_{RS,z2}^{vpl} = V_K A_0 \left( A_1 e^{-\frac{Q_1}{RT}} + A_2 e^{-\frac{Q_2}{RT}} \right) \left( \frac{\hat{\sigma}}{\bar{\sigma}} \right)^n$ <p>mit  <math>V_K</math> : Kriechklassenanpassung  <math>A_0</math> : Multiplikator  <math>A_0 = 5,872</math>  <math>A_1, A_2</math> : Strukturfaktoren  <math>A_1 = 2,3 \cdot 10^{-4} \text{ 1/d}</math>  <math>A_2 = 2,1 \cdot 10^6 \text{ 1/d}</math>  <math>Q_1, Q_2</math> : Aktivierungsenergien  <math>Q_1 = 42 \text{ kJ/mol}</math>  <math>Q_2 = 113,4 \text{ kJ/mol}</math>  <math>R</math> : Universelle Gaskonstante  <math>R = 8,314 \text{ J/(mol} \cdot \text{K)}</math>  <math>T</math> : Absolute Temperatur  <math>n</math> : Spannungsexponent  <math>n = 5</math>  <math>\hat{\sigma}</math> : von Mises-Vergleichsspannung  <math>\bar{\sigma}</math> : Bezugsspannung  <math>\bar{\sigma} = 1 \text{ MPa}</math></p>
Steinsalz z3 /BGR 03b/	$E_{RS} = 25 \text{ GPa.}$ $\nu_{RS} = 0,27$	$\hat{\epsilon}_{RS,z3}^{vpl} = V_K A e^{-\frac{Q}{RT}} \left( \frac{\hat{\sigma}}{\bar{\sigma}} \right)^n$ <p>mit  <math>A</math> : Strukturfaktoren  <math>A = 0,18 \text{ 1/d}</math>  <math>Q</math> : Aktivierungsenergien  <math>Q = 54 \text{ kJ/mol}</math></p>
Kaliflöz Staßfurt /BGR 03b/	$E_{SF} = 16 \text{ GPa.}$ $\nu_{SF} = 0,27$	$\hat{\epsilon}_{SF}^{vpl} = A e^{-\frac{Q}{RT}} \left( \frac{\hat{\sigma}}{\bar{\sigma}} \right)^n + C \left( \frac{\hat{\sigma}}{\bar{\sigma}} \right)^m$ <p>mit  <math>C</math> : Strukturfaktoren  <math>C = 1,976 \cdot 10^{-7} \text{ 1/d}</math>  <math>m</math> : Spannungsexponent  <math>m = 2</math></p>
Hauptanhydrit	$E_{HA} = 30 \text{ GPa.}$ $\nu_{HA} = 0,23$	–
Salzgrus, trocken /WIE 12/	$E_{CS}(\eta) = E_{CS,f} e^{-c_E \frac{\eta}{1-\eta_0}}$ <p>mit  <math>E_{CS,f}</math> : E-Modul bei voll-  ständigiger Kompaktion  <math>E_{CS,f} = E_{RS}</math>  <math>c_E</math> : Materialparameter</p>	$\dot{\epsilon}_{0,CS}^{vpl} = A_0 e^{-\frac{Q}{RT}} \frac{e^{B_2 \rho}}{\rho} \left( 1 - e^{-(B_3 + B_4 \sigma_0) \sigma_0} \right)$ <p>mit  <math>A_0</math> : Strukturfaktoren  <math>A_0 = 1,909 \cdot 10^{13} \text{ 1/d}</math>  <math>B_{2..4}</math> : Materialparameter  <math>B_2 = -19,5 \cdot 10^3 \text{ m}^3/\text{kg}</math></p>

Material	Elastisches Verhalten Elastizitätsmodul E [GPa] Querkontraktionszahl $\nu$ [-]	Viskoplastisches Verhalten
	$c_E = \frac{\eta_0 - 1}{\eta_0} \ln \left( \frac{E_{CS,0}}{E_{CS,f}} \right)$ $E_{CS,0}$ : Anfangs-E-Modul $E_{CS,0} = 1 \text{ MPa}$ $\eta$ : aktuelle Porosität $\eta_0$ : Anfangsporosität $\eta_0 = 0,35$ $\nu_{CS} = 0,27$	$B_3 = 0,833 \text{ 1/MPa}$ $B_4 = 18,2 \cdot 10^{-3} \text{ 1/MPa}^2$ $\hat{\varepsilon}_{CS}^{vpl} = (1 - \eta) A e^{-\frac{Q}{RT}} \left( \frac{\hat{\sigma}}{\bar{\sigma}} \right)^n$
Behältermaterial, Moderatorplatte, Moderatorzone, Abfall	$E_{Ca} = 150 \text{ GPa.}$ $\nu_{Ca} = 0,25$	-
Steinsalz z3 /BGR 03b/	$E_{RS} = 25 \text{ GPa.}$ $\nu_{RS} = 0,27$	$\hat{\varepsilon}_{RS,z3}^{vpl} = V_K A e^{-\frac{Q}{RT}} \left( \frac{\hat{\sigma}}{\bar{\sigma}} \right)^n$ mit A : Strukturfaktoren $A = 0,18 \text{ 1/d}$ Q : Aktivierungsenergien $Q = 54 \text{ kJ/mol}$
Kaliflöz Staßfurt /BGR 03b/	$E_{SF} = 16 \text{ GPa.}$ $\nu_{SF} = 0,27$	$\hat{\varepsilon}_{SF}^{vpl} = A e^{-\frac{Q}{RT}} \left( \frac{\hat{\sigma}}{\bar{\sigma}} \right)^n + C \left( \frac{\hat{\sigma}}{\bar{\sigma}} \right)^m$ mit C : Strukturfaktoren $C = 1,976 \cdot 10^{-7} \text{ 1/d}$ m : Spannungsexponent $m = 2$
Hauptanhydrit	$E_{HA} = 30 \text{ GPa.}$ $\nu_{HA} = 0,23$	-
Salzgrus, trocken /WIE 12/	$E_{CS}(\eta) = E_{CS,f} e^{-c_E \frac{\eta}{1-\eta_0}}$ mit $E_{CS,f}$ : E-Modul bei voll- ständiger Kompaktion $E_{CS,f} = E_{RS}$ $c_E$ : Materialparameter $c_E = \frac{\eta_0 - 1}{\eta_0} \ln \left( \frac{E_{CS,0}}{E_{CS,f}} \right)$ $E_{CS,0}$ : Anfangs-E-Modul $E_{CS,0} = 1 \text{ MPa}$ $\eta$ : aktuelle Porosität $\eta_0$ : Anfangsporosität $\eta_0 = 0,35$ $\nu_{CS} = 0,27$	$\dot{\varepsilon}_{0,CS}^{vpl} = A_0 e^{-\frac{Q}{RT}} \frac{e^{B_2 \rho}}{\rho} (1 - e^{-(B_3 + B_4 \sigma_0) \sigma_0})$ mit $A_0$ : Strukturfaktoren $A_0 = 1,909 \cdot 10^{13} \text{ 1/d}$ $B_{2..4}$ : Materialparameter $B_2 = -19,5 \cdot 10^3 \text{ m}^3/\text{kg}$ $B_3 = 0,833 \text{ 1/MPa}$ $B_4 = 18,2 \cdot 10^{-3} \text{ 1/MPa}^2$ $\hat{\varepsilon}_{CS}^{vpl} = (1 - \eta) A e^{-\frac{Q}{RT}} \left( \frac{\hat{\sigma}}{\bar{\sigma}} \right)^n$
Behältermaterial, Moderatorplatte, Moderatorzone, Abfall	$E_{Ca} = 150 \text{ GPa.}$ $\nu_{Ca} = 0,25$	-

Zur Beschreibung des viskoplastischen Verhaltens der geologischen Materialien wird für das Steinsalz des z3 der mit  $BGR_a$  bezeichnete Stoffansatz verwendet, für den Einlagerungsbereich mit dem Steinsalz des z2 der mit  $BGR_{EB1}$  bezeichnete Stoffansatz /BGR 03b/. Der Stoffansatz  $BGR_{EB1}$  berücksichtigt gegenüber dem Ansatz  $BGR_b$  einen Multiplikator von 5,872. Auf die zusätzliche Möglichkeit, die Kriechfähigkeit unterschiedlicher Steinsalze mittels des Vorfaktors  $V_K$  anzupassen, wird weiter unten noch eingegangen.

Die Stoffansätze  $BGR_b$  bzw.  $BGR_{EB1}$  verwenden eine erweiterte Formulierung zur Beschreibung des Temperaturverhaltens gegenüber  $BGR_a$ , indem der einfache Arrhenius-term in  $BGR_a$  nun aus zwei Summanden besteht. In Abb. B.2 ist dieser temperaturabhängige Anteil der drei Stoffansätze dargestellt. Im Vergleich zwischen  $BGR_{EB1}$  und  $BGR_a$  macht sich der Einfluss im thermischen Verhalten erst bei Temperaturen von über 125 °C bemerkbar.



**Abb. B.2** Temperaturabhängiger Anteil an der stationären Kriechrate der Stoffansätze  $BGR_a$ ,  $BGR_b$  und  $BGR_{EB1}$

Mit dem Faktor  $V_K$  erfolgt die Anpassung des Stoffmodells an das spezifische Verhalten in einem Homogenbereich. Der Faktor  $V_K$  errechnet sich aus der Kriechklasse  $K$  als Vielfaches von 2:  $V_K = 2^K / 2^5$ . Die in den Berechnungen verwendeten Kriechklassen sind in Tab. B.6 angegeben. Gegenüber der separaten Modellierung der stratigrafischen Einheiten des z3 und des z4 in /BGR 03b/ stellt die hier verwendete Zusammenfassung dieser Einheiten eine stärkere Vereinfachung dar. Auf Grund der unberücksichtigten Zerblockung des Hauptanhydrits und seiner deformationsabschirmenden Wirkung gegenüber dem z3 und dem z4 stellt diese Zusammenfassung der Einheiten eine vertretbare Vereinfachung dar.

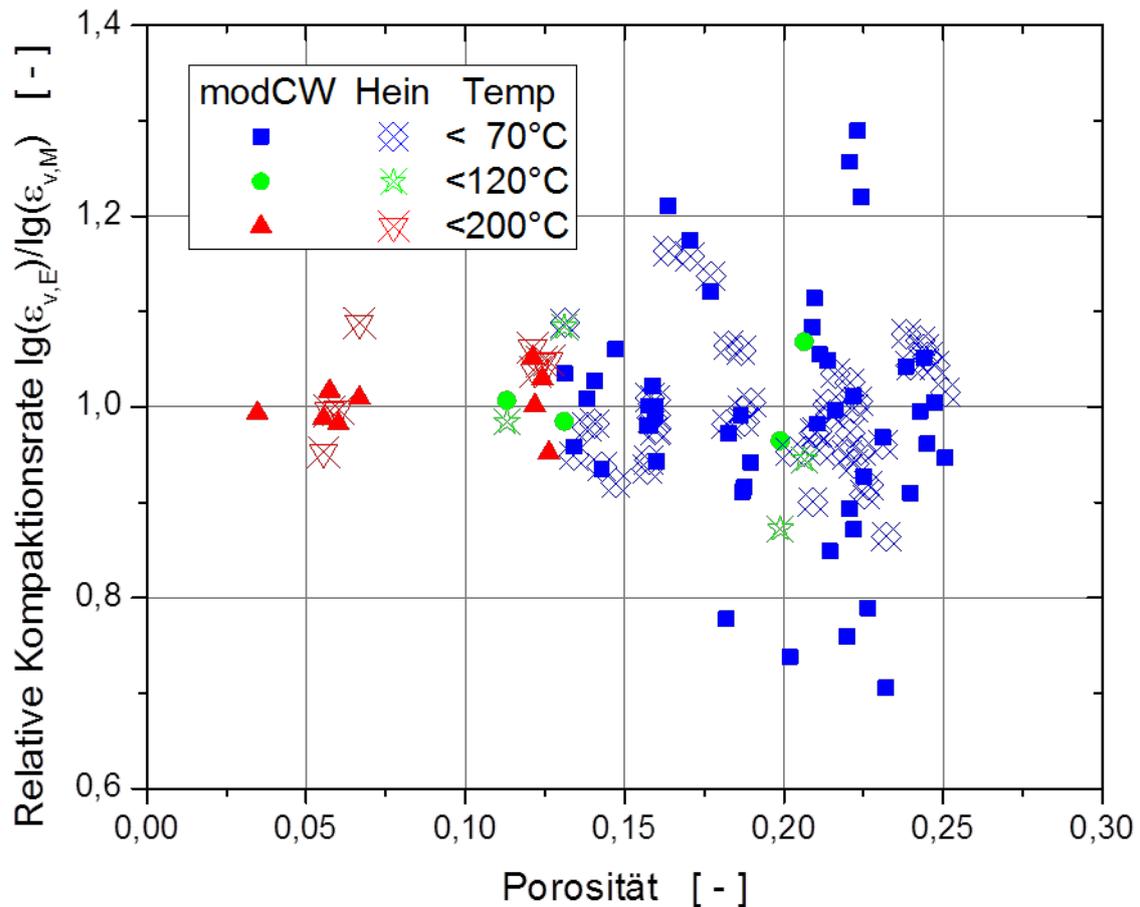
**Tab. B.6** Verwendete Kriechklassen

Homogenbereich	Symbol	Verwendete Kriechklasse	Bandbreite der Kriechklasse <sup>1)</sup>		Stoffmodell
			Max.	Min.	
Hauptsalz	z2HS1, z2HS2	6	7	5	BGR <sub>EB1</sub>
Hauptsalz	z2HS3	2	3	1	BGR <sub>EB1</sub>
Kaliflöz Staßfurt	z2SF		-	-	BGR <sub>SF</sub>
Zechstein 3	z3	3	6 <sup>2)</sup>	2	BGR <sub>a</sub>

<sup>1)</sup> aus /BGR 03b/

<sup>2)</sup> Unter Berücksichtigung des Liniensalzes z3LS

In dem verwendeten Programmcode FLAC<sup>3D</sup> ist zur Beschreibung eines kompaktionsfähigen elastisch-viskoplastischen Materialverhaltens, hier das von Salzgrus, der Stoffansatz CWIPP implementiert /ITA 06/. Dieser Ansatz beschreibt das Kompaktionsverhalten allein abhängig vom hydrostatischen Spannungszustand. Ein im Spannungsverhalten vollständigerer Ansatz, der im Zusammenhang mit dem BAMBUS-Projekt verwendet wurde, ist das Hein'sche Modell /DRO 01/. In /DRO 01/ ist gezeigt worden, dass bei entsprechender Anpassung der Stoffmodellparameter auch ein rein hydrostatischer Modellansatz das Kompaktionsverhalten unter Endlagerbedingungen realistisch darstellen kann. In Abb. B.3 ist die Anpassung des modifizierten CWIPP-Modells an die experimentellen Daten aus /KOR 96/ dargestellt. Zum Vergleich ist die mit dem Hein'schen Modell im BAMBUS II-Projekt, /BEC 04/, vorgenommene Anpassung mit enthalten. Mit Beschränkung auf die thermische Auslegung in der hier vorliegenden Arbeit wird daher der numerisch effizientere Stoffansatz CWIPP in modifizierter Form verwendet.



**Abb. B.3** Vergleich der Kompaktionsrate aus Messung und Identifikation für das modifizierte Stoffansätze CWIPP und das Hein'sche Modell /BEC 04/

#### **B.4 Berechnungsmodelle zur thermischen Auslagung der Streckenlagerung – Variante B1**

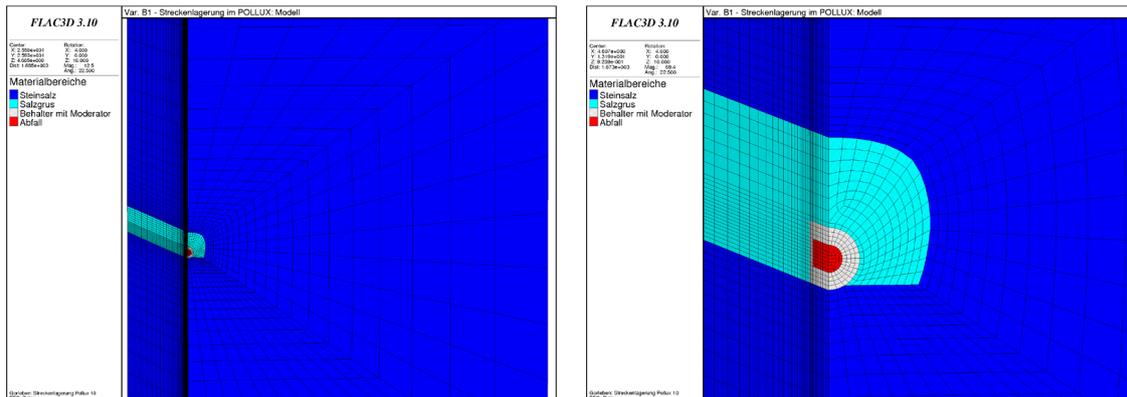
##### **B1M1 – Einzelbehälter: Einlagerung eines einzelnen Behälters**

Das Modell B1M1 ist insofern eine Abbildung des Endlagers, wie die Bedingungen am Standort mit übertragen werden. Eine derart isolierte Lage eines einzelnen Behälters findet sich nicht in einem realen Endlager. Dieses Modell dient der Untersuchung von Einzeleffekten insbesondere aber auch der Bestimmung der minimalen Zwischenlagerzeit.

Mit der Simulation der Einlagerung eines einzelnen Behälters in der Variante B1M1 wird die kürzestmögliche Zwischenlagerzeit für den jeweiligen Abfalltyp unter Einhaltung der Auslegungstemperaturen bestimmt. Eine weitere Verkürzung der Zwischenla-

gerzeit erfordert eine Konzeptänderung z. B. durch verringerte Behälterbeladung, modifizierte Behälter oder verbesserten Wärmeabtransport in das Wirtsgestein.

In Abb. B.4 ist die Diskretisierung des Modells dargestellt. Die Profilabmessungen der Einlagerungsstrecke entsprechen den Angaben in /BOL 11/: Die Streckenbreite auf der Sohle beträgt 4,5 m, die Stoßwölbung 0,3 m und die Firsthöhe 3,69 m. Das Gleisbett bleibt bei der Modellbildung unberücksichtigt.



**Abb. B.4** Modell B1M1, Korb für DWR- bzw. SWR-Brennstäbe

In allen Berechnungsvarianten dieses Modells wurde nur ein Viertel des gesamten Behälters betrachtet, d. h., es wird kein Unterschied zwischen Behälterkopf- und -fußbereich vorgenommen. Die äußeren Abmessungen des POLLUX<sup>®</sup>-Behälters bleiben bei den hier betrachteten Abfalltypen unverändert. Der Außendurchmesser des Behälters wird mit 1,56 m modelliert, die Behälterlänge mit 5,52 m. Anpassungen ergeben sich beim Durchmesser und der Länge (D x L) des innen liegenden Abfalls: DWR und SWR 0,69 m x 4,4 m, WWER 0,69 m x 3,22 m, CSD-V 0,93 m x 3,81 m. Zur besseren Ablage des Behälters auf der Streckensohle, insbesondere aber zur besseren thermischen Anbindung an das Wirtsgestein wird ein Behälterbett mit der Breite von 0,8 m angesetzt. Ohne so ein Behälterbett stellt sich eine um 10 K bis 15 K höhere Maximaltemperatur ein. Bergmännisch ist dieses Bett bei der Erstellung des Einlagerungsortes aus der Sohle auszufräsen. Mit einer Breite von 800 mm passt das Bett in den Gleisstrang der 1435 mm Normalspur. Das Modellgebiet ist so groß gewählt, dass innerhalb des Simulationszeitraums nur eine geringe Temperaturerhöhung auf den äußeren Modellrändern auftritt. Das Temperaturmaximum tritt bei der Einlagerung eines einzelnen Behälters innerhalb des ersten Jahres auf; der Simulationszeitraum für die Aufheizphase ist mit ca. drei Jahren ausreichend lang gewählt. Der thermischen Phase ist eine Vorlaufphase von drei Monaten vorgeschaltet, in der sich im Anschluss an die

Streckenauffahrung eine Phase mit freier Gebirgskonvergenz anschließt und in der bereits eine Spannungsumlagerung erfolgt. Nach Abb. 2.2 sind die Einlagerungsstrecken in den beiden älteren stratigraphischen Einheiten des Hauptsalzes z2HS1 und z2HS2 angeordnet. Die diesem und den übrigen Materialien entsprechenden thermischen und mechanischen Stoffansätze sind mit ihren Parametern sowie den thermischen und mechanischen Anfangsbedingungen in den Anhängen B.2 und B.3 sowie Kapitel 2.6.3 beschrieben.

Es werden die üblichen Randbedingungen verwendet: Symmetrierandbedingungen auf der Behälterquerschnitts- und -längsschnittfläche, thermisch adiabate Randbedingungen auf den Außenflächen, auf den Außenflächen mit Verschiebungsrandbedingung fixierte Normalverschiebungen und reibungsfreie Tangentialverschiebungen, auf der oberen Außenfläche Spannungsrandbedingungen mit einer dem Teufendruck entsprechenden Auflast und spannungsfrei in den übrigen Richtungen.

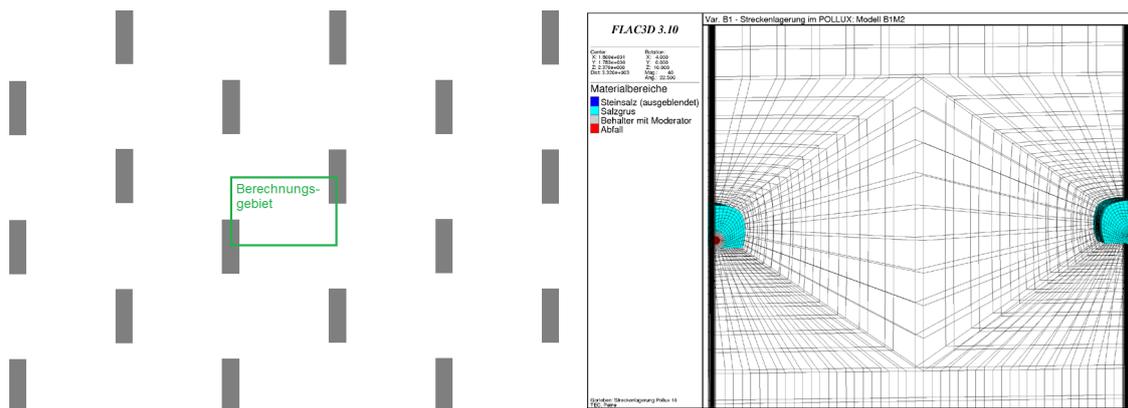
### **B1M2 – Elementarzelle: Feld mit sehr großer Ausdehnung in der Feldbreite und Streckenlänge**

Das Modell B1M2 ist dadurch charakterisiert, dass die Wärme nur in vertikaler Richtung abgeführt werden kann. Diese Bedingung trifft auf Einlagerungsfelder mit sehr langen Einlagerungsstrecken und einer großen Anzahl an Einlagerungsstrecken zu. Ob sich diese Bedingungen in der tatsächlich realisierten Endlagerauslegung wiederfinden, kann erst mit Modellen festgestellt werden, die den horizontalen Wärmeabfluss mit beinhalten. In Abb. 3.4 und in Abb. B.5 ist das Berechnungsmodell schematisch dargestellt.

Werden mehrere Behälter mit der minimalen Zwischenlagerzeit entsprechend dem Modell B1M1 eingelagert, sind unverhältnismäßig große Abstände zwischen den Behältern und zwischen den Strecken erforderlich, um die Auslegungstemperaturen einzuhalten. Die Variante B1M2 ist eine Modifikation der Variante B1M1, in der die äußeren seitlichen Symmetrieränder auf das in /BOL 11/ angegebene Maß herangeführt werden. Mit diesen nahen Rändern wird ein horizontal beliebig großes Feld mit dem Einlagerungsraster aus Behälter- und Streckenabstand simuliert, Abb. B.5.

Der wesentliche Unterschied zwischen B1M1 und B1M2 besteht aus Sicht der Modellbildung in den räumlich nahen Rändern der Variante B1M2. Die verwendeten Strecken- und Behälterabstände ( $S \times B$ ) entsprechen den Angaben in AP 5 /BOL 11/: Bei

mit Brennstäben beladenen Endlagerbehältern 36 m x 2,63 m und bei den mit CSD-V beladenen Behältern 21 m x 5,5 m. Bei Anordnung der Behälter in benachbarten Strecken wird von der dichtesten Packung ausgegangen, das ist eine hexagonale Anordnung der Behälter, Abb. B.5. Als Folge der Anordnung ist ein Modell erforderlich, bei dem sich ein zweiter Behälter in einer zweiten Strecke am gegenüberliegenden Rand befindet. Angemerkt sei, dass der Einfluss aus der hexagonalen Anordnung bei dem hier verwendeten Verhältnis von Behälter- zu Streckenabstand sehr gering ist.



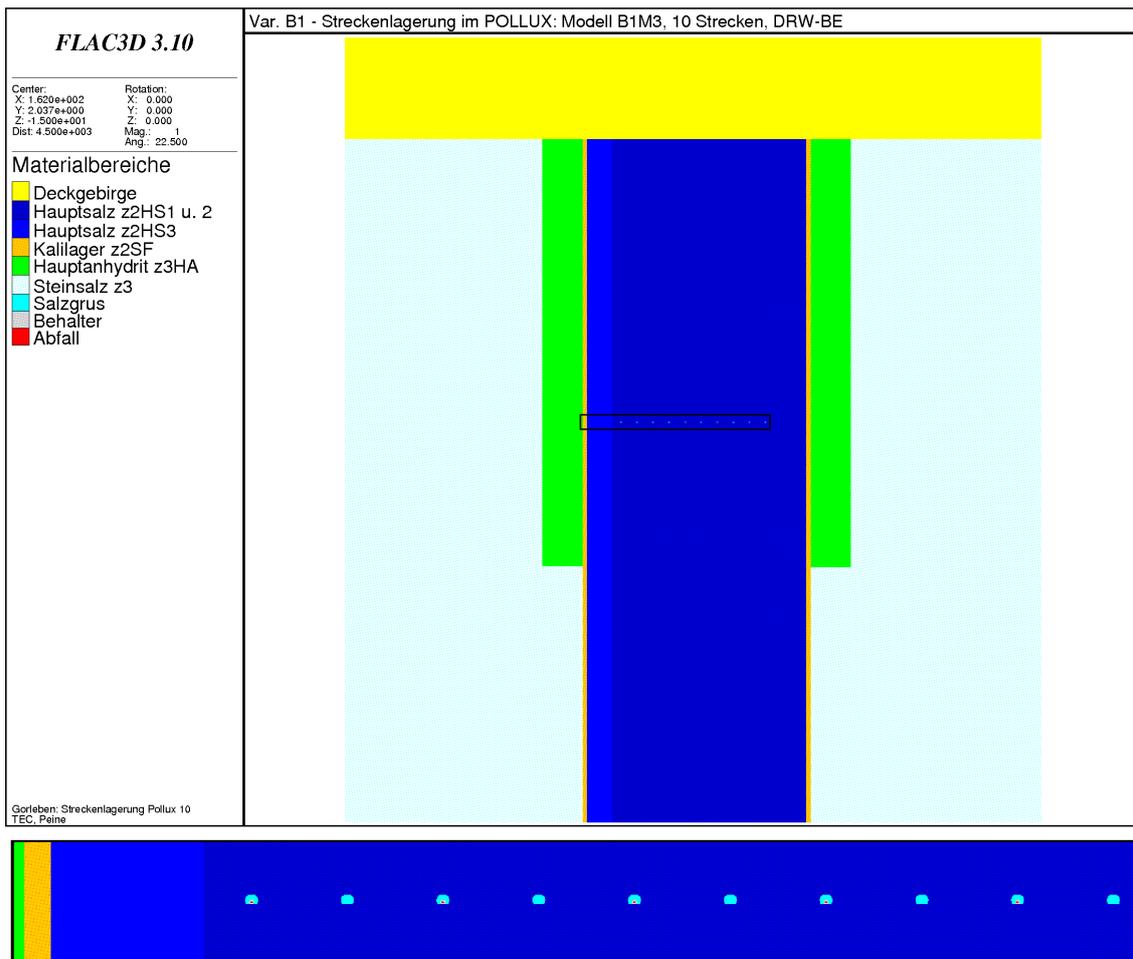
**Abb. B.5** Elementarzelle – B1M2, Modellgebiet und Diskretisierung

Die Stoffansätze mit ihren Parametern und die Anfangsbedingungen entsprechen denen des Modells B1M1. Alle seitlichen Ränder sind als Symmetrierand ausgeführt, für den oberen und unteren Rand gelten die Bedingungen wie unter B1M1 beschrieben. Vorlaufende Berechnungen haben gezeigt, dass durch die nahen Ränder in axialer Richtung das erste Temperaturmaximum auf einem höheren Niveau und zeitlich etwas ausgedehnter eintritt. Insbesondere ergibt sich jedoch durch die Aufheizung des Gebirgsbereichs zwischen den beiden Strecken eine gegenseitige Beeinflussung der Temperaturfelder, und es kann ein weiteres Temperaturmaximum zu einem sehr viel späteren Zeitpunkt auftreten. Bei den mit Brennelementen beladenen Behältern, Streckenabstand 36 m, stellt sich das Temperaturmaximum nach ca. 30 Jahren ein, bei den mit CSD-V beladenen Behältern, Streckenabstand 21 m, nach ca. 25 Jahren. Der Simulationszeitraum wurde bei dieser Modellvariante zu 100 Jahre gewählt. Wie im vorangegangenen Modell ist der Aufheizphase eine dreimonatige Phase der Spannungumlagerung vorgeschaltet. Ob das erste oder das zweite Temperaturmaximum auslegungsbestimmend ist, hängt von den verwendeten Modellgrößen ab.

### **B1M3 – Endliche Feldbreite: Feld mit endlicher Streckenanzahl bei sehr großer Streckenlänge**

Das konzipierte Grubengebäude, Abb. 3.17, weist eine axiale Erstreckung von ca. 4 km auf, in der Breite jedoch nur eine Erstreckung von ca. 400 m bis 600 m. Bei der Einlagerung in schmalen Feldern wirkt sich auch in der Feldmitte noch die Wärmeableitung hin zu den seitlichen Rändern aus. Dieser Effekt wird in den Berechnungen der Variante B1M3 berücksichtigt. Das Modell B1M3 repräsentiert die Teile des Endlagers, in denen mehrere möglichst gleichartige Felder hintereinander liegen, Abb. 3.4. Darüber hinaus dienen die Berechnungen mit diesem Modell der Kalibrierung der Materialparameter in der nachfolgenden LinSour-Berechnung.

In Abb. B.6 ist eine Variante des Modells B1M3 mit seinen Materialgruppen für die einzelnen Gesteinsschichten sowie Endlagerbehälter und Versatz dargestellt. Die dargestellte Variante entspricht mit ihren zehn Einlagerungsstrecken der in Abb. 2.2 dargestellten Situation, wobei in diesem Modell die begrenzenden Richtstrecken und die auf der Erkundungssohle liegenden Erkundungsstrecken wegen ihres geringen thermischen Einflusses unberücksichtigt bleiben. Ebenso werden die geologischen Einheiten wegen ihres geringen thermischen Einflusses nur in vereinfachter Form wiedergegeben. Modelle mit einer Einteilung in Homogenbereiche wie in Abb. 2.2 werden in AP 9 /KOC 12/ behandelt. Das thermische Verhalten des Hauptanhydrits ist identisch mit dem des Steinsalzes. Sein mechanisches Materialverhalten wird allein auf der Basis des elastischen Anteils beschrieben. Die Möglichkeit, dass plastische Zustände erreicht werden, ist Bestandteil der Integritätsanalyse in AP 9. Im Modell B1M3 besteht seine mechanische Wirkung in der Abschirmung gegenüber der Bewegungsfähigkeit des z3/z4. Die Beschränkung des Hauptanhydrits auf den oberen Teil ist eine Annäherung an die Zerblockung. Für die thermische Auslegung ist diese Modellbildung konservativ, da die Kompaktion des Salzgrusversatzes in den Einlagerungsstrecken und damit die Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit des Salzgrusversatzes etwas verzögert wird, so dass die errechnete Maximaltemperatur etwas höher ausfällt.



**Abb. B.6** Endliche Feldbreite – B1M3, 10 Einlagerungsstrecken, DWR-Beladung; Gesamtmodell und Ausschnitt aus der Einlagerungssohle

Die Modellbildung in Streckenrichtung entspricht der des Modells B1M2 und dem in Abb. B.5 dargestellten Ansatz. Die Erstreckung in vertikaler Richtung erfolgt in einigen Varianten bis auf die Höhe des Salzspiegels, bei der in Abb. B.6 dargestellten Variante bis zur Geländeoberkante. In diesem zuletzt genannten Fall ist das Deckgebirge mit enthalten. Der Abstand zu den Seiten und nach unten ist mit dem Abstand der Einlagerungssohle zum oberen Berechnungsrand vergleichbar. In Abhängigkeit vom Abstand und einer im geringen Umfang zulässigen Erwärmung auf den seitlichen Rändern ist der Simulationszeitraum zu sehen. Im Hinblick auf Zeitpunkte wie im Modell B1M2, zu denen sich das Temperaturmaximum einstellt, ist ein Simulationszeitraum von 100 Jahren abdeckend. Die thermischen und mechanischen Stoffansätze mit ihren Parametern sowie die thermischen und mechanischen Anfangsbedingungen sind in den Anhängen B.2 und B.3 sowie in Kapitel 2.6.3 beschrieben, die verwendeten thermischen und mechanischen Randbedingungen entsprechen denjenigen des Modells B1M2.

Für den Einlagerungsbetrieb wird von einer Betriebsdauer von 40 Jahren ausgegangen, beginnend zum 1.1.2035. Als weitere Annahmen werden eine unabhängige Betriebsführung im Ost- und Westteil des Endlagers angenommen sowie eine kontinuierliche Einlagerung der Abfälle im Ostflügel. Ausgenommen sind davon die Mosaikbehälter mit den Strukturteilen in der schachtnächsten Strecke des Einlagerungsfeldes Ost 12. Auf der Basis der mit Brennelementen von Leistungs- und Forschungsreaktoren beladenen Behälter und der mit den unterschiedlichen CSD-V beladenen Behälter ergibt sich ein Einlagerungstakt von ca. 88 Behältern pro Jahr. Eine typische Strecke in der Endlagerplanung entsprechend Kapitel 3.3.2.2 hat eine Länge von ca. 240 m. Darin werden 28 mit Brennelementen beladene Behälter eingelagert, was einer Zeitdauer von 116 Tagen entspricht, oder 21 mit CSD-V beladene Behälter, was einer Zeitdauer von 87 Tagen entspricht. Die Betriebsplanung sieht den parallelen Einlagerungsbetrieb in zwei benachbarten Strecken vor. Zeitgleich mit der Einlagerung erfolgt die Auffahrung der benachbarten beiden Strecken.

Aus der geplanten Betriebsführung und dem zeitlichen Anfall des Abfalls ergeben sich eine Einlagerungsabfolge und ein Alter der Abfälle, wie sie in Tab. B.7 aufgelistet sind. Die Abfälle mit geringer und in den Berechnungen nicht berücksichtigter Wärmeentwicklung sind diejenigen Abfälle, die zuerst eingelagert werden. Dadurch verschiebt sich die Einlagerung der stark wärmeentwickelnden Abfälle zu späteren Zeitpunkten, Tab. B.7. Das Alter der weiteren wärmeentwickelnden Abfälle ist auf der Basis von Eckdaten der einzelnen Abfalltypen bestimmt, d. h. den ersten und letzten Anfällen der jeweiligen Abfalltypen bei Abfallanfall und Einlagerung. Bei den Behältern mit SWR- und DWR-BE hängt es von der Betriebsführung ab, ob es während des vorgesehenen Einlagerungszeitraums ggf. zu einer geringen Unterschreitung des angegebenen Alters kommt. Insgesamt ergibt sich ein Alter für die stark wärmeentwickelnden Abfälle im Bereich von ca. 45 Jahren bis 50 Jahren.

**Tab. B.7** Einlagerungsabfolge für Variante B1 bei kontinuierlicher Einlagerung für einen Zeitraum von 40 Jahren beginnend zum 1.1.2035 mit Alter der Abfälle zum Einlagerungszeitpunkt

Abfalltyp	Einlagerung		Alter [ a ]	
	Beginn	Ende	zu Beginn	am Ende
THTR, KNK, MTR2, ..	01.2035	10.2040	1)	1)
CSD-B,-C	10.2040	05.2046	1)	1)
CSD-V	05.2046	01.2051	56	46
DWR-WWER	01.2051	05.2053	56	58
DWR/SWR-Mix	05.2053	12.2074	53	50
DWR/SWR-UO <sub>2</sub>			58	50

<sup>1)</sup> Unberücksichtigt, da thermisch nicht relevant

#### **B1M4 – Planungskonzept: Feld entsprechend der Endlagerauslegung**

Im Modell B1M4 (Abb. 3.4) werden die Behälter mit stark wärmeentwickelnden Abfällen der Leistungsreaktoren und aus der Wiederaufarbeitung mit ihrer Platzierung entsprechend dem Planungskonzept, Kapitel 3.3.2.2, berücksichtigt.

Die voranstehend beschriebenen Berechnungsmodelle sind Modelle zur Anwendung des FDM-Programms FLAC<sup>3D</sup>. Eine Variante des Modells B1M2 besteht aus etwa 80.000 Elementen und Knoten (EuK), das in Abb. B.6 dargestellte Modell B1M3 bei vergrößerter Diskretisierung im Fernfeld aus ca. 300.000 EuK. In beiden Fällen wird insgesamt nur je ein halber Behälter und ein halber Behälterabstand modelliert. Wird angenommen, dass ein Behälter zusammen mit seinem Wirtsgesteinsanteil ober- und unterhalb durch 40.000 EuK abgebildet werden kann, ist zur Diskretisierung aller 2535 wärmeentwickelnden Behälter ein Modell mit ca. 100 Mio. EuK erforderlich. Vereinfachungen in der Modellbildung sind bei entfernten Einlagerungsfeldern möglich, aber damit wird nicht das Endlager als Ganzes in dem o. g. Detaillierungsgrad erstellt. Modelle der o. g. Größenordnung und mit der zusätzlichen Anforderung an eine große Anzahl an Zeitschritten im gesamten Simulationszeitraum lassen sich mit geeigneten Programmen der FEM/FDM auf der Basis der aktuell verfügbaren Rechnerhardware nur auf Rechnerclustern mittlerer Größe lösen. Sowohl die dazu erforderlichen Programme als auch die Rechnerhardware standen jedoch nicht zur Verfügung. Das Modell B1M4 basiert daher auf einem alternativen Lösungsansatz.

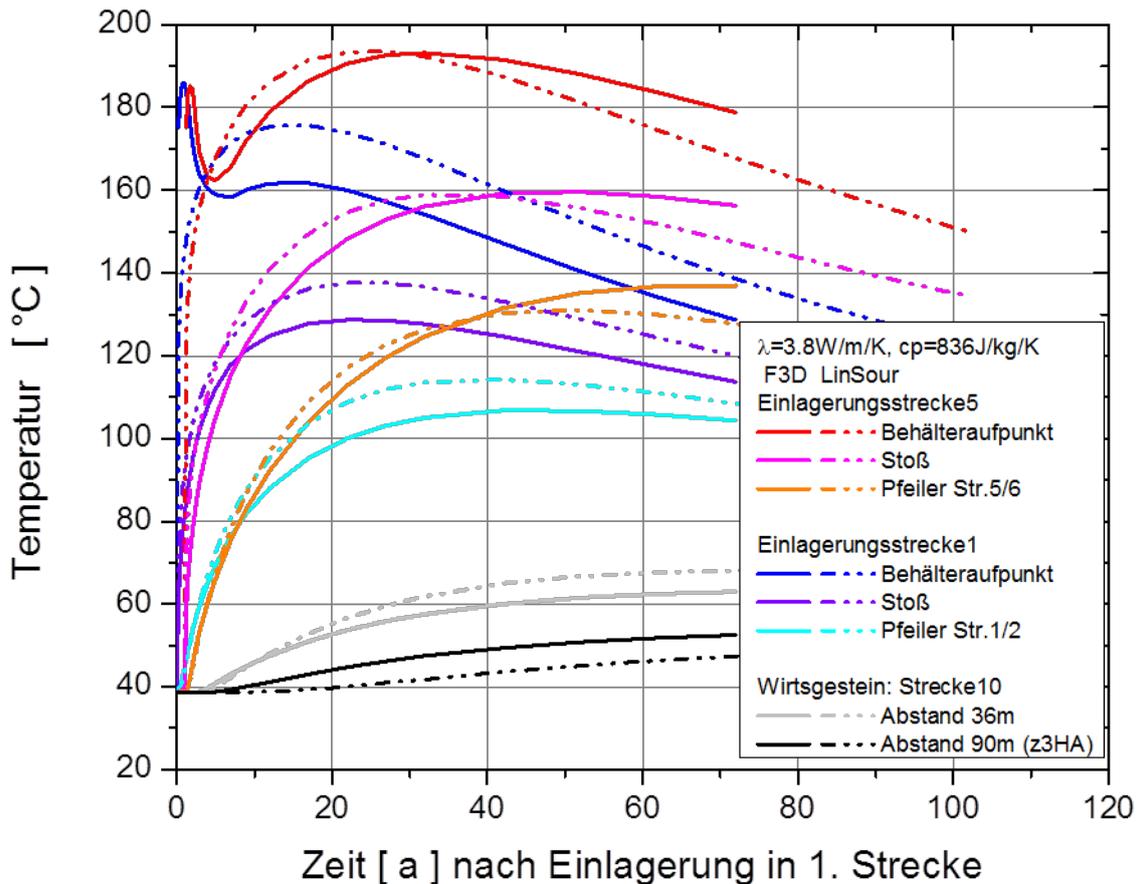
Modell B1M4 berücksichtigt das Grubengebäude in seiner Ausdehnung und mit Anordnung aller 2.535 wärmeentwickelnden Behälter, wie es in der Endlagerauslegung entsprechend Kapitel 3.3.2.2 geplant und in Abb. 3.17 dargestellt ist. Das Modell berücksichtigt

- Linienquellen entsprechend der Behälterlänge
- Beobachtungspunkte im Abstand des Behälterradius
- konstante Werte für Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität
- gestaffelte Einlagerung

Die Anpassung der Materialparameter wird im Zusammenhang mit den Ergebnissen beschrieben. Die Einlagerungsreihenfolge ist in Tab. B.7 beschrieben, der Einlagerungstakt im Zusammenhang mit Modell B1M3.

#### **B.5 Anpassung der Materialparameter für LinSour zur Berechnung der Streckenlagerung – Variante B1**

Das Programm FLAC<sup>3D</sup> ermöglicht es, Materialparameter zustandsabhängig beschreiben zu können. Im Gegensatz dazu ermöglicht LinSour nur die Verwendung von konstanten Größen. Die Veränderung, der z. B. die Wärmeleitfähigkeit an einem Ort unterworfen ist, ist in der Abb. B.7 gezeigt worden. Die für LinSour erforderliche Anpassung erfolgt auf der Basis des Modells B1M3 mit zehn Strecken, Einlagerung von DWR-UO<sub>2</sub> beladenen POLLUX<sup>®</sup>-Behältern, Zwischenlagerzeit 35 Jahre. Der Simulationszeitraum der FLAC<sup>3D</sup>-Berechnung erstreckt sich über 70 Jahre, beginnend ab Einlagerung des ersten Behälters, die Ergebnisse der LinSour-Berechnung sind in der Abbildung für einen Simulationszeitraum von 100 Jahren dargestellt. In Abb. B.7 ist der zeitliche Verlauf der Temperatur an ausgewählten Positionen einer zentralen Strecke des Einlagerungsfeldes und einer Randstrecke sowie den entfernteren Bereich des Wirtsgesteins dargestellt. Zum Vergleich mit den Ergebnissen der FLAC<sup>3D</sup>-Berechnung enthält die Abbildung die Ergebnisse der LinSour-Berechnung, wobei hier die Ergebnisse mit dem als besten bestimmten Parametersatz verwendet sind.



**Abb. B.7** Zeitlicher Verlauf der Temperatur am thermischen Auslegungspunkt der Behälter in den einzelnen Strecken, B1M3: P-10, DWR-UO<sub>2</sub>, 35 Jahre ZLZ, S x B = 36 m x 2,63 m, zehn Strecken, zeitgleiche Einlagerung in zwei Strecken

Das für die Anpassung verwendete Zielfunktional ist die Summe einer Reihe an Bewertungsgrößen:

$$Err_{Var} = \sum_{i=1}^{n_{Err}} \frac{Err_{i,Var}}{n_{Var} \sum_{i=1}^{n_{Var}} Err_{i,j}} \quad (B.4)$$

mit

- $i, j$  : Laufindizes
- $n_{Err}$  : Anzahl der Einzelfehlergrößen
- $n_{Var}$  : Anzahl der Parametervarianten
- $Err_{Var}$  : Gesamtfehler einer Parametervariante
- $Err_{i,Var}$  : Einzelfehler einer Parametervariante

Einzelfehlergrößen können Einzelwerte und integrale Werte sein. Die Bewertung erfolgt für die Temperatur selbst, aber auch für die Änderung der Temperatur. Als Ein-

zelfehlergrößen werden die Maximaltemperatur an einem der beiden zentralen Behälter verwandt, Fehlerintegrale über die Zeit werden für die Temperatur im Behälterumfeld, im streckennahen Bereich und im streckenfernen Bereich bestimmt; Fehlerintegrale über die Zeit für die zeitliche Tangente der Temperatur in den oben genannten Bereichen. Der zeitlich frühe Bereich mit dem ersten Temperaturmaximum kann in einer LinSour-Berechnung nicht erfasst werden. Daher wird dieser Zeitbereich nicht mitbewertet; die Fehlerintegrale beginnen frühestens zum Zeitpunkt von sieben Jahren nach Einlagerungsbeginn.

Der mit dem Programm LinSour untersuchte Parameterraum erstreckt sich bei der Wärmeleitfähigkeit auf  $[3,4; 4,6]$  W/(m·K), bei der Wärmekapazität auf  $[836; 878]$  J/(kg·K). Bei der Parametervariation zeigt sich, dass die Wärmekapazität gegenüber der Wärmeleitfähigkeit eine deutlich untergeordnete Rolle spielt. Wird eine höhere Wärmeleitfähigkeit in der LinSour-Berechnung gewählt, fließt die Wärme schneller aus dem heißen Bereich ab. Als Folge wird die Maximaltemperatur unterschätzt, die warmen Bereiche werden jedoch gut beschrieben. Eine zu geringe Wärmeleitfähigkeit überschätzt die Maximaltemperatur, beschreibt den heißen Bereich zugunsten des nur warmen Bereichs besser. Das als bestes bewertete Ergebnis ergibt sich mit einer Wärmeleitfähigkeit von 3,8 W/(m·K) und einer Wärmekapazität von 836 J/(kg·K), Abb. B.7. Gegenüber der in /DBE 92/ getroffenen Parameterwahl mit einer Wärmeleitfähigkeit von 3,6 W/(m·K) und einer Wärmekapazität von 864 J/(kg·K) besteht nur ein geringer Unterschied. Mit dem Parametersatz aus /DBE 92/ ergibt sich eine um ca. 4 K höhere Maximaltemperatur gegenüber der hier als letztes bewerteten Parameterwahl.

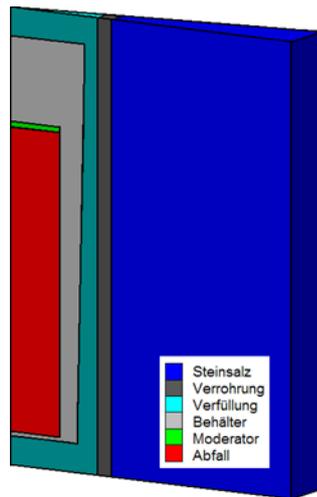
## **B.6 Berechnungsmodelle zur thermischen Auslegung der Bohrlochlage- rung – Variante C**

### **CM1 – Einzelbohrloch: Einlagerung in einem einzelnen Bohrloch**

Das Modell CM1 ist insofern eine Abbildung des Endlagers, wie die Bedingungen am Standort mit übertragen werden. Eine derart isolierte Lage eines einzelnen Bohrlochs findet sich nicht in einem realen Endlager. Dieses Modell dient der Bestimmung der minimalen Zwischenlagerzeit.

Mit der Simulation der Einlagerung von Kokillen in einem einzelnen Bohrloch in der Variante CM1 wird die kürzeste mögliche Zwischenlagerzeit für den jeweiligen Abfalltyp unter Einhalten der Auslegungstemperatur des Steinsalzes bestimmt. Eine weitere Verkürzung der Zwischenlagerzeit erfordert eine Konzeptänderung z. B. durch verringerte Behälterbeladung.

In Abb. B.8 ist Model CM1 schematisch dargestellt. Das Modell entspricht der in Abb. 2.1 dargestellten Kokille BSK-R. Abweichend setzt sich die Konusform des Endlagerbehälters in den Kokillenkopf fort. Auf Grund der Kegelform des Kokillenkopfes wird nur die untere Kopfhälfte im Modell berücksichtigt, die obere Hälfte und der Tragpilz bleiben unberücksichtigt. Insgesamt ergeben sich damit die folgenden Abmessungen: Reduzierte Kokillenhöhe 4,955 m, Fußplatte 0,07 m, Moderatorzone 0,08 m, Kokillendurchmesser am Fuß 0,47 m und am Kopf 0,52 m. Die Verrohrung weist einen Außendurchmesser von 0,72 m auf und einen Innendurchmesser von 0,62 m. Die Gesamtüberdeckung der Kokille beträgt hier insgesamt 0,855 m, da zusätzlich zur konzeptionell vorgesehenen Höhe von 0,75 m die zweite Kopfhälfte und der Tragpilz mitberücksichtigt werden. In dem Berechnungsmodell wird die Überdeckung jeweils zur Hälfte über und unter dem Behälter verteilt angesetzt. Anpassungen ergeben sich beim Durchmesser und der Länge (D x L) des innen liegenden Abfalls: Bei Brennelementen 0,35 m x 4,55 m, bei CSD-V 0,43 m x 3,81 m. Das Modellgebiet ist in seiner radialen Erstreckung so groß gewählt, dass innerhalb des Simulationszeitraums nur eine geringe Temperaturerhöhung an den äußeren Rändern auftritt. Das Temperaturmaximum tritt im Fall eines einzelnen mit Brennelementen beladenen Behälters innerhalb des ersten Jahres auf, bei der Beladung mit CSD-V nach ca. fünf Jahren. Der Simulationszeitraum ist mit bis zu zehn Jahren ausreichend lang gewählt.



**Abb. B.8** Modell CM1 – Schema mit Korb für DWR- bzw. SWR-Brennstäbe

Die dem Steinsalz und den übrigen Materialien entsprechenden thermischen Stoffansätze sind mit ihren Parametern in Anhang B.2 beschrieben worden. Es wird eine konstante Anfangstemperatur angesetzt, die der Temperatur am Ende eines 300 m langen Einlagerungsbohrloches in der Tiefe von 1.170 m entspricht. Mit den allseitig angesetzten Symmetrierandbedingungen wird der Randeinfluss am Ende des Bohrloches ausgeschlossen.

### **CM2 – Elementarzelle: Feld mit sehr großer Ausdehnung**

Das Modell ist der Teil des Endlagers, in dem die Wärme nur in vertikaler Richtung abgeführt werden kann. Diese Bedingung trifft auf Einlagerungsfelder mit sehr langen Überfahrungsstrecken zu. Ob sich diese Bedingungen in der tatsächlich realisierten Endlagerauslegung wiederfinden, kann erst mit Modellen festgestellt werden, die den horizontalen Wärmeabfluss mit beinhalten. In Abb. 3.32 ist das Berechnungsmodell dargestellt.

In Abb. B.9 ist ein Schema des Modells CM2 dargestellt. Mit diesem Modell wird ein flächenmäßig sehr großes Einlagerungsfeld zur Bohrlochlagerung abgebildet. Wie bei der Variante B1 wird bei der Variante C von einer hexagonalen Anordnung der Einlagerungsorte, hier die der Bohrlöcher, ausgegangen. Der Bohrlochabstand beträgt bei der hier dargestellten Einlagerung von Brennstäben 50,6 m.



**Abb. B.9** Modell CM2 – Schema in Seitenansicht und Ausschnitt aus Schnittebene A-A

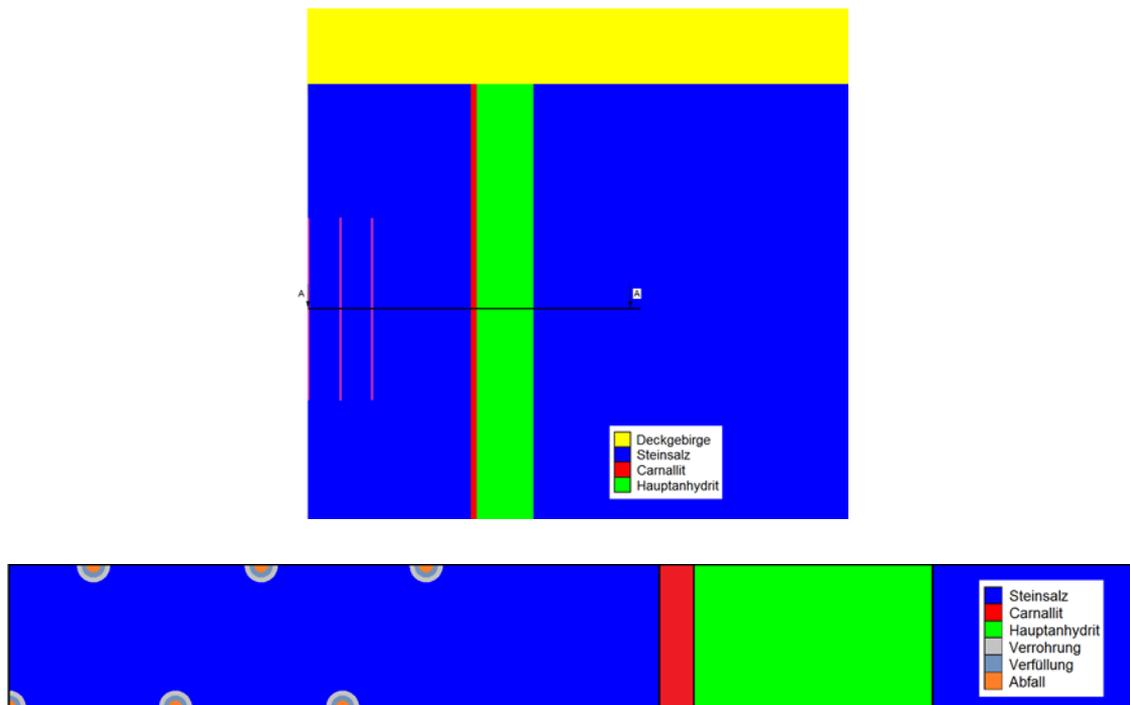
Durch die gegenseitige Beeinflussung der Wärmeströme aus den beiden im Modell enthaltenen benachbarten Bohrlöchern verschiebt sich die Position des Temperaturmaximums gegenüber der im Modell CM1 bestimmten auf die Höhe der halben aktiven Bohrlochlänge. Die Gesamtlänge eines Bohrlochs beträgt 300 m, mit einer vorgesehenen Länge des Bohrlochstopfens von 10 m reduziert sich diese Länge zur aktiven Bohrlochlänge. Die Mittellage, Schnitt A-A in Abb. B.9, liegt damit in einer Teufe von 155 m unter der Einlagerungssohle bzw. in einer Teufe von 1.025 m unter der Geländeoberkante. In dem Modell CM2 werden einige Einlagerungskokillen um die Mittelebene herum separat aufgelöst, die verbleibenden Anteile am Kokillenstapel ober- und unterhalb werden zu jeweils durchgehenden Wärmequellen zusammengefasst. An Stelle der der Rückhohlbarkeit geschuldeten konischen Kokillenform wird bei den durchgehenden Wärmequellen vereinfachend eine zylindrische Form mit einem Radius verwendet, bei dem eine zylindrische Kokille volumenäquivalent zur konischen Einlagerungskokille ist. Der volumenspezifische Wärmestrom der durchgehenden Wärmequellen ist gegenüber dem der Einlagerungskokillen modifiziert, da dort zusätzlich zum Abfallvolumen die inaktiven Zwischenschichten und das Volumen der inaktiven Behälter berücksichtigt sind. Die verwendeten Materialgruppen mit ihren Stoffansätzen und Materialparametern entsprechen denen des Modells CM1, wobei hier noch zusätzlich der Bohrlochstopfen aus Salzgrus enthalten ist. Als thermische Anfangsbedingung wird das in Kapitel 2.5.2 beschriebene Temperaturprofil verwendet. Die seitlichen Ränder werden wegen ihrer Symmetrieeigenschaft als adiabate Ränder angesetzt, der obere und der untere Rand sind als zeitunveränderliche Temperaturränder beschrieben.

### **CM3 – Endliche Feldbreite: Feld mit endlicher Bohrlochanzahl in einer Einlagerungsstrecke bei sehr großer Streckenanzahl**

Die Konservativität des Modells CM2 wird in einem ersten Schritt abgebaut, indem die Wärme horizontal in einer Richtung abfließen kann. Das Modell CM3 ist in Abb. 3.32 dargestellt.

Eine Modellierung eines endlich langen Bohrlochs mit dem Detaillierungsgrad einer einzelnen Kokille wie in Abb. B.8 dargestellt, führt bereits bei der Berücksichtigung eines einzelnen Bohrlochs zu einem größeren numerischen Modell. Bei der Berücksichtigung eines Einlagerungsfeldes überschreitet die Modellgröße schnell die Grenze der Handhabbarkeit. Vergleichsberechnungen mit einer kontinuierlichen Quelle über das gesamte Bohrloch haben gezeigt, dass für die hier im Vordergrund stehende Temperaturentwicklung des Steinsalzes eine Auflösung der einzelnen Kokillen sich zu Beginn der Erwärmung noch mit einem Temperaturunterschied von ca. 3 K bemerkbar macht. Zum Zeitpunkt des Temperaturmaximums im Steinsalz ist der Temperaturunterschied jedoch vernachlässigbar. Weiter entfernt anstehende Materialien sind von diesem Aspekt der Diskretisierung nicht betroffen. Aus numerischem Grund wird daher in den folgenden Modellen CM3 und CM 4 die Bohrlochbeladung als durchgehende Quelle modelliert. Der Quellenradius wird analog zum Modell CM2 gesetzt.

In dem Modell CM3 wird der Energietransport über die seitlichen Feldgrenzen hinaus mitberücksichtigt. Mit Carnallitit, Hauptanhydrit und dem Deckgebirge werden zusätzliche Materialgruppen berücksichtigt, Abb. B.10. Der Abstand des Carnallitits ergibt sich unter Berücksichtigung seines Abstandes zur hier nicht mitmodellierten Richtstrecke. Der Abstand zum nächstliegenden Bohrloch beträgt in den Varianten des Modells CM3 70 m. Die verwendeten Stoffansätze und Materialparameter sind in Anhang B.2 beschrieben, die Anfangs- und Randbedingungen entsprechen denen des Modells CM2.

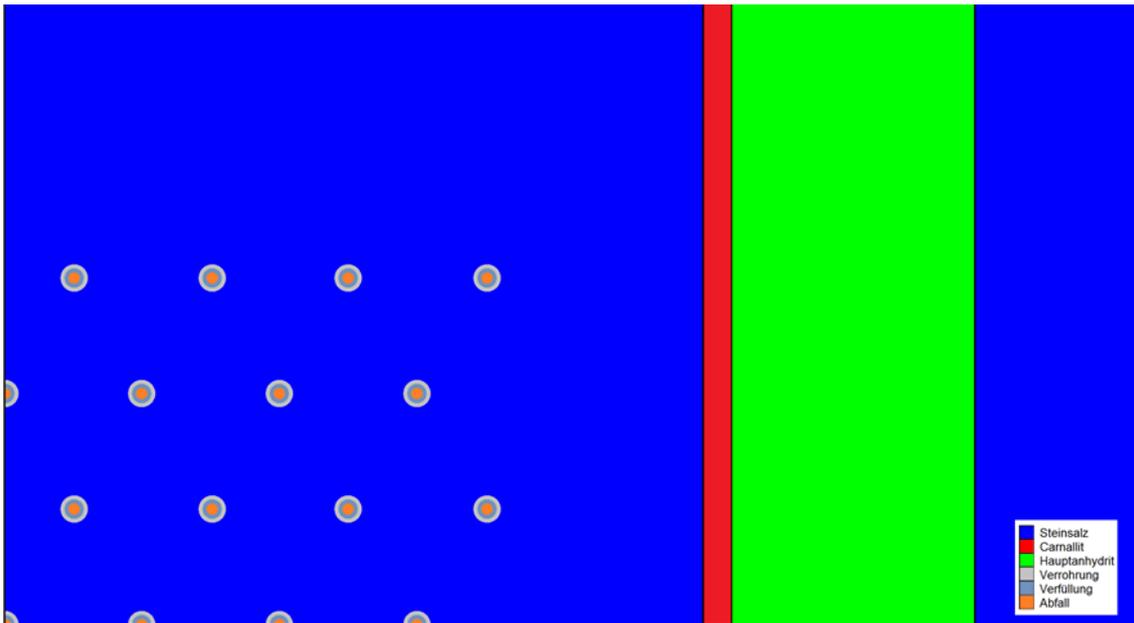


**Abb. B.10** Modell CM3 – Schema in Seitenansicht und Ausschnitt aus Schnittebene A-A

#### **CM4 – Einzelfelder: Feld mit endlicher Ausdehnung**

In der Variante C ergeben sich horizontale Abmessungen für das geplante Endlager, bei denen die maximale Feldbreite sich nicht wesentlich von der Erstreckung des Endlagers in Richtung der Sattelachse unterscheidet. Daher wird die in den Modellen CM2 und CM3 enthaltene Konservativität einen weiteren Schritt auf den horizontalen Wärmeabfluss in beide Richtungen abgebaut. Das Modell CM4 ist in Abb. 3.32 dargestellt.

In Abb. B.11 ist das Modell CM4 schematisch dargestellt. Die Modifikation dieses Modells gegenüber Modell CM3 besteht darin, dass in Feldestiefe an die Stelle des Symmetrierandes eine Anzahl an Einlagerungsstrecken rückt und daran das unverritzte Gebirge anschließt. Alle weiteren Modellelemente aus CM3 werden auch im Modell CM4 verwendet.



**Abb. B.11** Modell CM4 – Schematischer Ausschnitt aus Schnittebene A-A

### **CM5 – Planungskonzept: Feld entsprechend der Endlagerauslegung**

Im Modell CM5 werden die Bohrlöcher, in die Kokillen mit stark wärmeentwickelnden Abfällen der Leistungsreaktoren und aus der Wiederaufarbeitung eingelagert werden, mit ihrer Platzierung entsprechend dem Planungskonzept, Kapitel 3.3.3.2, berücksichtigt, Abb. 3.3.2.

Ein Berechnungsmodell mit dem Endlager als Ganzes auf der Basis eines FE/FD-Codes erscheint hier zwar eher möglich als in der Variante B1, die Größe des erforderlichen Modells und die Simulationsdauer erfordern jedoch weiterhin den Einsatz von Clusterlösungen. Das Modell CM5 basiert daher auf dem bereits in Kapitel 3.3.2.1.1 angegebenen alternativen Lösungsansatz.

Das Modell CM5 berücksichtigt das Grubengebäude in seiner Ausdehnung und in der Anordnung aller 167 Bohrlöcher für die Einlagerung wärmeentwickelnder Abfälle, wie es in der Endlagerauslegung Kapitel 3.3.3.2 geplant und in Abb. 3.40 dargestellt ist. Das Modell berücksichtigt:

- Linienquellen entsprechend der aktiven Bohrlochlänge
- Beobachtungspunkte im Abstand des Außenradius der Bohrlochverrohrung
- konstante Werte für Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität
- gestaffelte Einlagerung

Die Anpassung der Materialparameter wird im Zusammenhang mit den Ergebnissen beschrieben. Die Einlagerungsreihenfolge der Abfalltypen ist in Tab. B.8 beschrieben. Bei einer angenommenen Betriebsdauer von 40 Jahren für den Einlagerungsbetrieb, beginnend mit dem 1.1.2035, dem zeitlichen Anfall des Abfalls entsprechend AP 3, der Einlagerungsreihenfolge entsprechend Kapitel 3.3.3.2 und der Annahme eines kontinuierlichen Einlagerungsbetriebes ergibt sich die in Tab. B.8 angegebene Einlagerungsabfolge und das Alter der Abfälle. Die Abfälle mit geringer und in den Berechnungen hier nicht berücksichtigter Wärmeentwicklung werden zuerst eingelagert. Sie werden in der Tabelle nur in der Einlagerungsabfolge betrachtet. Das Alter der weiteren wärmeentwickelnden Abfälle ist analog zum Vorgehen in der Variante B1 auf der Basis der Eckdaten der Abfälle bestimmt. Bei den Behältern mit SWR- und DWR-BE hängt es von der Betriebsführung ab, ob es während des vorgesehenen Einlagerungszeitraums ggf. zu einer geringen Unterschreitung des angegebenen Alters kommt. Das Alter der stark wärmeentwickelnden Abfälle beträgt zwischen etwa 42 Jahren und 55 Jahren.

Zur Bestimmung der Einlagerungsfrequenz wird wie bei der Variante B1 von einer Betriebsdauer von 40 Jahren für den Einlagerungsbetrieb ausgegangen, beginnend zum 1.1.2035, und einer unabhängigen Betriebsführung im Ost- und Westflügel des Endlagers. Für die Abfälle im Ostflügel wird eine kontinuierliche Einlagerung angenommen. Auf der Basis der in Tab. 2.11 angegebenen Anzahl an Einlagerungskokillen ergibt sich ein Einlagerungstakt von 1,45 d/Endlagerkokille. Bei einer vollständigen Verfüllung eines 300 m langen Bohrlochs mit 50 Einlagerungskokillen beträgt die Verfülldauer eines Einlagerungsbohrlochs 73 d. Die Aktivierung des einzelnen Bohrlochs erfolgt zu dem Zeitpunkt, zu dem der Kokillenstapel die Auslegungsebene, das ist die 1.025 m-Sohle, erreicht. Das letzte mit Brennelementkokillen beladene Bohrloch erreicht nicht die Auslegungsebene, die Aktivierung dieses Bohrlochs erfolgt mit der Einlagerung der letzten Kokille.

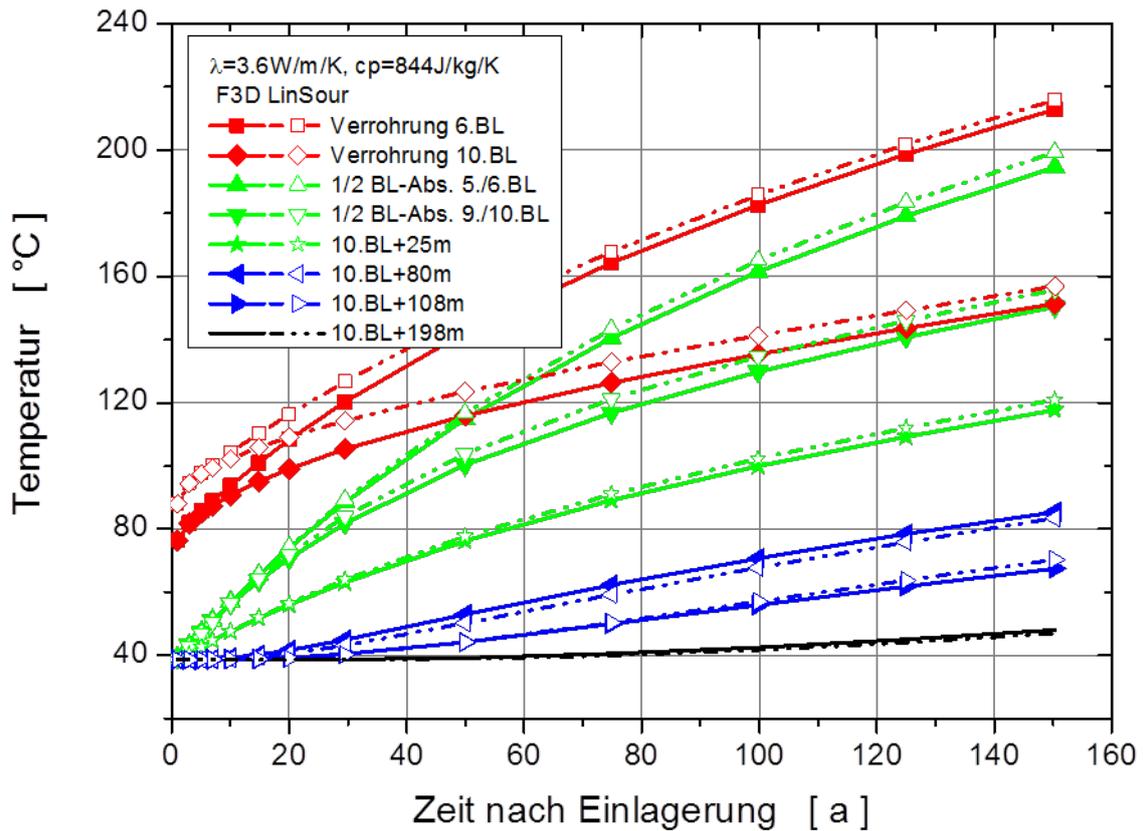
**Tab. B.8** Einlagerungsabfolge für Variante C bei kontinuierlicher Einlagerung für einen Zeitraum von 40 Jahren beginnend zum 1.1.2035 mit Alter der Abfälle zum Einlagerungszeitpunkt

Abfalltyp	Einlagerung		Alter [ a ]	
	Beginn	Ende	zu Beginn	am Ende
CSD-B,-C	01.2035	11.2040	1)	1)
THTR, KNK, MTR2, ..	11.2040	01.2042	1)	1)
CSD-V	01.2042	12.2046	52	42
DWR-WWER	12.2046	08.2049	52	55
DWR/SWR-Mix	08.2049	12.2074	50	50
DWR/SWR-UO <sub>2</sub>			55	50

<sup>1)</sup> Unberücksichtigt, da thermisch nicht relevant

## B.7 Anpassung der Materialparameter für LinSour zur Berechnung der Bohrlochlagerung – Variante C

Als Vergleichsmodell wird das Modell CM3 mit zehn Bohrlöchern je Strecke und der Einlagerung von DWR mix 89/11 mit einer Zwischenlagerzeit von 49 Jahren verwendet. In Abb. 3.33 ist bereits gezeigt worden, dass die Auslegungstemperatur des Steinsalzes mit diesem Modell überschritten wird. Die aus diesen Temperaturen oberhalb der Auslegungstemperatur resultierenden Wärmeleitfähigkeiten würden in die Anpassung miteinfließen. Daher beschränkt sich der Zeitbereich in der Auswertung auf die ersten 150 Jahre. In Abb. B.12 ist der zeitliche Verlauf der Temperatur an ausgewählten Positionen dargestellt. Zum Vergleich mit den Ergebnissen der FLAC<sup>3D</sup>-Berechnung enthält die Abbildung die Ergebnisse der LinSour-Berechnung, wobei hier die Ergebnisse mit dem als besten bestimmten Parametersatz dargestellt sind. In diesem Bewertungszeitraum tritt an der Verrohrung der zentralen Bohrlöcher rechnerisch eine Maximaltemperatur von ca. 210 °C auf und der gesamte Gebirgsbereich von dem dritten Bohrloch bis zum siebten Bohrloch heizt sich zum Betrachtungsendzeitpunkt auf über 180 °C auf. An der Verrohrung der äußeren Bohrlöcher wird rechnerisch zum Betrachtungsendzeitpunkt eine Maximaltemperatur von ca. 150 °C erreicht, nach außen fällt die Temperatur zügig ab.



**Abb. B.12** Zeitlicher Verlauf der Temperatur an ausgewählten Positionen des Modells CM3: DWR mix 89/11, 49 Jahre ZLZ, 10 Bohrlöcher, Bohrlochabstand 50,6 m

Grundzüge der Anpassungsstrategie sind bereits im Zusammenhang mit der Streckenlagerung in Anhang B.5 beschrieben worden. Ebenso der mit dem Programm LinSour untersuchte Parameterraum. Das als bestes bewertete Ergebnis ergibt sich mit einer Wärmeleitfähigkeit von  $3,6\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$  und einer Wärmekapazität von  $844\text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$ , Abb. B.12. Der gegenüber der Variante B1, Streckenlagerung, etwas geringere Wert für die Wärmeleitfähigkeit wird im Wesentlichen auf die wesentlich stärkere Gebirgs Erwärmung im zentralen Bereich des Einlagerungsfeldes zurückgeführt.

## Abbildungsverzeichnis der Anhänge A und B

Abb. A.1	Mögliche Brandherde in der Einlagerungsvariante Streckenlagerung kombiniert mit Kammerlagerung .....	244
Abb. B.1	Anpassung der Wärmefreisetzung eines DWR-UO <sub>2</sub> -Brennelementes an ein Nuklidspektrum mit fünf Leitnukliden .....	253
Abb. B.2	Temperaturabhängiger Anteil an der stationären Kriechrate der Stoffansätze BGR <sub>a</sub> , BGR <sub>b</sub> und BGR <sub>EB1</sub> .....	261
Abb. B.3	Vergleich der Kompaktionsrate aus Messung und Identifikation für das modifizierte Stoffansätze CWIPP und das Hein'sche Modell /BEC 04/... ..	263
Abb. B.4	Modell B1M1, Korb für DWR- bzw. SWR-Brennstäbe .....	264
Abb. B.5	Elementarzelle – B1M2, Modellgebiet und Diskretisierung.....	266
Abb. B.6	Endliche Feldbreite – B1M3, 10 Einlagerungsstrecken, DWR-Beladung; Gesamtmodell und Ausschnitt aus der Einlagerungssohle....	268
Abb. B.7	Zeitlicher Verlauf der Temperatur am thermischen Auslegungspunkt der Behälter in den einzelnen Strecken, B1M3: P-10, DWR-UO <sub>2</sub> , 35 Jahre ZLZ, S x B = 36 m x 2,63 m, zehn Strecken, zeitgleiche Einlagerung in zwei Strecken.....	272
Abb. B.8	Modell CM1 – Schema mit Korb für DWR- bzw. SWR-Brennstäbe .....	275
Abb. B.9	Modell CM2 – Schema in Seitenansicht und Ausschnitt aus Schnittebene A-A.....	276
Abb. B.10	Modell CM3 – Schema in Seitenansicht und Ausschnitt aus Schnittebene A-A.....	278
Abb. B.11	Modell CM4 – Schematischer Ausschnitt aus Schnittebene A-A.....	279
Abb. B.12	Zeitlicher Verlauf der Temperatur an ausgewählten Positionen des Modells CM3: DWR mix 89/11, 49 Jahre ZLZ, 10 Bohrlöcher, Bohrlochabstand 50,6 m .....	282



## Tabellenverzeichnis der Anhänge A und B

Tab. A.1	Vergleich der Reibungsbeiwerte .....	240
Tab. B.1	Abfallspezifikation der berücksichtigten wärmeentwickelnden Abfälle /PEI 11b/.....	250
Tab. B.2	Schwermetallmasse pro Brennelement im Gesamtmittel sowie Größt- und Kleinstwert in den 5 Jahres-Zeitscheiben .....	251
Tab. B.3	Nuklidspektren eines Brennelementes bzw. einer Kokille für die berücksichtigten wärmeentwickelnden Abfälle .....	254
Tab. B.4	Thermische Eigenschaften der verwendeten Materialien .....	256
Tab. B.5	Mechanische Eigenschaften der verwendeten Materialien.....	259
Tab. B.6	Verwendete Kriechklassen .....	262
Tab. B.7	Einlagerungsabfolge für Variante B1 bei kontinuierlicher Einlagerung für einen Zeitraum von 40 Jahren beginnend zum 1.1.2035 mit Alter der Abfälle zum Einlagerungszeitpunkt.....	270
Tab. B.8	Einlagerungsabfolge für Variante C bei kontinuierlicher Einlagerung für einen Zeitraum von 40 Jahren beginnend zum 1.1.2035 mit Alter der Abfälle zum Einlagerungszeitpunkt .....	281

**Gesellschaft für Anlagen-  
und Reaktorsicherheit  
(GRS) mbH**

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

Forschungszentrum  
**85748 Garching b. München**  
Telefon +49 89 32004-0  
Telefax +49 89 32004-300

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

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

[www.grs.de](http://www.grs.de)

**DBE TECHNOLOGY GmbH**  
Eschenstraße 55  
31224 Peine

**international nuclear safety  
engineering GmbH**  
Jesuitenstraße 4  
52062 Aachen

**ISBN 978-3-939355-57-1**