

**Konzeptentwicklung für ein generisches
Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle
in flach lagernden Salzsichten in
Deutschland sowie Entwicklung und
Überprüfung eines Sicherheits- und
Nachweiskonzeptes
KOSINA**

– Zwischenbericht Dezember 2015 –

**Konzeptentwicklung für ein generisches
Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle
in flach lagernden Salzsichten in
Deutschland sowie Entwicklung und
Überprüfung eines Sicherheits- und
Nachweiskonzeptes
KOSINA**

– Zwischenbericht Dezember 2015 –

DBETEC: N. Bertrams, W. Bollingerfehr, S. Dörr, W. Filbert, E. Simo
BGR: S. Fahland, J. Hammer, S. Heusermann, T. Kühnlenz,
S. Mrugalla, K. Reinhold
GRS: D. Buhmann, J. Kindlein, J. Mönig, J. Wolf
IfG: W. Minkley, T. Popp

DBE TECHNOLOGY GmbH
Eschenstraße 55
D-31224 Peine

Die diesem Bericht zugrunde liegenden Arbeiten wurden im Auftrag des BMWi über den Projektträger Karlsruhe, Wassertechnologie und Entsorgung, (PTKA-WTE) unter den Förderkennzeichen 02E11405A, 02E11405B, 02E11405C sowie über eine Zuweisung des BMWi an die BGR unter dem Förderkennzeichen 02E11395 durchgeführt. Die Verantwortung für den Inhalt liegt allein bei den Autoren.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Zielsetzung	3
3	Grundlagenermittlung	5
3.1	Art und Menge der wärmeentwickelnden radioaktiven Abfälle und ausgedienten Brennelemente und deren Endlagerbehälter	5
3.1.1	Mengengerüst der ausgedienten Brennelemente und radioaktiven Abfälle aus der Wiederaufarbeitung	6
3.1.2	Endlagerbehälter für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle und ausgediente Brennelemente	10
3.1.3	Anzahl der Abfallbinde mit Gesamtmasse/-volumina	27
3.2	Beschreibung salinar geprägter Schichtenfolgen in Deutschland	32
3.3	Vorliegende Sicherheits- und Nachweiskonzepte	39
3.4	Anforderungen zur Endlagerkonzeptentwicklung	42
3.4.1	Sicherheitsanforderungen des Umweltministeriums	43
3.4.2	Anforderungen nach Bergrecht	44
3.4.3	Anforderungen nach Atomrecht	47
3.4.4	Anforderungen nach dem Sicherheitskonzept	48
3.4.5	Konflikte der Anforderungen	50
4	Erstellung der generischen geologischen Modelle, Ableitung von Modellparametern	51
4.1	Strukturgeologische Merkmale der flach lagernden Steinsalzfolgen und Salzkissen	51
4.2	Vorgehensweise	52
4.2.1	Randbedingungen für die Erstellung der generischen geologischen 3-D-Modelle	52
4.2.2	Schichtenfolge für die Referenzprofile sowie Definition des Wirtsgesteins und Einlagerungsbereichs	54
4.3	Erstellung des geologischen Referenzschnittes für den Typ „flache Lagerung“	58
4.4	Ausblick	60
5	Grundzüge des Sicherheits- und Nachweiskonzeptes	63
5.1	Vorgehensweise	63
5.2	Randbedingungen und Zielsetzungen	63
5.3	Entwicklung eines Sicherheitskonzeptes	65

5.3.1	Relevante Vorgaben der Sicherheitsanforderungen des Umweltministeriums	65
5.3.2	Leitgedanken	68
5.3.3	Zielsetzungen und Maßnahmen für die Nachverschlussphase	70
5.4	Entwicklung eines auf dem Sicherheitskonzept basierenden Nachweiskonzeptes	78
6	Zusammenfassung	81
7	Ausblick	83
	Abbildungsverzeichnis	85
	Tabellenverzeichnis	87
	Literaturverzeichnis	89
	Abkürzungsverzeichnis	99
	Anhang	101

1 Einleitung

In der Mitte der 1980er Jahre wurde in Deutschland ein Referenzkonzept für die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle und ausgedienter Brennelemente in einer Salzformation entwickelt. Es sieht die Einlagerung von ausgedienten Brennelementen in selbstabschirmenden POLLUX[®]-Behältern auf der Sohle von Einlagerungsstrecken eines Bergwerkes in einem Salzstock in rund 900 m Teufe vor und die Einlagerung von Wiederaufarbeitungsabfällen in Kokillen in tiefen vertikalen Bohrlöchern von der Einlagerungssohle aus.

Im Rahmen des FuE-Vorhabens ISIBEL /DBETEC 2008a/ wurde von den Vorhabenspartnern BGR, DBE TECHNOLOGY GmbH und GRS GmbH erstmals eine umfassende Analyse vorhandener Instrumentarien zur Bewertung der Sicherheit eines Endlagers für wärmeentwickelnde Abfälle und ausgediente Brennelemente durchgeführt und ein methodischer Ansatz für ein Sicherheits- und Nachweiskonzept (Safety Case) im Wirtsgestein Steinsalz in einem Salzstock weiterentwickelt und angewendet. Dieser Ansatz wurde im FuE-Vorhaben „Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben“ (VSG) weiterentwickelt /GRS 2013/. Eine wichtige Grundlage des Sicherheits- und Nachweiskonzeptes bilden die „Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle“ /BMU 2010a/. In diesen Sicherheitsanforderungen ist festgelegt, dass ein einschlusswirksamer Gebirgsbereich (ewG) ausgewiesen werden muss, der im Zusammenwirken mit den technischen Verschlüsse (Versatz, Strecken- und Schachtverschlüsse) den Einschluss der Abfälle langfristig sicherstellt. Das Einschlussvermögen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (Integrität) muss über den Zeitraum von einer Million Jahre sichergestellt werden. Außerdem müssen u.a. die Rückholbarkeit der eingelagerten Abfallbehälter in der Betriebsphase und die Handhabbarkeit der Abfallbehälter bei einer eventuellen Bergung aus dem verschlossenen Endlager für einen Zeitraum von 500 Jahren nach Verschluss des Endlagers gegeben sein.

Ausgehend von dem Sicherheits- und Nachweiskonzept und dem Referenzkonzept wurden im Rahmen der Arbeiten zur VSG verschiedene Endlagerkonzepte entwickelt, die in den VSG-Berichten /GRS 2011a/ und /GRS 2012a/ ausführlich beschrieben sind.

Während Steinsalz in Salzstöcken (domal salt) vor allem in Nordwestdeutschland verbreitet ist, dominieren in Mitteldeutschland und Teilen Nordostdeutschlands flach lagernde Salzformationen der Typen „flache Lagerung“ und „Salzkissen“. Beide Typen der flach lagernden Salzformationen (bedded salt) spiegeln in ihrer lateralen Erstreckung – abgesehen von diagenetisch und halokinetisch bedingten Veränderungen – weitgehend sedimentationsbedingte Lagerungsverhältnisse wider bzw. stellen halokinetisch entstandene Aufwölbungen (Salzkissen) dar (siehe Kapitel 3.2). Die vertikale Mächtigkeit schwankt regional in Abhängigkeit von der Beckenposition oder als Folge lokaler Anstauung in Form eines Salzkissens mit konkordanten Hangendschichten und erreicht Mächtigkeiten bis zu mehrere 100 m.

Endlagerkonzepte für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle und ausgediente Brennelemente in flach lagernden Salzschieben gibt es bisher in Deutschland nicht. Gleichwohl ist vor allem das Endlager Waste Isolation Pilot Plant (WIPP) in New Mexiko (USA) zu nennen,

in dem seit 1999 das Endlager für langlebige transuranhaltige Abfälle (TRU) militärischen Ursprungs in einer flach lagernden Salzformation in etwa 600 m Teufe betrieben wird. Für Fragen der Betriebssicherheit und die Führung eines Langzeitsicherheitsnachweises für ein Endlager können zudem die langjährigen Erfahrungen in Deutschland bei der Einlagerung von chemisch-toxischen Abfällen in verschiedenen Untertagedeponien in flach lagernden Salzformationen wichtige Beiträge liefern.

Bei allen bisherigen Erfahrungen bei der untertägigen Entsorgung von Gefahrstoffen in flach lagernden Salzformationen hat der Einfluss der Wärme auf das umliegende Gebirge aber keine wichtige Rolle gespielt.

Das FuE-Vorhaben KOSINA dient dazu, für flach lagernde Salzsichten in Deutschland die technische Machbarkeit und die Sicherheit eines Endlagers für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle und ausgediente Brennelemente zu untersuchen und damit eine weitere Grundlage für einen im Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle /StandAG 2013/ implizit vorgesehenen Vergleich von Endlagersystemen zu schaffen.

Der vorliegende Zwischenbericht fasst den Stand der Arbeiten des zum 01.07.2015 gestarteten Forschungsvorhabens KOSINA bis Jahresende 2015 zusammen. Zunächst wird im Kapitel 2 die Zielsetzung vorgestellt. Daran schließt sich im Kapitel 3 eine Beschreibung der abgestimmten Grundlagen an:

- Art und Menge der den Planungen und Untersuchungen zugrunde zu legenden radioaktiven Abfälle und ausgedienten Brennelemente,
- Kenntnisstand zur Verbreitung salinar geprägter Schichtenfolgen in Deutschland sowie Randbedingungen für die Erstellung der generischen geologischen Modelle sowie
- Anforderungen an die Endlagerentwicklung.

Auf dieser Grundlage erfolgt die Erarbeitung der:

- Generischen geologischen Modelle für die Modelltypen „flache Lagerung“ und „Salzkissen“
- Sicherheits- und Nachweiskonzepte

Das Kapitel 4 befasst sich mit der Vorgehensweise zur Erstellung der generischen geologischen Modelle und Ableitung von Modellparametern für die Integritätsberechnungen. Ein Überblick über die Grundzüge des Sicherheits- und Nachweiskonzeptes ist in Kapitel 5 dargestellt. Kapitel 0 enthält eine Zusammenfassung des bisher erreichten Zwischenstandes, und schließlich wird in Kapitel 7 darüber hinaus ein Ausblick auf die anstehenden Aufgaben gegeben.

2 Zielsetzung

Das Vorhaben hat zum Ziel, erstmalig ein technisches (standortunabhängiges) Konzept für ein Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle und ausgediente Brennelemente auf der Grundlage generischer geologischer Modelle für flach lagernde Steinsalzformationen zu entwickeln. Dies soll auch die Entwicklung und Überprüfung eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein solches Endlager einschließen. Damit soll eine technisch-wissenschaftliche Grundlage geschaffen werden für eine sicherheitstechnische Bewertung von Endlagersystemen in unterschiedlichen geologischen Formationen, die es letztlich ermöglicht, „den Standort für eine Anlage zur Endlagerung (...) zu finden, der die bestmögliche Sicherheit für einen Zeitraum von einer Million Jahre gewährleistet“ /StandAG 2013/.

Im Einzelnen werden folgende Teilziele verfolgt:

Erstes Teilziel:

Herleitung von generischen geologischen Modellen inklusive Modellparametern als Grundlage für die Grubengebäudekonzeption und Auslegungsberechnungen (u. a. auf der Basis des BGR-Berichtes „Verbreitung, Zusammensetzung und geologische Lagerungsverhältnisse flach lagernder Steinsalzfolgen in Deutschland“ /BGR 2014/ sowie der beim IfG vorhandenen Informationen /IfG 2010/); Ableitung von Anforderungen zur Mindestmächtigkeit der Salinbarriere auf Basis vorliegender Erfahrungen sowie vorläufiger Modellrechnungen

Zweites Teilziel:

Entwicklung eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle und ausgediente Brennelemente in flach lagernden Steinsalzformationen

Drittes Teilziel:

Entwicklung eines technischen Konzeptes für ein Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle und ausgediente Brennelemente in flach lagernden Steinsalzformationen (basierend auf generischen geologischen Modellen)

Viertes Teilziel:

Überprüfung der Ausweisbarkeit eines einschlusswirksamen Gebirgsbereiches (Integritäts- und Konsequenzenanalyse für ein generisches Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle und ausgediente Brennelemente in flach lagernden Steinsalzformationen)

Fünftes Teilziel:

Schaffung von wissenschaftlich-technischen Grundlagen für eine sicherheitstechnische Bewertung von Endlagern in unterschiedlichen Wirtsgesteinsformationen

Zur Erreichung der Vorhabensziele sind acht Arbeitspakete vorgesehen, die im Zeitraum vom 01.07.2015 bis zum 28.02.2018 bearbeitet werden. Im Anhang dieses Berichtes sind das Arbeitsprogramm bzw. die Arbeitspakete des FuE-Vorhabens KOSINA dargestellt.

3 Grundlagenermittlung

3.1 Art und Menge der wärmeentwickelnden radioaktiven Abfälle und ausgedienten Brennelemente und deren Endlagerbehälter

Die Auslegung eines Endlagers und dessen Betrieb werden maßgeblich von dem Inventar an radioaktiven Abfällen und ausgedienten Brennelementen sowie den Behältern, die für die Endlagerung dieser Abfälle erforderlich sind, bestimmt. Insofern ist sowohl die detaillierte Kenntnis des zu berücksichtigenden Abfallinventars als auch die Kenntnis über die zur Verwendung kommenden Endlagerbehälter von besonderer Bedeutung.

In einem Endlager für hochradioaktive und wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle sind neben den ausgedienten Brennelementen der Leistungsreaktoren, Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerke und Forschungsreaktoren auch die radioaktiven Abfälle aus der Wiederaufarbeitung der Brennelemente aus den Leistungsreaktoren zu berücksichtigen.

Gemäß dem Programm für eine verantwortungsvolle und sichere Entsorgung bestrahlter Brennelemente und radioaktiver Abfälle (Nationales Entsorgungsprogramm (NaPro)) /BMUB 2015a/ sind bei den Planungen für ein Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle und ausgediente Brennelemente auch diejenigen radioaktiven Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung, die ggf. nicht im Endlager Konrad eingelagert werden können, zu berücksichtigen. Exakte Angaben zu Art und Menge dieser Abfälle liegen zurzeit nicht vor. Aus diesem Grund werden im Rahmen dieses Vorhabens die radioaktiven Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung, die nicht im Endlager Konrad eingelagert werden können, nicht berücksichtigt. Die einzige Ausnahme an radioaktiven Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung stellen die Strukturteile der ausgedienten Brennelemente aus den Leistungsreaktoren dar, die von Anfang an für die Einlagerung im Endlagerbereich für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle und ausgediente Brennelemente vorgesehen waren.

Im Rahmen dieses Vorhabens werden zwei geologische Typen von flach lagernden Salzformationen betrachtet: Typ „flache Lagerung“ und Typ „Salzkissen“. Für jeden Typ werden jeweils zwei unterschiedliche Einlagerungsvarianten betrachtet. Für den Typ „flache Lagerung“ sind das die Streckenlagerung von POLLUX[®]- sowie anderer Behälter und die horizontale Bohrlochlagerung von Kokillen (BSK-H). Für den Typ „Salzkissen“ sind das die vertikale Bohrlochlagerung von Kokillen (BSK-V) und die direkte Endlagerung von Transport- und Lagerbehältern (TLB) in horizontalen Kurzbohrlöchern.

Das Mengengerüst der wärmeentwickelnden hochradioaktiven Abfälle und ausgedienten Brennelemente, die Endlagerbehälter für die wärmeentwickelnden radioaktiven Abfälle und ausgedienten Brennelemente sowie die Anzahl der Abfallgebände mit Gesamtmasse /-volumina werden in den folgenden Kapiteln beschrieben.

3.1.1 Mengengerüst der ausgedienten Brennelemente und radioaktiven Abfälle aus der Wiederaufarbeitung

3.1.1.1 Mengengerüst der ausgedienten Brennelemente aus den Leistungsreaktoren

Im NaPro /BMUB 2015a/ ist auf Basis des Verzeichnisses radioaktiver Abfälle /BMUB 2013/ der Bestand und die Prognose an ausgedienten Brennelementen aus den Leistungsreaktoren dargestellt. Insgesamt wird eine Menge von etwa 10.500 tSM an ausgedienten Brennelementen aus den Leistungsreaktoren erwartet. Eine Aufteilung dieser Menge in die einzelnen Leistungsreaktortypen wird nicht vorgenommen.

Die Beladung der Endlagerbehälter mit ausgedienten Brennelementen von einzelnen Leistungsreaktoren ist unterschiedlich. Daher ist für die Bestimmung der Anzahl der zu berücksichtigen Endlagerbehälter die Kenntnis über die Aufteilung der Brennelemente auf die einzelnen Leistungsreaktoren nötig. Aus diesem Grund können im Rahmen dieses Vorhabens die Angaben für die ausgedienten Brennelemente aus den Leistungsreaktoren aus dem Nationalen Entsorgungsprogramm /BMUB 2015a/ nicht verwendet werden.

Im Rahmen der Vorläufigen Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben (VSG) wurde das Mengengerüst zusammengestellt. Eine Aufteilung in die einzelnen Reaktortypen wurde vorgenommen. Die Schwermetallmasse aus der VSG ist 55 tSM geringer als die im Nationalen Entsorgungsprogramm. Dies kommt durch Rundungen bei der Berechnung der prognostizierten Brennelementbestände beim Nationalen Entsorgungsprogramm zu Stande. Trotz dieser geringeren Anzahl an tSM wird im Rahmen dieses Vorhabens das Mengengerüst für die ausgedienten Brennelemente aus der VSG berücksichtigt, da in der VSG das Mengengerüst auf die einzelnen Leistungsreaktortypen aufgeteilt wurde und damit die Vergleichbarkeit der Ergebnisse mit KOSINA gewährleistet werden sollen. In der Tabelle 3-1 ist das Mengengerüst der endzulagernden ausgedienten Brennelemente aus deutschen Leistungsreaktoren aufgeführt /GRS 2011b/.

Tabelle 3-1 Mengengerüst der ausgedienten Brennelemente aus Leistungsreaktoren

Leistungsreaktoren		Anzahl BE	Schwermetallmasse [tSM]
DWR	UO ₂	12.450	6.415
	MOX	1.530	765
SWR	UO ₂	14.350	2.465
	MOX	1.250	220
WWER	UO ₂	5.050	580
Gesamt	UO ₂	31.850	9.460
	MOX	2.780	985
	Summe	34.630	10.445

3.1.1.2 Mengengerüst der ausgedienten Brennelemente aus Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken und Forschungsreaktoren

In dem Nationalen Entsorgungsprogramm /BMUB 2015a/ wird keine Angabe über die Art und Menge der ausgedienten Brennelemente aus Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken und Forschungsreaktoren gemacht.

In der VSG wurde das Mengengerüst für die ausgedienten Brennelemente aus Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken und Forschungsreaktoren zusammengestellt. Allerdings sind die Brennelemente des Rossendorfer Forschungsreaktors (RFR) und des Forschungsreaktors Mainz (FRMZ) im Rahmen der VSG nicht berücksichtigt worden, da ein Rücktransport der Brennelemente nach Russland bzw. in die USA angenommen wurde. In dem FuE-Vorhaben "Status quo der Lagerung ausgedienter Brennelemente aus stillgelegten/rückgebauten deutschen Forschungsreaktoren und Strategie (Lösungsansatz) zu deren künftigen Behandlung/Lagerung (LABRADOR)" /DBETEC 2011/ wurde das gesamte Mengengerüst der in Deutschland zu entsorgenden ausgedienten Brennelemente aus den Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken und Forschungsreaktoren zusammengestellt.

Im Rahmen des vorliegenden Berichtes wird das Mengengerüst aus der VSG und das Mengengerüst für den RFR und den FRMZ aus dem Vorhaben LABRADOR berücksichtigt, da einem Rücktransport der Brennelemente des RFR nach Russland nicht zugestimmt wurde /BMU 2010b/ und eine Zwischenlagerung der Brennelemente des FRMZ in Deutschland geplant ist /BMUB 2015b/. In der Tabelle 3-2 ist das zu berücksichtigende Mengengerüst der ausgedienten Brennelemente aus Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken und Forschungsreaktoren zusammengestellt.

Tabelle 3-2 Mengengerüst der ausgedienten Brennelemente aus Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken und Forschungsreaktoren

Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerke und Forschungsreaktoren	Anzahl an Brennelementen/Brennstäben
AVR	288.161 Brennelement-Kugeln
THTR 300	617.606 Brennelement-Kugeln
KNK	2.484 Brennstäbe
Otto-Hahn	52 Brennstäbe
BER II	120 Brennelemente
FRM II	150 Brennelemente
FRMZ	89 Brennelemente
RFR	950 Brennelemente und 1 Brennstabbehälter mit 16 Brennstäben

3.1.1.3 Mengengerüst der radioaktiven Abfälle aus der Wiederaufarbeitung ausgedienter Brennelemente aus den Leistungsreaktoren

Bis zum 30.06.2005 war es möglich, die ausgedienten Brennelemente deutscher Leistungsreaktoren zur Wiederaufarbeitung ins Ausland abzugeben. Ein Großteil der Brennelemente wurde in Frankreich (La Hague) und Großbritannien (Sellafield) wiederaufgearbeitet. Ein vergleichsweise geringer Anteil wurde in der Wiederaufarbeitungsanlage Karlsruhe (WAK) zwischen 1971 und 1990 aufgearbeitet und in der Verglasungseinrichtung Karlsruhe (VEK) verglast.

Die bei der Wiederaufarbeitung angefallenen radioaktiven Abfälle sind in Deutschland endzulagern. Bei diesen Abfällen handelt es sich um

- Kokillen mit verglasten hochradioaktiven Spaltprodukten und Feedklärschlämmen (HAW-Kokille (CSD-V)),
- Kokillen mit verglasten mittelradioaktiven Spülwässern (CSD-B) und
- Kokillen mit kompaktierten mittelradioaktiven Brennelementhülsen, Strukturteilen und Technologieabfällen (CSD-C).

Von der Sellafield Ltd. (ehemals BNFL British Nuclear Fuels) werden ausschließlich Wiederaufarbeitungsabfälle in Form von CSD-V zurückgeführt. Die leicht- und mittelradioaktiven Abfälle werden vollständig durch CSD-V substituiert.

Von AREVA-NC (ehemals COGEMA, La Hague) sind neben HAW-Kokillen (CSD-V) und kompaktierten mittelradioaktiven festen Abfällen (CSD-C) auch radioaktive Reststoffe aus der Betriebswasseraufbereitung (CSD-B) zurückzuführen.

Im Nationalen Entsorgungsprogramm ist das aktuelle Mengengerüst der radioaktiven Abfälle aus der Wiederaufarbeitung dargestellt. Dies wird im Rahmen dieses Vorhabens berücksichtigt. In der Tabelle 3-3 ist das Mengengerüst der Wiederaufarbeitungsabfälle dargestellt /BMUB 2015a/.

Tabelle 3-3 Mengengerüst der Wiederaufarbeitungsabfälle ausgedienter Brennelemente aus den Leistungsreaktoren

Abfallstrom		Kokillen
CSD-V	AREVA-NC	3.024
	Sellafield Ltd.	565
	VEK	140
	Summe	3.729
CSD-B	AREVA-NC	140
CSD-C	AREVA-NC	4.104
Gesamt		7.973

3.1.1.4 Mengengerüst der Strukturteile ausgedienter Brennelemente aus den Leistungsreaktoren

Bei der direkten Endlagerung der ausgedienten Brennelemente aus den Leistungsreaktoren in POLLUX®-10-Behältern oder alternativ in rückholbaren Kokillen werden nur die Brennstäbe der Brennelemente in die Endlagerbehälter verpackt.

Ein Brennelement besteht neben den Brennstäben aus den sogenannten Strukturteilen. Die Brennelemente werden in einer Konditionierungsanlage in Brennstäbe und Strukturteile zerlegt.

Aufgrund des Neutronenflusses im Reaktor sind die Strukturteile aktiviert worden. Sie sind somit ebenfalls bei der Endlagerung von radioaktiven Abfällen zu berücksichtigen.

Ein beispielhaftes DWR-Brennelement besteht aus den in der Tabelle 3-4 aufgelisteten Bestandteilen mit zugehörigen Werkstoffen und Massen /DBE 2006/.

Tabelle 3-4 Bestandteile eines beispielhaften DWR-Brennelementes mit zugehörigen Werkstoffen und Massen

	Werkstoff	Masse [kg]	Ma.-%
Druckfeder, Bolzen	Inc X-750	3,1	0,37
Niederhalterrohr, Mutter, Zylinderstift	1.4541	1,21	0,14
Kopf	1.4541	12,47	1,47
Schraube, Führungsrohr-Stopfen/Mutter	1.4541	1,02	0,12
Fuß	1.4541	11,00	1,30
Stützrohr	1.4541	6,61	0,78
Führungsrohr, Führungsrohr-Hülse	Zr-Alloy/Zry-4	19,4	2,29
Abstandhalter-Hülsen	Zry-4	1,15	0,14
Abstandhalter-Struktur	Zry-4	11,33	1,34
Endstopfen	Zry-4	1,98	0,23
Hüllrohr	Zry-4	155,76	18,38
Abstandhalter-Struktur	Inc 718	1,34	0,16
Druckfeder	1.4568	4,48	0,53
Isoliertablette	Al ₂ O ₃	0,71	0,08
Brennstoff	UO ₂	615,72	72,67
Summe		847,28	100

Die Strukturteile eines beispielhaften DWR-Brennelementes abzüglich der Brennstäbe bestehen aus den in Tabelle 3-5 aufgelisteten Bestandteilen mit zugehörigen Werkstoffen und Massen.

Tabelle 3-5 Bestandteile der Strukturteile eines beispielhaften DWR-Brennelementes mit zugehörigen Werkstoffen und Massen

	Werkstoff	Masse [kg]	Ma.-%
Druckfeder, Bolzen	Inc X-750	3,1	5,00
Niederhalterrohr, Mutter, Zylinderstift	1.4541	1,21	1,95
Kopf	1.4541	12,47	20,11
Schraube, Führungsrohr-Stopfen/Mutter	1,4541	1,02	1,64
Fuß	1.4541	11,00	17,74
Führungsrohr, Führungsrohr-Hülse	Zr-Alloy/Zr-4	19,4	31,28
Abstandhalter-Hülsen	Zr-4	1,15	1,85
Abstandhalter-Struktur	Zr-4	11,33	18,27
Abstandhalter-Struktur	Inc 718	1,34	2,16
Summe		62,02	100,00

Im Rahmen der VSG wurden Aktivierungsrechnungen für die Hüllrohre und das Strukturmaterial von DWR-Brennelementen durchgeführt. Daraus wurde das Radionuklidinventar in den einzulagernden Abfällen abgeleitet. Die errechneten Inventare der DWR-Brennelemente-Hüllrohre und Strukturmaterialien wurden auf SWR-Brennelemente übertragen, was zu einer Überschätzung dieser Inventare führt /GRS 2011b/.

3.1.2 Endlagerbehälter für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle und ausgediente Brennelemente

3.1.2.1 Endlagerbehälter für den Typ „flache Lagerung“

In den folgenden Kapiteln werden die Endlagerbehälter, die für die beiden Einlagerungsvarianten bei dem Typ „flache Lagerung“ geeignet sein könnten, beschrieben.

3.1.2.1.1 Endlagerbehälter für die Streckenlagerung

Für die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle und ausgedienter Brennelemente in horizontalen Strecken werden folgende POLLUX[®]- und Transport- und Lagerbehälter sowie andere Behältertypen ausgewählt:

- Brennstäbe ausgedienter Brennelemente aus den Leistungsreaktoren in POLLUX[®]-Behältern (POLLUX[®]-10),
- radioaktive Abfälle aus der Wiederaufarbeitung in POLLUX[®]-Behältern (POLLUX[®]-9),
- ausgediente Brennelemente aus Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken und Forschungsreaktoren in CASTOR[®]-Behältern,
- Brennelementstrukturteile ausgedienter Brennelemente aus den Leistungsreaktoren in Gussbehältern Typ II (MOSAIK[®]-Behälter).

POLLUX[®]-Behälter wurden für die Endlagerung im Salz konzipiert und ausgelegt. Für die CASTOR[®]-Behälter für die ausgedienten Brennelemente aus Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken und Forschungsreaktoren und die Gussbehälter Typ II für die Brennelemente

mentstrukturteile sind solche Planungen nachzuholen. Im Rahmen dieses Vorhabens wird angenommen, dass die Behälter für die Endlagerung geeignet sind.

POLLUX®-10

Der POLLUX®-10 /DBETEC 2008b/ besteht aus einem Innen- und einem Außenbehälter. Der Innenbehälter besteht aus Feinkornbaustahl (Werkstoff 1.6210), hat eine Wandstärke von 160 mm und wird durch einen geschraubten Primärdeckel und einen geschweißten Sekundärdeckel dicht verschlossen. Der Innenraum ist in fünf Kammern unterteilt, in die je eine Brennstabbüchse mit Brennstäben von 2 Druckwasserreaktoren (DWR)-Brennelementen oder 6 Siedewasserreaktor (SWR)-Brennelementen eingesetzt werden kann. Unter geometrischen Gesichtspunkten können die Brennstabbüchsen auch die gezogenen Brennstäbe von 5 WWER-Brennelementen aufnehmen. In der innen angeordneten, quadratischen Büchse können anstatt der Brennstäbe gepresste Strukturelemente eingebracht werden. Im Rahmen dieses Vorhabens wird der POLLUX®-8 nicht betrachtet. In Abbildung 3-1 ist beispielhaft ein POLLUX®-Behälter mit gezogenen Brennstäben aus 10 DWR-Brennelementen dargestellt.

Der äußere Abschirmbehälter ist wie der Primär- und Sekundärdeckel aus Sphäroguss (Werkstoff 0.7040) hergestellt und hat eine Wandstärke von ca. 270 mm. Dieser Abschirmbehälter hat keine Dichtfunktion zu übernehmen und wird mit einem verschraubten Deckel verschlossen. Im Mantel sind in radial verteilten Bohrungen Stäbe aus Polyethylen zur Verringerung der Neutronendosisleistung der Abfallbehälter eingesetzt.

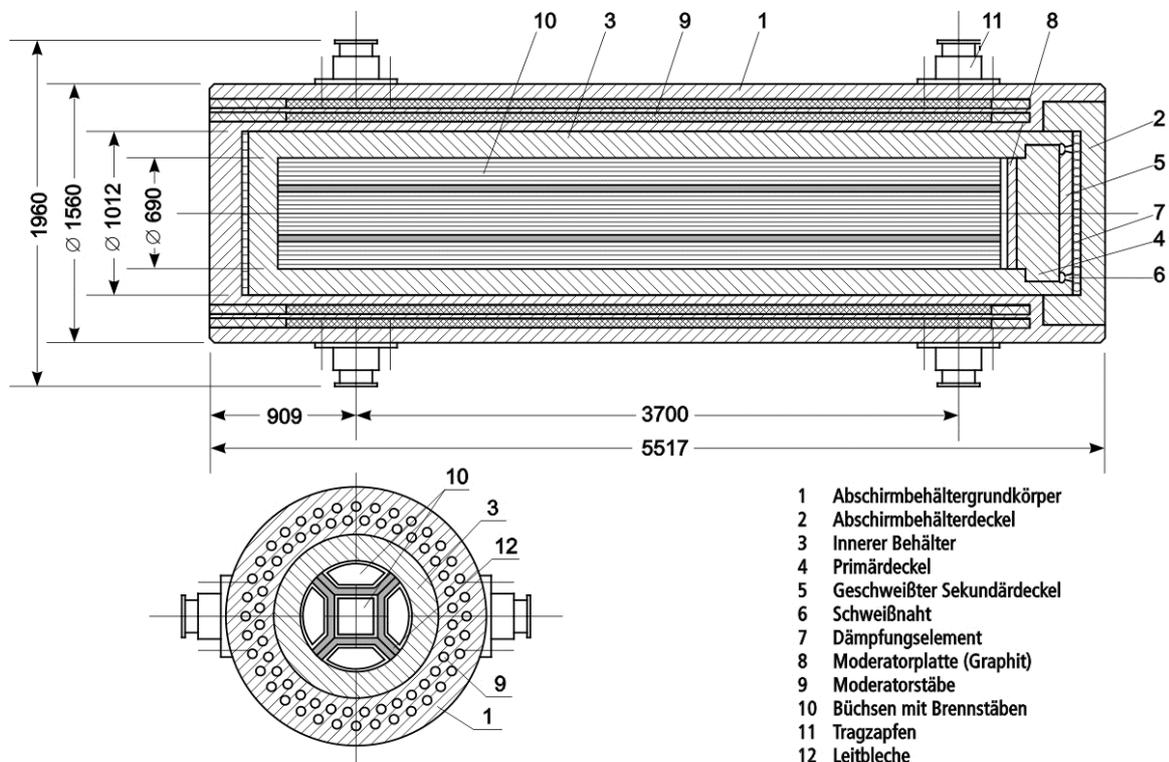


Abbildung 3-1 POLLUX®-Behälter mit gezogenen Brennstäben aus 10 DWR-BE

POLLUX[®]-9

Im Rahmen einer früheren Studie (Systemanalyse Mischkonzept /KfK 1989a/), in der systematisch Endlagerkonzepte für unterschiedliche Mengen von Wiederaufarbeitungsabfällen aus ausgedienten Brennelementen untersucht wurden, wurde ein fiktiver Behälter (HAW-POLLUX[®]) angenommen. Dieser hat ein räumliches Fassungsvermögen von 3 x 3 gestapelten HAW-Kokillen (CSD-V). Der Aufbau des HAW-POLLUX[®] entspricht dem bekannten POLLUX[®]-10 mit stärkerer Abschirmung. Im Folgenden wird der HAW-POLLUX[®] als POLLUX[®]-9 bezeichnet.

In diesem Vorhaben werden folgenden Annahmen getroffen:

- Der prinzipielle Aufbau, die äußeren Abmessungen und die Gesamtmasse des POLLUX[®]-9 entsprechen denen des POLLUX[®]-10.
- Je POLLUX[®]-9 wird von einer Beladung mit 9 CSD-V (HAW-Kokillen), 9 CSD-B oder 9 CSD-C ausgegangen.

CASTOR[®] THTR/AVR, CASTOR[®] KNK

Die CASTOR[®]-Behälter der Typen THTR/AVR und KNK /DBETEC 2011/ bestehen aus einem zylindrischen Grundkörper aus Gusseisen mit Kugelgraphit (Werkstoff 0.7040) und aus zwei übereinanderliegenden, einzeln abgedichteten Deckeln (Primär- und Sekundärdeckel) aus Gusseisen bzw. aus unlegiertem Baustahl (Werkstoff St 52-3 oder TSt E355). Zum Schutz des Deckelsystems vor Staub, Feuchtigkeit und mechanischen Einwirkungen, beispielsweise bei der Handhabung, kann der CASTOR[®]-Behälter mit einer Schutzplatte aus Kohlenstoffstahl (St 52-3) versehen werden. Zur Handhabung wird die deckel- und bodenseitige Mantelfläche der Behälter jeweils mit zwei Tragzapfen ausgerüstet.

Die dichte Umschließung wird vom Behälterkörper, dem Primärdeckel mit Verschraubung und Metalldichtring und der Verschlusskappe im Primärdeckel einschließlich deren Metalldichtring und Verschraubung gebildet oder von dem Behälterkörper und dem Sekundärdeckel mit Metalldichtring und Verschraubung sowie den im Sekundärdeckel vorhandenen Verschlüssen (Verschlussklappe und Blindflansch oder Druckschalter) einschließlich deren Metalldichtring und Verschraubung.

Der CASTOR[®] THTR/AVR enthält einen zylindrischen Innenraum zur Aufnahme einer Stahlkanne mit etwa 2.100 THTR-Brennelementen oder zur Aufnahme von zwei Stahlkannen mit insgesamt 1.900 AVR-Brennelementen.

Beim CASTOR[®] KNK befindet sich im Behälterschachtraum ein Tragkorb, der jeweils neun verschweißte Büchsen mit bestrahlten und unbestrahlten Kernbrennstoffen aufnimmt. Es existieren zwei Tragkorbvarianten. Die Variante 1 nimmt neun Büchsen vom Typ Phenix, die Variante 2 nimmt acht Büchsen vom Typ Phenix und in einer zentralen Tragkorbposition eine Büchse vom Typ OH auf. Die Phenix-Büchsen enthalten Kernbrennstoffe aus der Kompakten Natriumgekühlten Kernreaktoranlage KNK II (33 Stück) oder Kernbrennstoffe aus

Nuklearexperimenten (2 Stück: Mol-1 und Mol-2). In einer OH-Büchse sind Kernbrennstoffe aus dem Nuklearschiff Otto-Hahn verpackt /WTI 2006/.

Die CASTOR®-Behälter vom Typ THTR/AVR und KNK haben eine Zulassung für den Transport und die Zwischenlagerung von ausgedienten Brennelementen aus Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken und Forschungsreaktoren. Der Eignungsnachweis solcher Behälter für die Endlagerung ist noch zu erbringen. Im Rahmen dieses Vorhabens wird angenommen, dass dies möglich ist.

Abbildung 3-2 zeigt die schematische Darstellung eines CASTOR® THTR/AVR (links) und eines CASTOR® KNK (rechts)

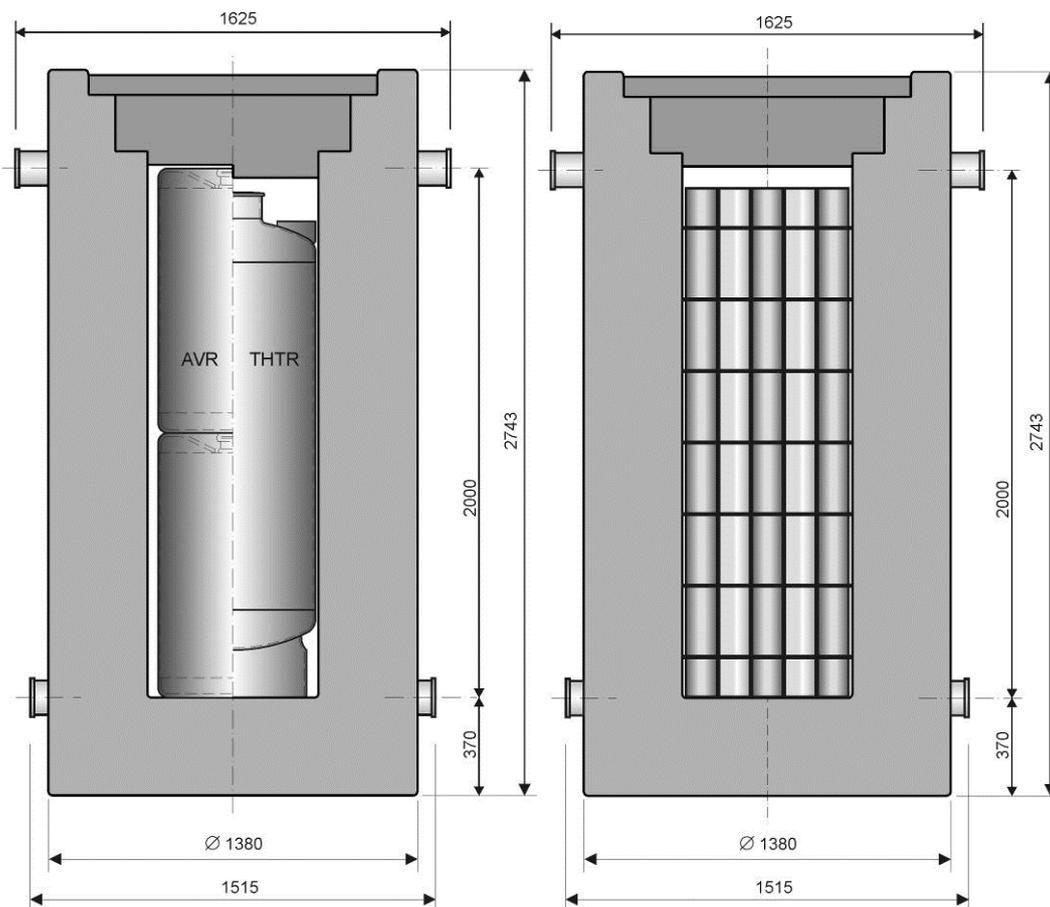


Abbildung 3-2 CASTOR® THTR/AVR mit zwei Stahlkannen für AVR-BE und mit einer Stahlkanne für THTR-BE (links) und CASTOR® KNK mit Phenix-Büchsen (rechts)

CASTOR® MTR 2

Der CASTOR® MTR 2 /DBETEC 2011/ besteht aus einem einteiligen, dickwandigen zylindrischen Behälterkörper mit Boden aus Gusseisen mit Kugelgraphit (Werkstoff 0.7040). Am oberen Zylinderende sind der Primärdeckel (Werkstoff 1.0566 oder 1.4313) und der Sekundärdeckel (Werkstoff 1.0566) angeordnet. Die dichte Umschließung wird gebildet durch den Behälterkörper und den Primärdeckel mit seinem Verschlussdeckel und den zugehörigen

Metалldichtungen und Verschraubungen bzw. alternativ durch den Sekundärdeckel mit seinem Verschlussdeckel und dem Druckschalter oder Blindflansch mit zugehörigen Verschraubungen und Metалldichtungen. Im Behälterinneren ist einer von sechs möglichen Tragkörben angeordnet.

Abbildung 3-3 zeigt eine schematische Darstellung eines CASTOR[®] MTR 2. Es sind verschiedene Beladevarianten mit Brennelementen aus verschiedenen Forschungsreaktoren zulässig, darunter die des Rossendorfer Forschungsreaktors (RFR), des Forschungsreaktors München (FRM II), des Forschungsreaktors Berlin (BER II) und des Forschungsreaktors Mainz (FRMZ).

Für die Eignung des CASTOR[®] MTR 2 als Endlagerbehälter gilt die gleiche Aussage wie für die CASTOR[®]-Behälter der Typen THTR/AVR und KNK.

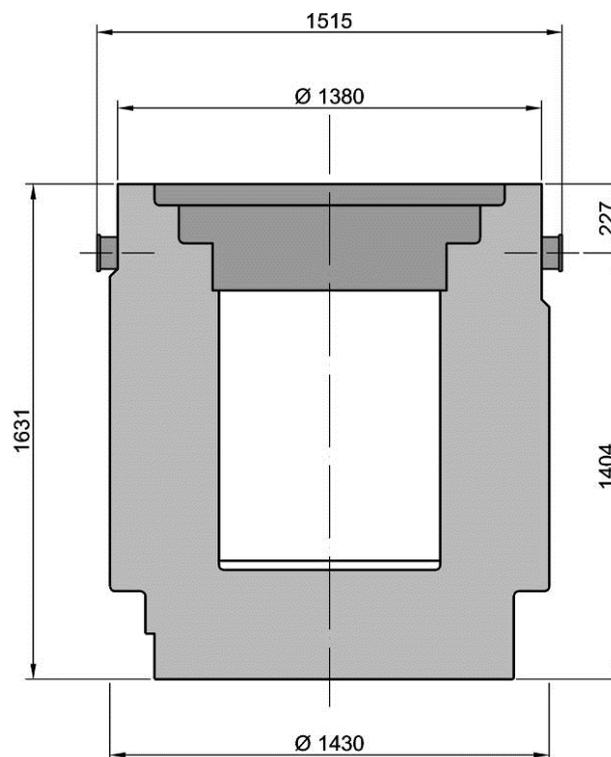


Abbildung 3-3 CASTOR[®] MTR 2

Gussbehälter Typ II (MOSAIK[®]-Behälter)

Beim Gussbehälter handelt es sich um einen zylindrischen dickwandigen Behälter aus Gusswerkstoff (z. B. GGG 40). Es können Behälter mit eingesetzten oder aufliegenden Deckeln bzw. mit unterschiedlichen angeordneten und ausgebildeten Öffnungen im Kopfbereich verwendet werden. Gussbehälter werden mit Deckeln verschlossen, die ebenfalls aus Gusswerkstoff hergestellt und mit dem Behälterkörper zu verschrauben und/oder zu verschweißen sind. In den Deckeln können zusätzliche Öffnungen vorhanden sein. Zwischen Behälterkörper und Deckel befindet sich eine Dichtung. Für die Handhabung müssen entsprechende Anschlagmöglichkeiten an den Gussbehältern vorhanden sein /GRS 2011a/.

Bei Bedarf ist die Verwendung von zusätzlichen Innenauskleidungen in den Endlagerbehältern möglich. Innenauskleidungen werden überwiegend aus Blei hergestellt. Die Verwendung anderer Materialien ist möglich. Derartige Auskleidungen müssen deklariert werden. Abbildung 3-4 zeigt die schematische Darstellung eines Gussbehälters Typ II.

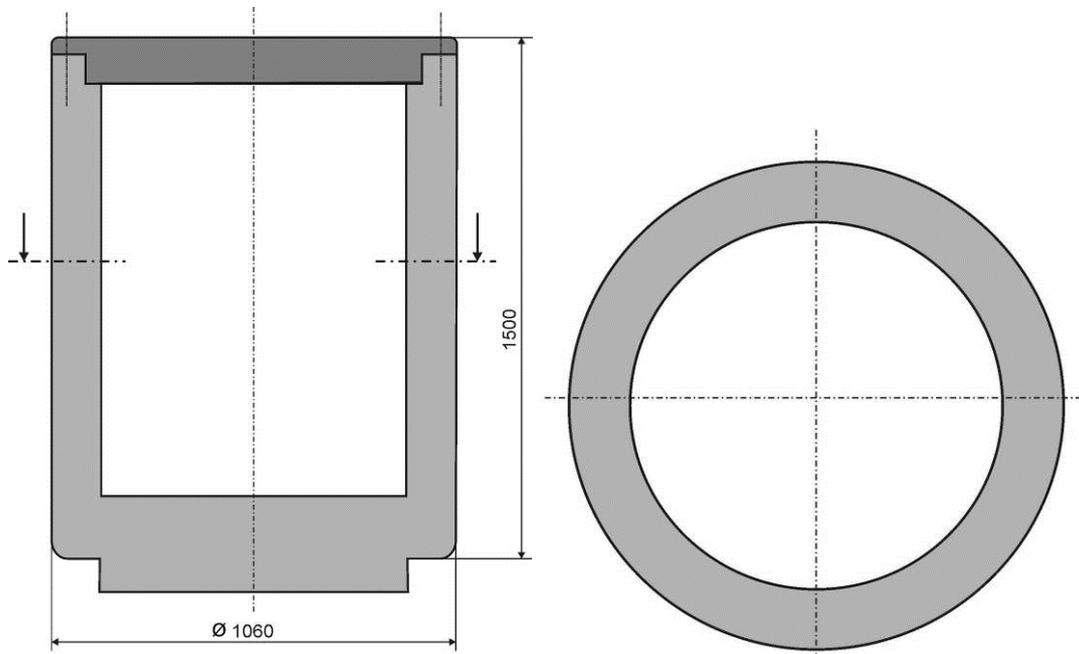


Abbildung 3-4 Gussbehälter Typ II

In der Tabelle 3-6 sind die wichtigsten Daten zu den Endlagerbehältern für die Streckenlagerung zusammengestellt.

Tabelle 3-6 Abmessungen und Masse der Endlagerbehälter für die Streckenlagerung

Endlagerbehälter	Länge/ Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Gebinde- volumen [m ³]	Max. Gebinde- Masse [Mg]	Transport- gebinde- volumen [m ³]
POLLUX [®] -10 POLLUX [®] -g ¹	5.517	1.560 ²	10,55	65	10,55
CASTOR [®] THTR/AVR	2.784	1.380 ²	4,16	26	4,16
CASTOR [®] KNK	2.784	1.380 ²	4,16	26	4,16
CASTOR [®] MTR 2	1.631	1.430 ²	2,62	16	2,62
Gussbehälter Typ II	1.500	1.060	1,3	10	1,3

1: Annahme: Gleiche Dimension und Masse wie POLLUX[®]-10

2: ohne Tragzapfen

3.1.2.1.2 Endlagerbehälter für die horizontale Bohrlochlagerung

Bislang existieren noch keine Konzepte für die Endlagerbehälter für die horizontale Bohrlochlagerung. Im Rahmen dieses Vorhabens werden die Konzepte für die horizontale Bohrlochlagerung erarbeitet. Im ersten Ansatz werden als Endlagerbehälter für die horizontale

le Bohrlochlagerung die für die vertikale Bohrlochlagerung genutzte rückholbare Brennstabkokille (BSK-V) betrachtet. Die BSK-V ist im Kapitel 3.1.2.2.1 beschrieben. Die BSK-V wird im Rahmen dieses Vorhabens für die horizontale Bohrlochlagerung modifiziert (BSK-H).

Bei der Erarbeitung eines Einlagerungs- und Behälterkonzeptes für die horizontale Bohrlochlagerung werden auch die veröffentlichten Ideen und Ergebnisse von internationalen Endlagerprojekten (z. B. Frankreich) berücksichtigt.

3.1.2.2 Endlagerbehälter für den Typ „Salzkissen“

In den folgenden Kapiteln werden die Endlagerbehälter, die für die beiden Einlagerungsvarianten für den Typ „Salzkissen“ geeignet sein könnten, beschrieben.

3.1.2.2.1 Endlagerbehälter für die vertikale Bohrlochlagerung

Für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen vertikalen Bohrlöchern wurden Brennstabkokillen (BSK) für die direkte Endlagerung von ausgedienten Brennelementen und Triple-Packs für die Endlagerung der Abfälle aus der Wiederaufarbeitung vorgesehen. Aus den Forderungen der Rückholbarkeit der Endlagerbehälter während der Betriebsphase des Endlagers /BMU 2010a/ resultierten neue Anforderungen an die Auslegung der BSK und der Triple-Packs für die Bohrlochlagerung. Deshalb wurde ein Behälterlayout gewählt, das erlaubt, die oben genannten Brennelemente/Brennstäbe und auch die Kokillen mit Wiederaufarbeitungsabfällen aufzunehmen. Es handelt sich hierbei um eine rückholbare Brennstabkokille. Die rückholbare Brennstabkokille wird im Rahmen dieses Vorhabens als Brennstabkokille für die vertikale Bohrlochlagerung (BSK-V) bezeichnet. Die BSK-V wird konisch ausgeführt, um bei einer Rückholung das Ziehen der BSK-V aus der Verrohrung zu erleichtern. Die Wandstärke der BSK-V beträgt am unteren Ende 19,5 mm und am oberen Ende 44,5 mm. Zur Handhabung der BSK-V weist der Schweißdeckel einen Tragpilz auf. Zusätzlich ist der Kopf der Kokille mit einer Steigung von ca. 20 ° ausgeführt, um bei der Befüllung der Verrohrung oder Rückholung aus der Verrohrung ein Abfließen des Versatzes um den Tragpilz herum zu erleichtern. In der Abbildung 3-5 ist die BSK-V schematisch dargestellt /GRS 2012a/.

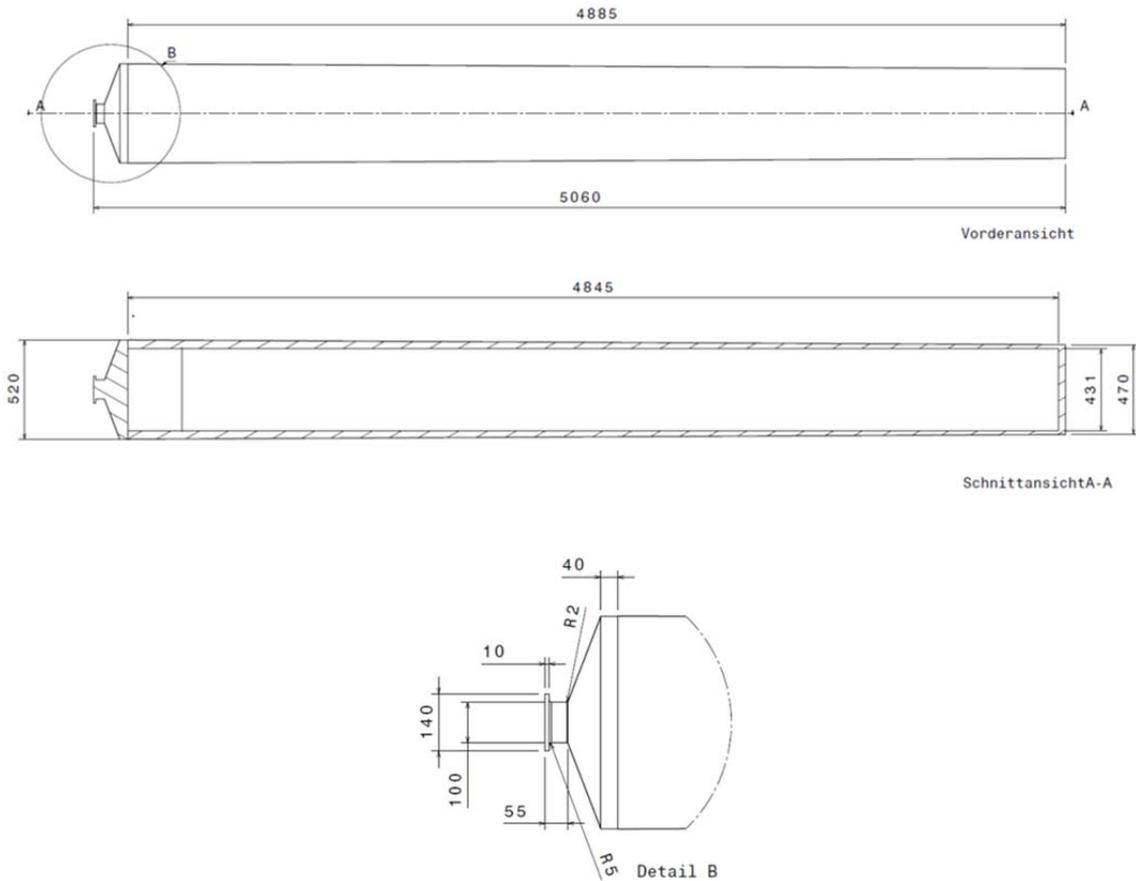


Abbildung 3-5 Brennstabkille für die vertikale Bohrlochlagerung (BSK-V)

Die BSK-V kann die Brennstäbe von 3 DWR-Brennelementen, 9 SWR-Brennelementen, 7,5 WWER-Brennelementen, eine unterschiedliche Anzahl von Brennelementen/Brennstäben von Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken und Forschungsreaktoren oder 3 CSD-V, CSD-B oder CSD-C aufnehmen. Die Brennelemente der Leistungsreaktoren bestehen aus den Brennstäben und den Strukturteilen. In die BSK-V werden lediglich die Brennstäbe verpackt. Die Strukturteile sind anderweitig zu entsorgen. In Rahmen dieses Vorhabens wird davon ausgegangen, dass die kompaktierten Strukturteile ebenfalls in BSK-V verpackt werden. Eine modifizierte BSK-V für die Kannen mit ausgedienten Brennelementen aus den beiden Hochtemperaturreaktoren THTR 300 und AVR werden im Rahmen dieses Vorhabens nicht betrachtet, da der Nachweis noch nicht erbracht ist, ob der größere Durchmesser dieser modifizierten BSK-V technisch machbar ist. In der Tabelle 3-7 sind die wichtigsten Daten der BSK-V zusammengestellt.

Tabelle 3-7 Abmessungen und Masse der BSK-V (Brennstäbe) für die Bohrlochlagerung

Länge/Höhe [mm]	Durchmesser Oben [mm]	Durchmesser Unten [mm]	Gebinde- Volumen [m ³]	Max. Gebinde- masse [Mg]	Transport- gebinde- volumen [m ³]
5.060	520	470	0,94	5,3	7,41 ¹

1: Transferbehälter: Länge 5.570 mm, Durchmesser 1.305 mm (Annahme)

3.1.2.2.2 Endlagerbehälter für die Direkte Einlagerung von Transport- und Lagerbehältern

Bei der direkten Endlagerung von TLB wird die Verwendung von TLB als Endlagerbehälter für die DWR-, SWR- und WWER-Brennelemente in CASTOR® V/19, CASTOR® V/52 und CASTOR® 440/84 und für die Abfälle aus der Wiederaufarbeitung in CASTOR® HAW 20/28 CG, TS 28 V, CASTOR® HAW 28 M und TN 85 betrachtet. Die Brennelemente/Brennstäbe aus den Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken und Forschungsreaktoren sollen wie bei der Streckenlagerung in CASTOR®-Behältern der Typen THTR/AVR, KNK und MTR 2 endgelagert werden. Die TLB 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 dieses Vorhabens wird angenommen, dass dies möglich ist.

CASTOR® V/19

Der CASTOR® V/19 (s. Abbildung 3-6) /GNS 2010a/ ist für den Transport und die Lagerung von bis zu 19 DWR-Brennelementen ausgelegt. Die zulässige Gesamtwärmeleistung beträgt 39 kW und die zulässige Gesamtaktivität 1.900 PBq.

Der Behälter besteht aus einem monolithischen Körper aus Sphäroguss in Form eines einseitig geschlossenen Hohlzylinders, einem Tragkorb zur Aufnahme der Brennelemente und dem übereinander angeordneten Verschlussystem (Primär- und Sekundärdeckel) sowie einer Schutzplatte.

An der äußeren Mantelfläche des Behälterkörpers sind zur Verbesserung der passiven Wärmeabfuhr Radialrippen eingearbeitet. Primär- und Sekundärdeckel sind aus rostfreiem Stahl gefertigt und werden mit dem Behälterkörper fest verschraubt. Sie gewährleisten in Verbindung mit Metaldichtungen einen sicheren Einschluss der Brennelemente. Im Zwischenlager werden die beiden unabhängigen Barrieren des Verschlussystems permanent auf ihre Dichtheit überwacht.

An der boden- und deckelseitigen Mantelfläche des Behälterkörpers sind zum Anbringen von Handhabungseinrichtungen jeweils paarweise Tragzapfen angeschraubt. Während des Transports auf öffentlichen Straßen ist der Behälter (ohne Schutzplatte) mit Stoßdämpfern ausgerüstet.

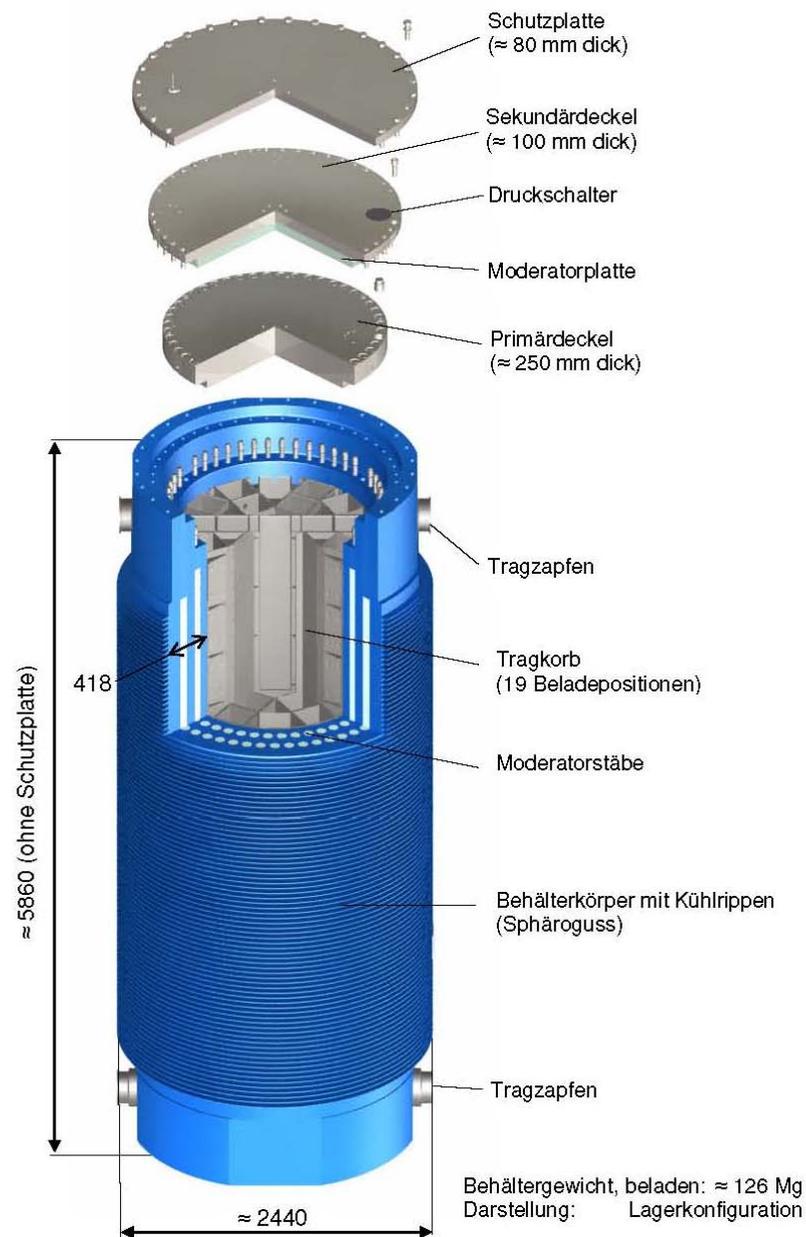


Abbildung 3-6 Transport und Lagerbehälter CASTOR® V/19

CASTOR® V/52

Der CASTOR® V/52 (s. Abbildung 3-7) /GNS 2010a/ ist für den Transport und die Lagerung von bis zu 52 SWR-Brennelementen ausgelegt. Die zulässige Gesamtwärmeleistung beträgt 40 kW und die zulässige Gesamtaktivität 1.730 PBq.

Die Beschreibung des CASTOR® V/19 hinsichtlich Behälteraufbau, Tragkorb, Verschlusssystem, Neutronenabschirmung, Handhabung, Tragzapfen und Transport mit Stoßdämpfern gilt

gleichermaßen für den CASTOR® V/52. Lediglich die Abmessungen und Gewichte weichen von denen des CASTOR® V/19 ab (siehe Tabelle 3-8).

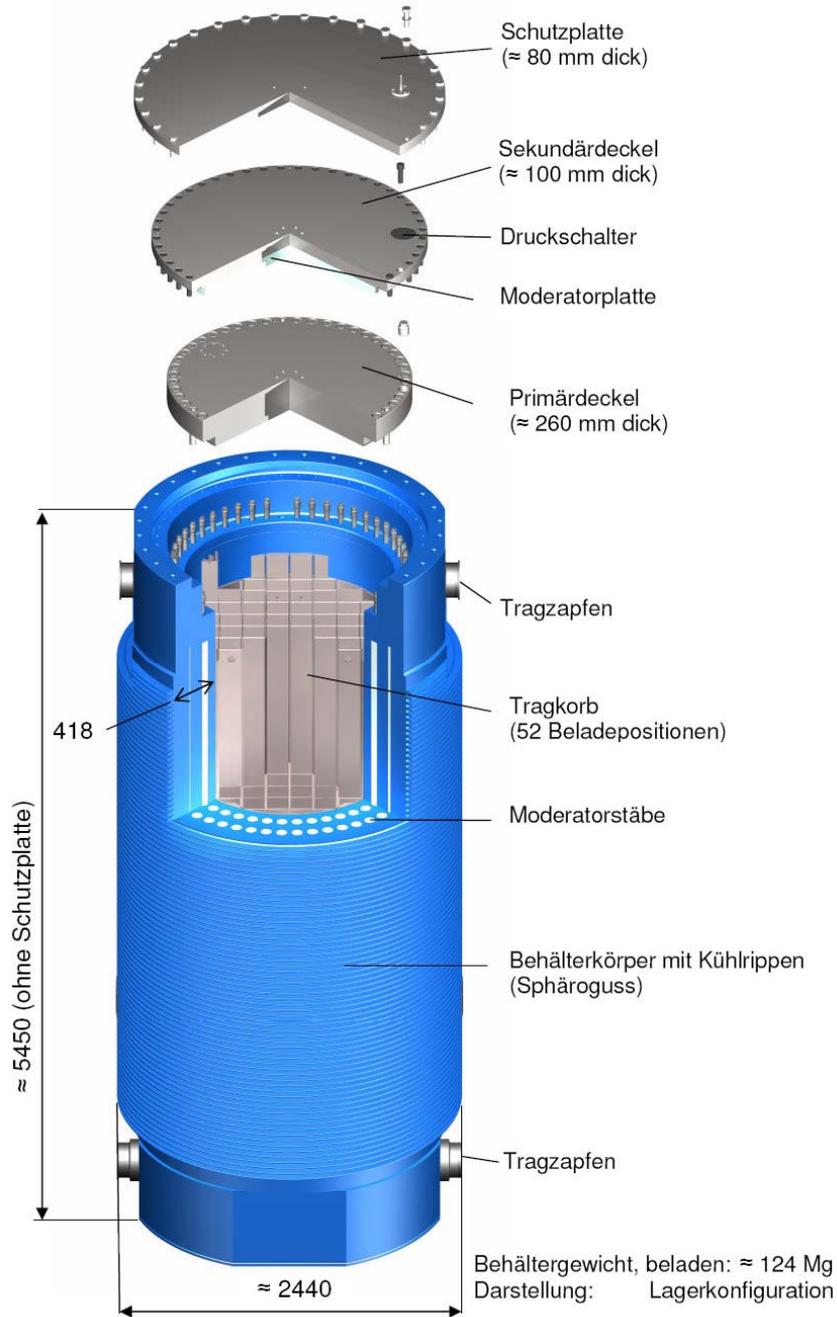


Abbildung 3-7 Transport und Lagerbehälter CASTOR® V/52

CASTOR® 440/84

Der CASTOR® 440/84 (siehe Abbildung 3-8) /GNS 2010a/ ist für den Transport und die Lagerung von bis zu 84 DWR-Brennelementen des Typs WWER 70 oder WWER 440 ausgelegt. Die zulässige Gesamtwärmeleistung beträgt 21 kW.

Die Beschreibung des CASTOR® V/19 hinsichtlich Behälteraufbau, Tragkorb, Verschlusssystem, Neutronenabschirmung, Handhabung, Tragzapfen und Transport mit Stoßdämpfern gilt gleichermaßen für den CASTOR® 440/84. Lediglich die Abmessungen und Gewichte weichen von denen des CASTOR® V/19 ab (siehe Tabelle 3-8).

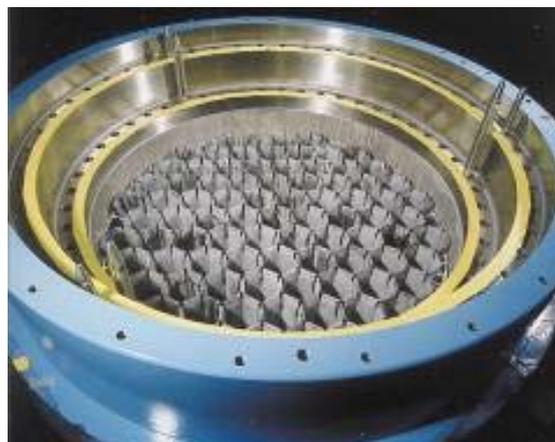


Abbildung 3-8 Transport und Lagerbehälter CASTOR® 440/84

CASTOR® HAW 20/28 CG und TS 28 V

Die Behälter CASTOR® HAW 20/28 CG und TS 28 V sind für die Aufnahme von 20 oder 28 Kokillen mit verglastem radioaktivem Abfall (CSD-V bzw. HAW-Kokille) aus der Wiederaufarbeitung ausgedienter Brennelemente ausgelegt.

Beide Behälter sind für den Transport der Wiederaufarbeitungsabfälle aus Frankreich und Großbritannien nach Deutschland und ihre anschließende Zwischenlagerung in Deutschland vorgesehen. Die Behälter unterscheiden sich in ihrer Auslegung und in ihrer Abschirmung:

- CASTOR® HAW 20/28 CG (s. Abbildung 3-9) /GNS 2010a/ besteht aus einem dickwandigen zylindrischen Sphärogusskörper mit eingearbeiteten Radialrippen an der Behälteroberfläche. Am Kopf- und Fußende sind Tragzapfen zur Handhabung angebracht. Zwei verschiedene Tragkorbkonstruktionen ermöglichen die Aufnahme von 20 oder 28 Kokillen. Ein Doppeldeckelsystem aus Schmiedestahl mit Metall- und Elastomerdichtungen wird mit dem Behälterkörper fest verschraubt.
- Die Transportkonfiguration des TS 28 V (s. Abbildung 3-10) /GNS 2010a/ basiert auf einer Entwicklung der Firma Transnucléaire, Paris. Für den Einsatz als Transport- und Lagerbehälter in Deutschland wurde er von der Gesellschaft für Nuklear-Behälter (GNB) entsprechend den Anforderungen der deutschen Behörden weiterentwickelt. Der Behälter besteht aus einem Grundkörper aus Schmiedestahl mit einem Außenmantel aus Stahl, der durch angeschweißte Kupferstege am Grundkörper befestigt ist. Der Boden aus Schmiedestahl ist angeschweißt. Zwei austauschbare Einsatzkörbe sind für die Aufnahme von 20 oder 28 Kokillen ausgelegt. Das Doppeldeckelsystem des TS 28 V besteht aus Schmiedestahl mit Metalldichtungen und edelstahlplattierten Dichtflächen.

Das Doppeldeckelsystem beider Behälter gewährleistet den sicheren Einschluss der Kokillen und des darin befindlichen verglasten Abfalls während der Zwischenlagerung.

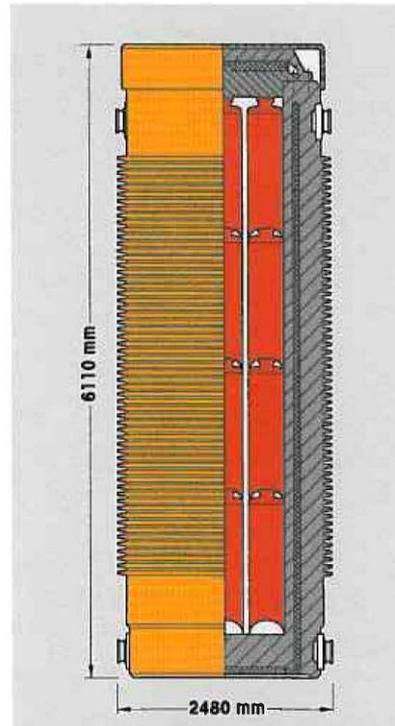


Abbildung 3-9 Transport und Lagerbehälter CASTOR® HAW 20/28

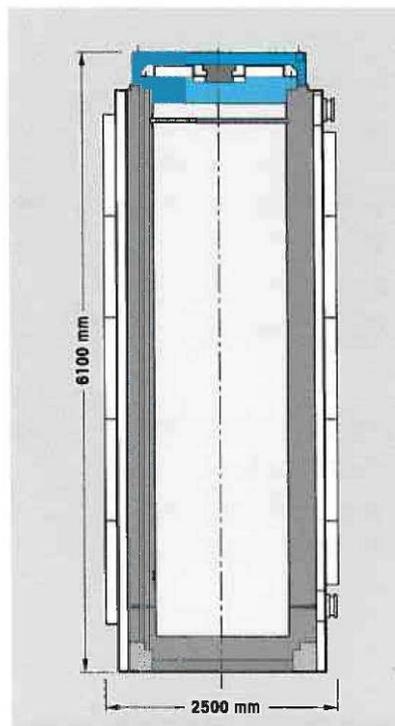


Abbildung 3-10 Transport und Lagerbehälter TS 28 V

TN 85

Der Behälter TN 85 (s. Abbildung 3-11) ist für den Transport und die Zwischenlagerung von jeweils 28 Kokillen mit verglastem hochradioaktivem Abfall (CSD-V bzw. HAW-Kokille) von TN International, einer Tochtergesellschaft von Areva NC, entwickelt worden /GNS 2010b/. In seiner Konstruktion ähnelt er dem TS 28 V. Der Behälter hat eine Gesamthöhe von 6.200 mm und einen Durchmesser von 2.480 mm.

Der Behälter besteht aus einem Schmiedestahlkörper und einem Schmiedestahlboden, der angeschweißt ist. Als Kühlrippen werden Aluminiumprofile verwendet, die mit dem Behälterkörper verschraubt sind. Insgesamt kommen 40 Profile mit je drei Kühlrippen zum Einsatz. Zwischen dem Behälterkörper und den Aluminiumprofilen wird zur Abschirmung Harz und Blei eingesetzt. Beide Materialien sind durch eine Stahlplatte voneinander getrennt. Er ist bei der Zwischenlagerung mit einem Doppeldeckelsystem verschlossen.

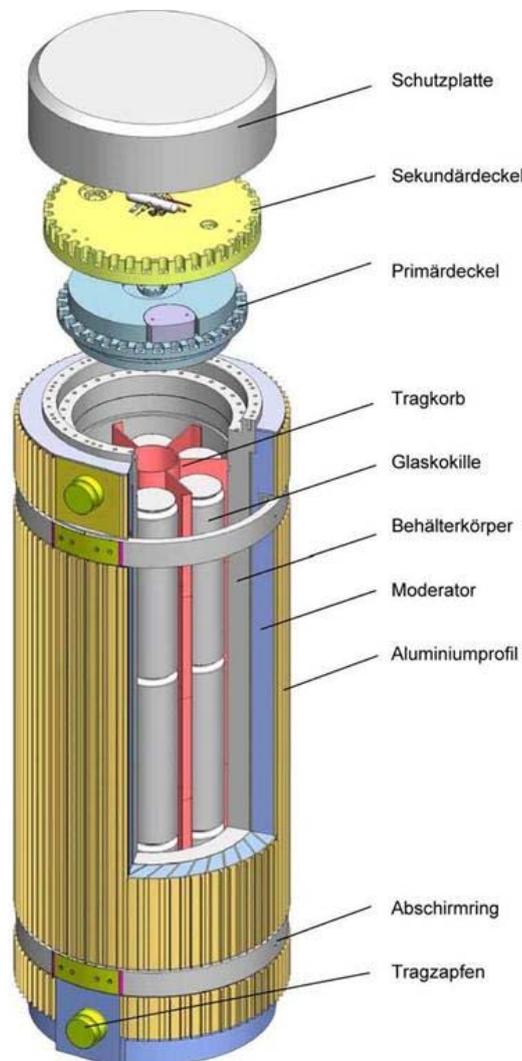


Abbildung 3-11 Transport und Lagerbehälter TN 85

CASTOR® HAW 28 M

Der Behälter CASTOR® HAW 28 M (s. Abbildung 3-12) ist für die Aufnahme von 28 Kokillen mit verglastem hochradioaktivem Abfall (CSD-V bzw. HAW-Kokille) ausgelegt. Die zulässige Gesamtwärmeleistung beträgt 56 kW und die zulässige Gesamtaktivität 1.270 PBq.

Der CASTOR® HAW 28 M ist für den Transport der hochradioaktiven Wiederaufarbeitungsabfälle aus Frankreich und Großbritannien nach Deutschland und ihre anschließende Zwischenlagerung in Deutschland vorgesehen.

Nach derzeitigen Planungen ist der CASTOR® HAW 28 M auch für den Transport von 28 Kokillen mit verglastem mittlerradioaktivem Abfall (CSD-B) aus der Wiederaufarbeitung in Frankreich nach Deutschland und ihre anschließende Zwischenlagerung in Deutschland vorgesehen.

Der Behälter besteht aus einem dickwandigen zylindrischen Sphärogusskörper. Zur Neutronenabschirmung sind in der Behälterwand in Bohrungen Stangen aus Polyethylen angeordnet. Zusätzlich sind Abschirmelemente im Korb, eine Moderatorplatte im Bodenbereich und eine mehrteilige Moderatorplatte an der Oberseite des Primärdeckels angebracht. In der Lagerkonfiguration ist der Sekundärdeckel mit dem Behälterkörper fest verschraubt.

An der äußeren Mantelfläche des Behälterkörpers sind zur Verbesserung der passiven Wärmeabfuhr Radialrippen eingearbeitet. An der boden- und deckelseitigen Mantelfläche des Behälterkörpers sind zur Handhabung und zur Fixierung des Behälters beim Transport jeweils paarweise Tragzapfen angebracht. Während des Transports auf öffentlichen Straßen ist der Behälter mit Stoßdämpfern ausgerüstet.

Es ist vorgesehen, die CSD-C in den neu entwickelten Behältern TGC 36 zu transportieren. Da dieser Behälter bislang noch nicht zugelassen ist, wird im Rahmen dieses Vorhabens der CASTOR® HAW 28 M für die CSD-C berücksichtigt.

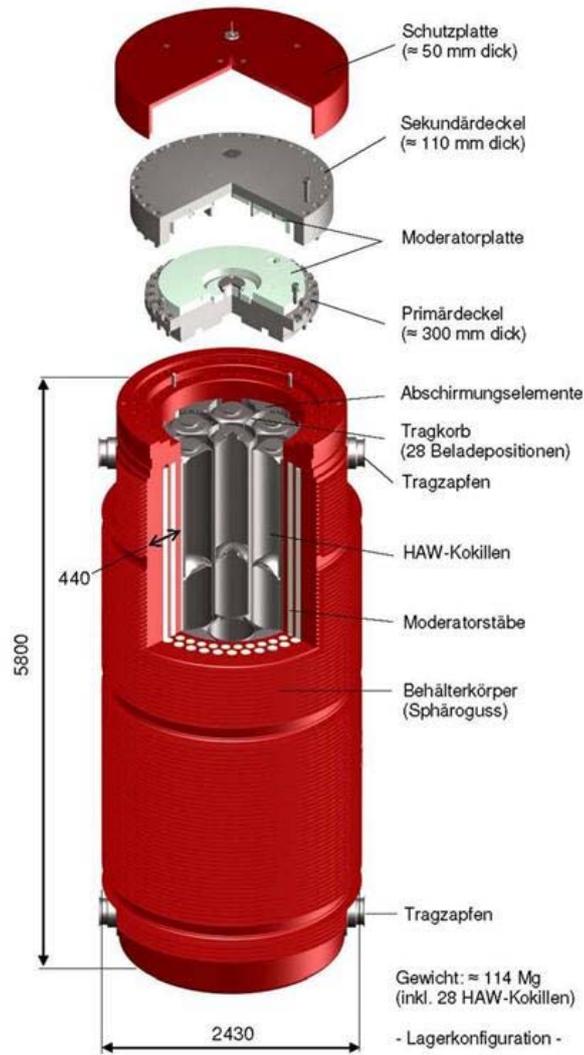


Abbildung 3-12 Transport und Lagerbehälter CASTOR® HAW 28 M

In Tabelle 3-8 sind die wichtigsten Daten für die Endlagerbehälter für die Direkte Einlagerung von TLB zusammengestellt.

Tabelle 3-8 Abmessungen und Masse der Endlagerbehälter für die direkte Endlagerung von Transport- und Lagerbehältern

Endlagerbehälter	Länge/ Höhe [mm]	Durch- messer [mm]	Gebinde- volumen [m ³]	Max. Gebinde- masse [Mg]	Transport- gebinde- volumen [m ³]
CASTOR [®] V/19	5.940 ¹	2.440	27,8	126	27,8
CASTOR [®] V/52	5.530 ¹	2.440	25,9	124	25,9
CASTOR [®] 440/84	4.080	2.660	22,7	116	22,7
CASTOR [®] HAW 20/28 CG	6.110 ¹	2.480	29,5	112	29,5
TS 28 V	6.100 ¹	2.500	29,9	112	29,9
CASTOR [®] HAW 28M	6.122 ¹	2.430	28,4	115	28,4
TN 85	6.200 ¹	2.480	29,9	110	29,9

1: inkl. Schutzplatte

Um eine Kritikalität z. B. des CASTOR[®]-Behälters im Endlager auf lange Sicht zu verhindern, müssen die Hohlräume dieses Behälters verfüllt werden. Dies kann z. B. mit Magnetit geschehen. Für die maximale Gebindemasse der verfüllten Behälter werden 160 Mg angenommen. Alle anderen mit Brennelementen befüllten TLB sind hinsichtlich des Kritikalitätsfalls noch zu überprüfen. Dies geschieht nicht im Rahmen dieses Vorhabens.

3.1.3 Anzahl der Abfallgebinde mit Gesamtmasse/-volumina

Auf Basis des in Kapitel 3.1.1.1 bis 3.1.1.4 dargestellten Mengengerüsts wurde die Anzahl der entsprechenden Abfallgebinde für die jeweilige Einlagerungsvariante wie in Tabelle 3-9 bis Tabelle 3-12 dargestellt abgeschätzt. Die Tabelle 3-13 bis Tabelle 3-15 enthalten die dazugehörigen Daten über die Gesamtmassen und -volumina der Abfallgebinde für die jeweilige Einlagerungsvariante.

Tabelle 3-9 Anzahl der Endlagerbehälter für die Streckenlagerung

Abfallart		Endlagerbehälter	
		Bezeichnung	Anzahl
Ausgediente Brennelemente aus Leistungsreaktoren	DWR	POLLUX®-10	1.398
	SWR		520
	WWER		202
	Summe		2.120
Ausgediente Brennelemente aus Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken und Forschungsreaktoren	AVR	CASTOR® THTR/AVR	152
	THTR 300		305
	KNK	CASTOR® KNK	4
	Otto-Hahn		
	BER II	CASTOR® MTR 2	20
	FRM II		30
	FRMZ		1
	RFR		18
Summe	CASTOR®	530	
CSD-V	AREVA-NC	POLLUX®-9	336
	Sellafield Ltd.		63
	VEK		16
	Summe		415
CSD-B	AREVA-NC		16
CSD-C	AREVA-NC		456
Brennelement-Strukturteile	Summe	Gussbehälter Typ II	2.620

Tabelle 3-10 Anzahl der Endlagerbehälter für die horizontale Bohrlochlagerung

Abfallart		Endlagerbehälter	
		Bezeichnung	Anzahl
Ausgediente Brennelemente aus Leistungsreaktoren	DWR	BSK-H (1. Ansatz)	4.660
	SWR		1.734
	WWER		674
	Summe		7.068
Ausgediente Brennelemente aus Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken und Forschungsreaktoren	AVR		152
	THTR 300		305
	KNK		5
	Otto-Hahn		
	BER II		26
	FRM II		30
	FRMZ		1
	RFR		10
Summe	529		
CSD-V	AREVA-NC	1.008	
	Sellafield Ltd.	189	
	VEK	47	
	Summe	1.244	
CSD-B	AREVA-NC	47	
CSD-C	AREVA-NC	1.368	
Brennelement-Strukturteile	Summe	874	

Tabelle 3-11 Anzahl der Endlagerbehälter für die vertikale Bohrlochlagerung

Abfallart		Endlagerbehälter	
		Bezeichnung	Anzahl
Ausgediente Brennelemente aus Leistungsreaktoren	DWR	BSK-V	4.660
	SWR		1.734
	WWER		674
	Summe		7.068
Ausgediente Brennelemente aus Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken und Forschungsreaktoren	AVR		152
	THTR 300		305
	KNK		5
	Otto-Hahn		
	BER II		26
	FRM II		30
	FRMZ		1
	RFR		10
Summe	529		
CSD-V	AREVA-NC	1.008	
	Sellafield Ltd.	189	
	VEK	47	
	Summe	1.244	
CSD-B	AREVA-NC	47	
CSD-C	AREVA-NC	1.368	
Brennelement-Strukturteile	Summe	874	

Tabelle 3-12 Anzahl der Endlagerbehälter bei der direkten Endlagerung von Transport- und Lagerbehältern

Abfallart		Endlagerbehälter		
		Bezeichnung	Anzahl	
Ausgediente Brennelemente aus Leistungsreaktoren	DWR	CASTOR [®] V/19	736	
	SWR	CASTOR [®] V/52	300	
	WWER	CASTOR [®] 440/84	61	
	Summe	CASTOR [®]	1.097	
Ausgediente Brennelemente aus Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken und Forschungsreaktoren	AVR	CASTOR [®] THTR/AVR	152	
	THTR 300		305	
	KNK	CASTOR [®] KNK	4	
	Otto-Hahn			
	BER II	CASTOR [®] MTR 2	20	
	FRM II		30	
	FRMZ		1	
	RFR		18	
Summe	CASTOR [®]	530		
CSD-V	AREVA-NC	CASTOR [®] HAW 20/28 CG CASTOR [®] HAW 28M TN 85 TS 28 V	108	
		Sellafield Ltd.	CASTOR [®] HAW 28M	21
		VEK	CASTOR [®] HAW 20/28 CG	5
		Summe	CASTOR [®]	134
CSD-B	AREVA-NC	CASTOR [®] HAW 28M	5	
CSD-C	AREVA-NC	CASTOR [®] HAW 28M	147	

Tabelle 3-13 Gesamtmasse und -volumen der Endlagerbehälter für die Streckenlagerung

Abfallgebinde	Anzahl	Gesamtvolumen [m ³]	Gesamtmasse [Mg]
POLLUX [®] -10	2.120	22.367	137.800
POLLUX [®] -9	906	9.359	57.655
CASTOR [®] -Behälter ¹	530	2.099	13.090
Gussbehälter Typ II	2.620	3.406	26.200
Summe	6.176	37.231	234.745

1: CASTOR[®] THTR/AVR, CASTOR[®] KNK, CASTOR[®] MTR 2

Tabelle 3-14 Gesamtmasse und -volumen der Endlagerbehälter für die horizontale bzw. vertikale Bohrlochlagerung

Abfallgebinde	Anzahl	Gesamtvolumen [m ³]	Gesamtmasse [Mg]
BSK-H/-V	11.130	10.463	Keine Angabe

Tabelle 3-15 Gesamtmasse und -volumen der Endlagerbehälter für die direkte Einlagerung von Transport- und Lagerbehältern

Abfallgebinde	Anzahl	Gesamtvolumen [m ³]	Gesamtmasse [Mg]
CASTOR [®] V/19	736	20.461	117.760
CASTOR [®] V/52	300	7.770	48.000
CASTOR [®] 440/84	61	1.385	9.760
TLB ¹	289	8.270	32.488
CASTOR [®] -Behälter ²	530	2.099	13.090
Summe	1.916	39.985	221.098

1: CASTOR[®] HAW 20/28 CG, CASTOR[®] HAW 28M, TN 85, TS 28 V

2: CASTOR[®] THTR/AVR, CASTOR[®] KNK, CASTOR[®] MTR 2

3.2 Beschreibung salinar geprägter Schichtenfolgen in Deutschland

Der Kenntnisstand zur räumlichen Verbreitung und lithologischen Zusammensetzung sowie zu den geologischen Lagerungsverhältnissen der flach lagernden Steinsalzfolgen in Deutschland wurde zuletzt von der BGR zusammengefasst /BGR 2014/. Im Fokus dieses Berichtes standen salinare Formationen, in denen regional verbreitet flach lagernde, mindestens mehrere zehner Meter mächtige Steinsalzsichten vorkommen. Eine Abfolge derartiger Steinsalzsichten innerhalb einer Salinar-Formation wird als Steinsalzlager oder Steinsalzfolge bezeichnet. Sie kommen in Deutschland in den einzelnen Formationen der stratigraphischen Einheiten Rotliegend, Zechstein, Röt, Muschelkalk, Keuper, Malm und Tertiär vor (Abbildung 3-13).

System	Serie / Gruppe	internationale Stufe / Subgruppe / Formation		
Quartär	ca. 1,8 Ma			
Neogen	Pliozän	Ober		
		Unter		
	Miozän	Ober		
		Mittel		
Paläogen	Oligozän	Chattium		
		Rupelium		
		Priabonium	Tertiär-Salinar	
	Eozän	Bartonium		
		Lutetium		
		Ypresium		
	Paläozän	ca. 65 Ma	Thanetium	
			Seelandium	
			Danium	
			Maastrichtium	
Kreide	Oberkreide	Campanium		
		Santonium		
		Coniacium		
		Turonium		
		Cenomanium		
	Unterkreide	Albium		
		Aptium		
		Barremium		
		Hauterivium		
		Valanginium		
Jura	Oberjura (Malm)	ca. 142 Ma		
		Tithonium	Malm-Salinar	
		Kimmeridgium		
	Mitteljura (Dogger)	Oxfordium		
		Callovium		
		Bathonium		
		Bajocium		
	Unteljura (Lias)	Aalenium		
		Toarcium		
		Pliensbachium		
Trias	Keuper	ca. 200 Ma		
		Extre-Formation		
		Amstadt-Formation		
		Weser-Formation	Keuper-Salinar	
		Stuttgart-Formation		
	Muschelkalk	Grabfeld-Formation		
		Erfurt-Formation		
		Oberer Muschelkalk		
	Buntsandstein	Mittlerer Muschelkalk	Muschelkalk-S.	
		Unterer Muschelkalk		
		Röt-Formation	Röt-Salinar	
		Solling-Formation		
		Hardegsen-Formation		
Perm	Zechstein	ca. 251 Ma		
		Detfurth-Formation		
		Volpriehausen-Formation		
		Quickborn-Formation		
		Bernburg-Formation		
		Calvörde-Formation		
		Fulda-Formation		
	Friesland-Formation			
	Rotliegend	Ohre-Formation	Zechstein-Salinar (inklusive Alpines Salinar)	
		Aller-Formation		
Leine-Formation				
	Werra-Formation			
	Elbe-Subgruppe	Rotliegend-Salinar		
	Havel-Subgruppe			
	Müritz-Subgruppe			
	Altmark-Subgruppe			

 Vorkommen von Steinsalzlagern

Abbildung 3-13 Stratigraphische Position und Bezeichnung der salinaren Schichtenfolgen mit Steinsalzlagern in Deutschland (/Menning 2002/ verändert, aus: /BGR 2014/)

Die ältesten Steinsalzlager wurden in Deutschland in der Schichtenfolge des **Rotliegend-Salinars** nachgewiesen. Zahlreiche Steinsalzlager sind in die meist feinkörnigen und tonreichen Schichtenfolgen der Dethlingen- und Hannover-Formationen eingeschaltet und besitzen unterschiedliche Ausdehnungen sowie regional variierende Mächtigkeiten /Plein 1995/, /Schröder 1995/. In der Steinsalz-Tonstein-Wechselfolge ist die Mächtigkeit der Steinsalzlager meist auf wenige Meter beschränkt, nur im Bereich der Elbmündung und in Schleswig-Holstein wurden konkordant lagernde Rotliegend-Steinsalzfolgen mit wenigen zehner Meter Mächtigkeit nachgewiesen /Gralla 1988/, /Schröder 1995/, /Gaupp 2000/, /BGR 1982/, /Katzung 1991/. Im gesamten Verbreitungsgebiet der Steinsalzlager des Rotliegend liegen die konkordanten Steinsalzlager deutlich tiefer als 4000 m u. NN /Doornenbal 2010/.

Die Steinsalzlager des **Zechsteins** sind Teil einer Schichtenfolge, die in sieben Formationen unterteilt ist: Werra-, Staßfurt-, Leine-, Aller-, Ohre-, Friesland- und Fulda-Formation /Käding 2005/, /McCann 2008/, /Doornenbal 2010/. Es handelt sich dabei um zyklische Abfolgen, bestehend aus basalen feinklastischen Ablagerungen gefolgt von Karbonaten, die durch Evaporite überlagert werden. Die Abscheidung der Salzminerale erfolgt in der Reihenfolge zunehmender Löslichkeit (Anhydrit, Steinsalz, z. T. Kali- und Magnesiumsalze). In allen sieben Formationen des Zechsteins sind Steinsalzfolgen unterschiedlicher Mächtigkeit und Verbreitung entstanden /BGR 2003/, die in Norddeutschland sowie teilweise bis nach Thüringen, Süd-Hessen und Nord-Bayern nachgewiesen wurden.

Die Verbreitung der Halit-führenden Schichtenfolgen des Zechsteins wurde durch die Ausdehnung des NW-SE streichenden Norddeutschen Beckens¹ bestimmt, das sich durch Schwellen in mehrere Subbecken gliederte. Die südliche Verbreitungsgrenze der salinaren Fazies verlief etwa vom südöstlichen Brandenburg mit dem Niederlausitz-Subbecken² über die weit nach Süden reichenden Subbecken Thüringer Becken und Werra-Fulda-Becken. Letztere wurden durch mehrere Schwellenregionen voneinander separiert, die vom Thüringer Wald über die Eichsfeld-Schwelle bis nördlich des Harzes reichten. Im Nordwesten Deutschlands bildeten die Münsterland-Scholle und nördlich davon die Hunte-Schwelle eine nach Norden ins Becken vorstoßende Schwellenregion. Westlich davon, im Emsland und in der Niederrheinischen Bucht (Niederrhein-Subbecken), sind die marinen Ablagerungen des Zechsteinmeeres erneut bis weit nach Süden verbreitet /BGR 2003/, /Paul 2006/ (Abbildung 3-14).

¹ Teil des südlichen Permbeckens

² Lausitzer Senke, Lausitzer Lagune, Nordsudetische Senke

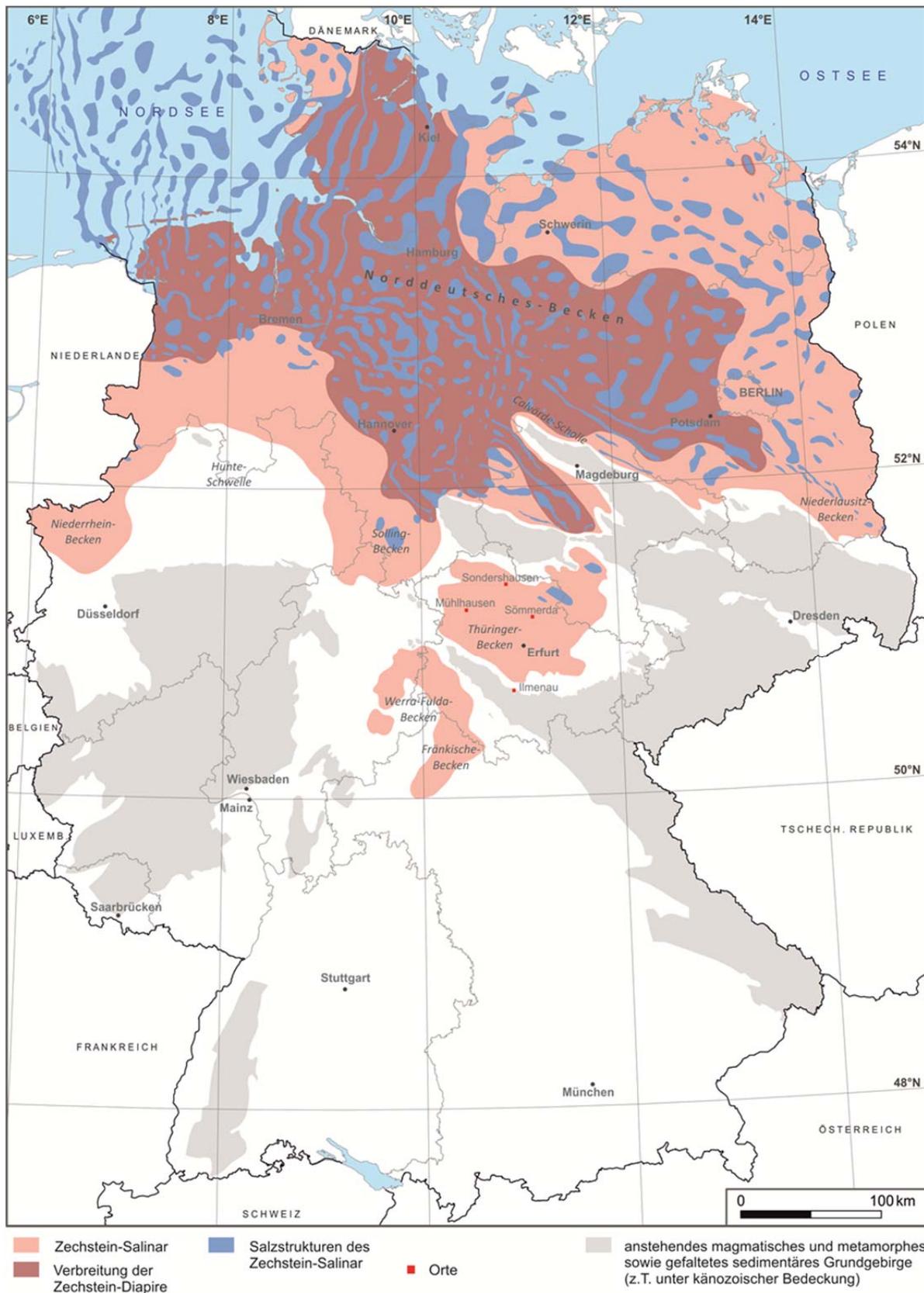


Abbildung 3-14 Schematische on-shore-Verbreitung der Halit-führenden Zechstein-Salinare in Deutschland (nach: /Kulick 1984/, /Freudenberger 1996/, /BGR 2004/ , Verbreitung der Zechsteinstrukturen nach /BGR 2014/)

Die Basis der Steinsalzlager kann am Südrand des Norddeutschen Beckens (z. B. in Mitteldeutschland) in wenigen hundert Metern Tiefe liegen, zum Beckenzentrum sinkt sie in Tiefen von über 5.000 m ab /BGR 2004/. In Abhängigkeit von der paläogeographischen Position des Ablagerungsraums variieren Lithologie und Mächtigkeit der Steinsalzlager. Die Steinsalzlager der Werra-, Staßfurt- und Leine-Formation weisen die größten Mächtigkeiten auf, wohingegen die Steinsalzlager der Aller-, Ohre-, Friesland- und Fulda-Formation meist nur wenige zehner Meter mächtig sind und heute nur in den großen Tiefen des Beckenzentrums vorkommen.

Insbesondere im Werra-Fulda-Becken, im Niederrhein-Gebiet, im Thüringer Becken sowie in SE-Brandenburg kann das Steinsalzlager in der Werra-Formation lokal über 400 m mächtig werden. Durch eingeschaltete Kaliflöze wird es meist weiter untergliedert. Im Niederrhein-Gebiet ist das Steinsalzlager durch große Mächtigkeitsschwankungen gekennzeichnet. Im benachbarten südlichen Emsland bis nach Süddoldenburg befinden sich die flach lagernden Steinsalzfolgen in sehr großer Tiefe.

Insbesondere in SE-Brandenburg, im Thüringer Becken, im Solling-Becken und im Gebiet der Calvörde-Scholle sind die Steinsalzlager der Staßfurt-Formation durch mehrere hundert Meter Mächtigkeit und eine vergleichsweise geringe Tiefenlage gekennzeichnet. In der Staßfurt-Formation kommen Kalisalze in Form des überwiegend carnallitisch ausgebildeten Kaliflöztes Staßfurt vor. Das Steinsalzlager der Leine-Formation ist inklusive des eingeschalteten, überwiegend sylvinitisch ausgebildeten Kaliflöztes Ronnenberg in den Randsenken des Zechsteinmeeres z. T. über 100 m mächtig. Das Steinsalzlager in der Aller-Formation ist meist nicht mehr als etwa 50 m mächtig (Abbildung 3-14).

Die Steinsalzvorkommen des **Alpinen** Salinars in SE-Bayern sind aufgrund ihrer Genese und der Lagerungsverhältnisse als eine Sonderform von Zechstein-Steinsalzlagern in Deutschland zu betrachten. Sie sind Teil einer unregelmäßigen Kette von einzelnen Salz- und Gipsvorkommen, die innerhalb des Deckenkomplexes der Nördlichen Kalkalpen vorkommen /Schauberger 1986/, /Exler 1987/, /Kellerbauer 1996/. Die heutige lithologische Zusammensetzung des evaporitreichen Alpinen Salinars („Haselgebirge“) ist generell durch eine chaotische Mischung aus Salz-, Gips- und Tongestein geprägt, in der Zentimeter bis Meter große Nebengesteinskomponenten (Schiefer, Schluff und Sandstein, Anhydrit, Karbonate und seltener Magmatite) in einer oft tonigen Steinsalmatrix auftreten /Spoetl 1989/, /Doben 1996/, /Leitner 2014/. Bezogen nur auf den Halit-führenden Teil der Haselgebirgs-formation besteht diese im Mittel zu 50% aus Steinsalz, zu 40% aus Tongestein und zu etwa 10% aus Anhydrit /Schauberger 1986/. Die Durchmischung mit meist feinklastischen Sedimenten kann so weit gehen, dass der Durchschnittsgehalt von Steinsalz in einer Lagerstätte auf 30% absinkt /Exler 1987/. Für reine Steinsalzlager werden Höchstwerte von 10 m Mächtigkeit angegeben /Schauberger 1955/.

In der **Röt**-Formation kommen Steinsalzlager in den Vitzenburg- und Glockenseck-Subformationen vor. Sie sind im Liegenden und Hangenden durch sulfatische Schichtenfolgen begrenzt (Basal- und Deckanhydrit). Die zwischengeschaltete Göschwitz-Subformation ist im Beckenzentrum vor allem von pelitischen Sedimenten geprägt. Eine maximale Steinsalmächtigkeit der Röt-Formation von insgesamt etwa 150 m bis 170 m kommt nur im

nordwestlichen Norddeutschen Becken vor, wobei sich diese Ablagerungen heute in mehr als 2000 m Tiefe befinden /BGR 2003/, /Feist-Burckhardt 2008/, /Doornenbal 2010/, /Röhling 2013/. In SW-Mecklenburg und NE-Brandenburg liegen die etwa 100 m mächtigen Röt-Steinsalzlager in den Randsenken der Salzstrukturen z. T. sogar etwa 4000 m tief /BGR 2011a/, /BGR 2011b/. Auch im nördlichen Sachsen-Anhalt befindet sich das insgesamt etwa 90 m bis 120 m mächtige Steinsalzlager in mehreren 1000 m Tiefe /Benox 1997/, /Radzinski 2008a/, /BGR 2011c/.

Dagegen weist die Basis dieser evaporitischen Schichtenfolge im Thüringer Becken generell eine Tiefenlage von weniger als 700 m u. GOK auf /Huckriede 2011/. Das Röt-Steinsalzlager ist im NE der Thüringer Senke bis nach Süden etwa bis zur Linie Bad Langensalza - Erfurt - Ballstedt ca. 50 m mächtig /Seidel 1964/, /Langbein 1997/, /Huckriede 2011/. Das Steinsalzlager im Thüringer Becken ist ein fein- bis grobkörniges, von Anhydritfasern sowie -lagen und vereinzelt von Tonflocken durchsetztes Steinsalz /Seidel 1964/. Das Steinsalzlager ist durch ein etwa 2 m bis 7 m mächtiges anhydritisches, tonig-mergeliges Zwischenmittel zweigeteilt. Der untere Teil ist etwa 20 m bis 45 m und der obere Abschnitt etwa 5 m bis 15 m mächtig /Seidel 1964/, /Langbein 1976/, /Röhling 2013/.

Im **Muschelkalk**-Salinar kommen Steinsalzlager in der Heilbronn-Formation vor und in Abhängigkeit von der paläogeographischen Position im Salinar-Becken können bis zu 6 Halitführende Salinar-Zyklen ausgebildet sein /Gaertner 1993/, /Röhling 2002/. Heute sind die Steinsalzvorkommen noch in Norddeutschland, im Thüringer Becken sowie südlich des Main (Kitzingen, Burgbernheim, Schwäbisch Hall, Heilbronn, Stuttgart, Stetten und Rottweil bis Rheinfeldern) erhalten. Die weiteste Verbreitung und größte Mächtigkeit weisen die Steinsalzlager der Salinar-Zyklen 3 und 4 auf, die im Hangenden und Liegenden durch Sulfatschichten begrenzt sind. In Baden-Württemberg und in NW-Bayern erreicht die Mächtigkeit der Muschelkalk-Steinsalzsichten einige Meter bis wenige zehner Meter und sie liegen dort meist in Tiefen von 100 m bis 300 m /Cramer 1965/, /Freudenberger 1996/, /Geyer 2011/. Im Thüringer Becken, in Sachsen-Anhalt sowie in den nordöstlichen Verbreitungsgebieten von Brandenburg und Mecklenburg-Vorpommern beträgt die Gesamtmächtigkeit der Steinsalzlager des Muschelkalk-Salinars ebenfalls nur wenige zehner Meter (10 m bis 40 m; vgl. /Langbein 1997/, /Ahlten 1980/, /Röhling 2002/, /Radzinski 2008b/). Höhere Gesamtmächtigkeiten sind in NW-Deutschland verbreitet, z. B. im Raum Hannover mit etwa 70 m bis 80 m und in NW-Niedersachsen mit über 100 m. Die Steinsalzlager liegen dort allerdings tiefer als 2.000 m u. GOK.

Die Differenzierung des Ablagerungsraums in einzelne Teilbecken sowie synsedimentäre tektonische und halokinetische Bewegungen im Untergrund führten dazu, dass sich die Verbreitung der Steinsalzlager der Keuper- und Malm-Salinare im Vergleich zu den Zechstein-, Röt- und Muschelkalk-Salinaren deutlich verringerte und dass die Mächtigkeit sowie Zusammensetzung der Salinare kleinräumig stark variieren. Das **Keuper**-Salinar enthält insgesamt 8 Steinsalzlager, die oft durch Ton- und Anhydritschichten gegliedert sind und in den Grabfeld- und Weser-Formationen vorkommen. Die Steinsalzlager sind eingeschaltet in sulfatisch dominierte Schichtenfolgen. Zwischen diesen salinaren Schichtenfolgen kommt die durch terrigene Sedimente mit deutlichen Merkmalen einer fluviatilen und lakustrinen Fazies gekennzeichnete Schichtenfolge der Stuttgart-Formation vor. Die Verbreitungsgebiete der

Steinsalzlager der Grabfeld- und der Weser-Formationen sind annähernd identisch, wobei sich ihre Ausprägungen regional verändern. Insbesondere das Steinsalzlager A der Grabfeld-Formation und das Steinsalzlager H der Weser-Formation erreichen im Unterelberaum und im südlichen Schleswig-Holstein mehrere hundert Meter Mächtigkeit. In den Gebieten hoher primärer Mächtigkeit neigen die Salze des Steinsalzlagers H zu sekundärer, halokinetisch verursachter Akkumulation. Die Topflächen der dabei gebildeten Salzkissen reichen allerdings nur bis in Tiefen von ca. 1.200 m u. NN. In Ostdeutschland sind die Steinsalzlager des Keuper-Salinars zwar weit verbreitet, aber wesentlich geringmächtiger (wenige zehner Meter; /Beutler 1999/, /BGR 1999/, /BGR 2003/, /BGR 2004/, /Beutler 2005/, /Barnasch 2009/).

Im **Malm**-Salinar sind unterschiedlich mächtige und lithologisch verschieden ausgeprägte Steinsalzlager in die tonig-mergelige und anhydritische Schichtenfolge der Münder Mergel-Formation eingeschaltet. Die Steinsalzlager sind z. T. durch erhöhte Ton- und Anhydritgehalte gekennzeichnet. In Richtung der jeweiligen kleinräumigen Beckenzentren dominieren die Steinsalzlager zunehmend die saline Schichtenfolge und in den Gebieten mit den größten Mächtigkeiten des Malm-Salinars besteht die Tendenz zu sekundären, halokinetisch bedingten Akkumulationen der Steinsalzsichten in Form von Salzkissen. Die Mächtigkeit der Steinsalzlager kann dort mehrere hundert Meter erreichen. Die Topflächen dieser Salzkissen liegen heute in einer Tiefe von etwa 300 m u. GOK bis 800 m u. GOK /Boigk 1981/, /Garmann 1997/, /BGR 2003/.

Stratiforme Steinsalzlager innerhalb der **tertiären**³ Schichtenfolge sind in Deutschland ausschließlich im Oberrheingraben verbreitet. Die ältesten paläogenen Sedimente, inklusive der Steinsalzlager des Eozän, sind vorwiegend im Gebiet des südlichen Oberrheingrabens verbreitet (z. B. im Wittelsheim-Becken). Ihre Fazies ist durch die Taphrogenese des Grabens bestimmt, wobei die Randregionen des Grabens durch grobklastische und die Ablagerungen im zentralen Teil vorwiegend durch tonig-mergelige Sedimente bis dolomitisch-anhydritische Mergel und Steinsalz geprägt sind /Geyer 2011/, /BGR 2011d/. Das Steinsalzlager der Bruchsal-Formation (Oberes Oligozän) ist nur im nördlichen Oberrheingraben, in der Umgebung von Worms und Darmstadt verbreitet. Innerhalb der Bruchsal-Formation steigt der Gehalt evaporitischer Einlagerungen in der Schichtenfolge vom Liegenden bis einschließlich zum mittleren Abschnitt („Mittlere Cerithienschichten“) an. Die Sedimente der „Mittleren Cerithienschichten“ deuten auf brackisch-saline Bildungsbedingungen hin, bei denen bituminöse, z. T. Halit-führende Mergel entstanden sind, die eine Feinstschichtung durch eingeschaltete helle Kalklamellen aufweisen. Anhydritbänke und -knollen sind weit verbreitet. Bei Worms kommen mehrere Steinsalzbänke vor. In der Bohrung Worms 1 wurde eine erste, etwa 1 m mächtige Steinsalzbank in 1600 m Teufe angetroffen. Weitere 5 Steinsalzbänke mit insgesamt 7 m Mächtigkeit folgen im Teufenabschnitt zwischen 1.700 m und 1.770 m /Wagner 1955/, /BGR 2011d/.

³ Für die stratigraphische Bezeichnung Tertiär werden heute auch die Bezeichnungen Paläogen und Neogen verwendet, wobei Paläogen die Serien Paläozän, Eozän und Oligozän und Neogen die Serien Miozän und Pliozän beinhalten.

3.3 Vorliegende Sicherheits- und Nachweiskonzepte

Ein **Sicherheitskonzept** beschreibt verbalargumentativ, durch welche geologischen Gegebenheiten und technischen Maßnahmen die geforderte Sicherheit für ein Endlager an einem Standort erreicht und langfristig gewährleistet werden kann. Dem Sicherheitskonzept liegen Leitgedanken zu Grunde, die in übergeordneter und qualitativer Weise beschreiben, wie in den zu betrachtenden Fallbeispielen die sichere und langfristige Endlagerung der radioaktiven Abfälle erreicht werden soll /GRS 2012b/. Die Leitgedanken werden auf Basis der vorliegenden Kenntnisse zu den im Endlagersystem möglicherweise ablaufenden Prozessen, die die Sicherheit des Endlagers beeinflussen können, sowie zu den geologischen Standortgegebenheiten entwickelt. Aus dem Sicherheitskonzept ergeben sich konkrete Anforderungen an den Standort, das Endlagerkonzept und die Endlagerauslegung. Während die Erfüllung der Anforderungen an einen Standort durch seine charakteristischen Eigenschaften gewährleistet sein muss, lassen das Endlagerkonzept und die Endlagerauslegung Gestaltungsmöglichkeiten zur Erfüllung der Anforderungen zu.

Aus dem Sicherheitskonzept leiten sich schließlich die Einzelnachweise ab, die zum Nachweis der Sicherheit der Endlagerung an einem Standort zu erbringen sind; sie werden im **Nachweiskonzept** beschrieben.

Die Sicherheit eines Endlagers ist gewährleistet, wenn die allgemeinen Schutzziele eingehalten werden können. Diese sind in den Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle /BMU 2010a/ definiert:

- Dauerhafter Schutz von Mensch und Umwelt vor der ionisierenden Strahlung und sonstigen schädlichen Wirkungen dieser Abfälle sowie
- Vermeidung unzumutbarer Lasten und Verpflichtungen für zukünftige Generationen.

Durch die Sicherheitsanforderungen werden Vorgaben hinsichtlich des Sicherheitskonzeptes gemacht. Dies betrifft den Einschluss der radioaktiven Abfälle in einem einschlusswirksamen Gebirgsbereich (ewG), der einen definierten Bereich im Wirtsgestein um die Grubenbaue des Endlagerbergwerks, mindestens um die Grubenbaue der Einlagerungsbereiche einschließt, und den Verschluss der technisch unvermeidbaren Durchörterung der geologischen Barriere. Außerdem ist die Sicherheit des Endlagers nach seiner Stilllegung durch ein robustes, gestaffeltes Barrierensystem sicherzustellen, das seine Funktionen passiv und wartungsfrei erfüllt und das seine Funktionstüchtigkeit selbst für den Fall in ausreichendem Maße beibehält, dass einzelne Barrieren nicht ihre volle Wirkung entfalten. Die Sicherheitsanforderungen stellen damit die Sicherheitsfunktion **Einschluss** (im ewG) gegenüber den bis zum Jahr 2010 geltenden Sicherheitskriterien /BfM 1983/ stärker in den Fokus des Sicherheitskonzeptes.

Die Sicherheitsanforderungen /BMU 2010a/ sind allgemeingültig und ohne Bezug auf ein bestimmtes Wirtsgestein formuliert. Für eine Anwendung für eine bestimmte geologische Situation muss das Sicherheitskonzept im Rahmen der Vorgaben der Sicherheitsanforderungen konkretisiert werden.

Im FuE-Vorhaben ISIBEL wurde zum ersten Mal ein Sicherheitskonzept erstellt, das den ewG-Gedanken und die hervorgehobene Rolle der Sicherheitsfunktion Einschluss berücksichtigt und für eine Salzformation in steiler Lagerung ein darauf basierendes Nachweiskonzept erarbeitet /DBETEC 2008a/. Der in den Sicherheitsanforderungen geforderte Einschluss soll gemäß dem ISIBEL-Sicherheitskonzept dadurch erreicht werden, dass ein Zutritt von Lösungen zu den Abfällen ausreichend be- bzw. ganz verhindert wird. Werden bei der Berechnung der Konsequenzen die Kriterien der Sicherheitsanforderungen /BMU 2010a/ eingehalten, wird von einem **sicheren Einschluss** gesprochen. Falls im Bewertungszeitraum überhaupt keine Radionuklide aus dem ewG freigesetzt werden, wird dies als **vollständiger Einschluss** bezeichnet. In diesem Zusammenhang wurde auch auf die wichtige Funktion des in die Strecken als Versatz eingebrachten Salzgruses für das Sicherheitskonzept hingewiesen, insbesondere auf die Bedeutung des zeitlichen Ablaufs und des Endzustandes bei der Kompaktion. Der Nachweis des Einschlusses basiert auf der Langzeitaussage zur Integrität der geologischen Barriere und dem Nachweis der Integrität der geotechnischen Barrieren des Endlagersystems. Ergänzt werden diese Integritätsnachweise durch Bewertungen der potentiellen Freisetzungen von Radionukliden aus dem ewG. Dabei ist durch Vergleich mit geeigneten Indikatorwerten zu belegen, dass diese Freisetzungen geringfügig sind. Im Vorhaben ISIBEL wurde dafür unter anderem das Konzept des Radiologischen Geringsfügigkeitsindex (RGI) entwickelt /DBETEC 2010/.

Da die endgültige Fassung der Sicherheitsanforderungen /BMU 2010a/ zum Ende des FuE-Vorhabens ISIBEL noch nicht veröffentlicht war, konnten einige Anforderungen im Sicherheits- und Nachweiskonzept noch nicht behandelt werden. Das betrifft insbesondere die Rückholbarkeit der Abfälle sowie den Umgang mit einem möglichen Eindringen des Menschen in das Endlager in der Nachverschlussphase (Human Intrusion). Diese Lücke konnte mit dem Sicherheitskonzept geschlossen werden, das in der vorläufigen Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben (VSG) für ein Endlager im Salzstock Gorleben erarbeitet wurde. Basierend auf den für die VSG detailliert ausgearbeiteten Endlagerkonzepten wurde systematisch ein Katalog von technischen Maßnahmen zur Umsetzung des Sicherheitskonzepts abgeleitet /GRS 2012b/.

Ein auf den bisher erarbeiteten Sicherheitskonzepten basierendes Nachweiskonzept für eine Salzformation in steiler Lagerung umfasst folgende Elemente (Abbildung 3-15):

1. Ausweisung der Lage und Grenzen des ewG
2. Erhalt des ewG im Nachweiszeitraum
3. Integrität der geologischen Barriere
4. Integrität der geotechnischen Verschlussbauwerke
5. Kritikalitätsausschluss
6. Einschluss der Radionuklide im ewG
7. Nicht-radiologische Schutzziele
8. Bewertung von Human Intrusion
9. Umgang mit Ungewissheiten

Der Einschluss der Radionuklide im ewG wird gemäß den Sicherheitsanforderungen für sämtliche Szenarien bewertet, deren Eintreten als wahrscheinlich oder weniger wahrschein-

lich eingestuft wird. Szenarien unbeabsichtigter menschlicher Aktivitäten nach Verschluss des Endlagerbergwerks, die die Barrieren innerhalb des verfüllten und verschlossenen Grubengebäudes oder den ewG unmittelbar schädigen, werden aufgrund fehlender Prognostizierbarkeit in Form von stilisierten Szenarien behandelt. Diese Szenarien sind zu analysieren und bei der Optimierung des technischen Endlagerkonzeptes mit Blick auf den zuverlässigen Einschluss der radioaktiven Stoffe im ewG zu berücksichtigen, wobei die Optimierung des Endlagers bezüglich zukünftiger menschlicher Aktivitäten nachrangig zu anderen in den Sicherheitsanforderungen genannten Optimierungszielen zu behandeln ist. Beim FuE-Vorhaben VSG wurden die identifizierten möglichen Optimierungsmaßnahmen systematisch dahingehend bewertet, ob sie ein unbeabsichtigtes Eindringen in den ewG erschweren können oder die Chancen verbessern, das Endlager vor dem Eindringen in den ewG zu entdecken. Im Ergebnis wurde festgestellt, dass die Möglichkeiten zur Ergreifung von probaten Maßnahmen zur Optimierung des Endlagersystems gegen menschliche Eingriffe stark begrenzt sind /GRS 2012c/.

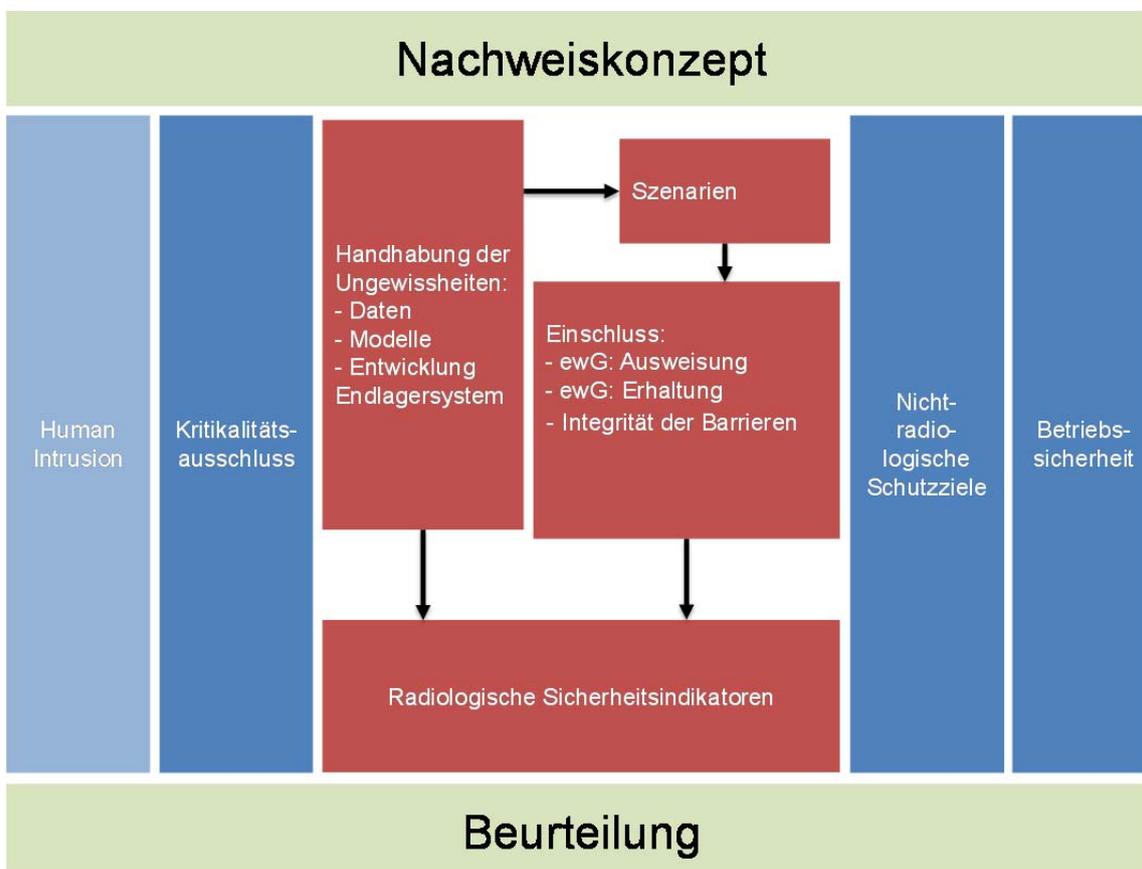


Abbildung 3-15 Elemente des Nachweiskonzeptes für eine Salzformation in steiler Lagerung.

Im Gegensatz zum Sicherheitskonzept für Salzformationen in steiler Lagerung, in dem der Einschluss dadurch erreicht werden soll, dass ein Zutritt von Lösungen zu den Abfällen ausreichend be- bzw. ganz verhindert wird, erfolgt der Einschluss der radioaktiven Abfälle eines Endlagers im Tongestein primär durch die Behinderung des Schadstofftransports durch chemische und physikalische Prozesse der Rückhaltung innerhalb des ewG /GRS 2014/. Die Rückhaltung wird durch Eigenschaften des Tongesteins im ewG im Verbund mit den geo-

technischen Barrieren gewährleistet. Als Folge des langsamen Schadstofftransports wird ein Großteil der Radioaktivität bereits während des Transports innerhalb des ewG durch radioaktiven Zerfall abgebaut.

Für Salzformationen in steiler Lagerung und für Tongestein liegen somit Sicherheitskonzepte vor (/GRS 2012b/ und /GRS 2014/). Für Salz in nicht steiler Lagerung wird ein Konzept entwickelt (vergl. Kap 5). Für Kristallin liegt eine Machbarkeitsstudie (GEISHA) vor, in der nur grob ein Konzept vorgestellt wird.

Sicherheitskonzepte wurden auch für die Stilllegung des Endlagers für radioaktive Abfallstoffe in Morsleben (ERAM) und der Schachanlage Asse II entwickelt. In beiden Fällen wurden die radioaktiven Abfallstoffe in ehemaligen Gewinnungsbergwerken eingelagert, deren Grubenbaue unter der Zielsetzung einer wirtschaftlichen Salzgewinnung aufgefahren worden sind und nicht unter dem Gesichtspunkt einer sicheren Endlagerung radioaktiver Abfallstoffe. Deshalb sind die Sicherheitskonzepte nicht mit den hier beschriebenen Sicherheitskonzepten für ein zu errichtendes Endlager für wärmeentwickelnde hochradioaktive Abfallstoffe vergleichbar.

Außerhalb Deutschlands ist die WIPP das einzige Endlager in einer Salzformation. Es wurde für TRU-Abfall gemäß den US-Standards genehmigt und wird seit 1999 betrieben. Die Leitgedanken für dessen Sicherheitsbewertung bzw. die konzeptionellen Belange werden im Rahmen des Vorhabens KOSINA ausgewertet..

3.4 Anforderungen zur Endlagerkonzeptentwicklung

In diesem Kapitel sind die Anforderungen zusammengestellt, die für die Konzeption des Endlagers zu berücksichtigen sind. Die Anforderungen betreffen die Planungen für das Grubengebäude, die Transport- und Einlagerungstechnik, die Wettertechnik, das Verfüll- und Verschlusskonzept und grundsätzlich die Bergtechnik. Die folgende Zusammenstellung der technischen Anforderungen basiert auf vier unterschiedlichen Quellen:

1. "Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle, Stand 30. September 2010" /BMU 2010a/
2. Deutsches Bergrecht,
3. Deutsches Atomrecht und
4. Sicherheitskonzept – KOSINA-Vorhaben

Die im Folgenden aufgeführten Anforderungen stellen eine Zusammenfassung der in den vorgenannten Quellen maßgeblichen Texte dar. Diese Texte wurden auf Anwendbarkeit der einzelnen Kapitel und Paragraphen auf die Entwicklung eines generischen Endlagerkonzepts für Steinsalzfolgen in flacher Lagerung überprüft. Die Inhalte, die keinen Eingang in diese Anforderungen gefunden haben, sind entweder von zu großer Regelungstiefe für eine Konzeptplanung oder regeln Angelegenheiten, die für diese irrelevant sind. Grundsätzlich gelten die Anforderungen in der gesamten Bundesrepublik Deutschland. Einzig im Bergrecht gibt es landesspezifische Regelungen. Der Umgang mit dieser deutschlandweiten rechtlichen Heterogenität ist in Kapitel 3.4.2 beschrieben.

Allgemeine Schutzziele, die innerhalb der angeführten Quellen formuliert sind, werden bei der Endlagerkonzeption berücksichtigt, in diesem Kapitel aber nur beispielhaft erwähnt.

Alle Normen, Technischen Regeln u.ä. müssen mindestens insoweit bekannt sein und berücksichtigt werden, als dass die Konzeptplanung keinen unbeabsichtigten Widerspruch zu diesen verursachen darf. Sie sind nur im bedeutenden Einzelfall genannt.

3.4.1 Sicherheitsanforderungen des Umweltministeriums

Die Sicherheitsanforderungen /BMU 2010a/ sind zum überwiegenden Teil direkt auf die Planung des Endlagerkonzepts in dem Vorhaben KOSINA anwendbar. Die Kapitel 9: „Sicherheitsmanagement“ und Kapitel 10: „Dokumentation“ haben keinen direkten Bezug zur Konzeptfindung und werden deshalb im Folgenden nicht weiter berücksichtigt. Alle anderen Kapitel gelten zumindest auszugsweise.

Die nachfolgende Aufzählung zeigt die für die Konzeptfindung relevanten Anforderungen, so wie sie in den Sicherheitsanforderungen /BMU 2010a/ formuliert wurden:

- Anforderung 4.6: *„Das Endlager ist so zu errichten und so zu betreiben, dass für den zuverlässigen langfristigen Einschluss der radioaktiven Abfälle im einschlusswirksamen Gebirgsbereich in der Nachverschlussphase keine Eingriffe oder Wartungsarbeiten erforderlich werden.“*
- Anforderung 4.7: *„Es ist eine möglichst zügige Errichtung des Endlagers zu realisieren.“*
- Anforderung 5.1: *„Entscheidend für die Zuverlässigkeit des langzeitsicheren Einschlusses ist ein robustes Barrierensystem, bei dem die Sicherheitsfunktionen des Endlagersystems und seiner Barrieren gegenüber inneren und äußeren Einflüssen und Störungen unempfindlich sind, das Verhalten des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs gut prognostizierbar ist und die Ergebnisse der Sicherheitsanalyse gegenüber Abweichungen von den zugrunde gelegten Annahmen unempfindlich sind.“*
- Anforderung 7.1: *„Eine wesentliche Voraussetzung für die Zulassung des Endlagers im Rahmen des nach § 9b des Atomgesetzes vorgeschriebenen Planfeststellungsverfahrens ist, dass die nach dem Stand von Wissenschaft und Technik erforderliche Vorsorge gegen Schäden durch die Errichtung und den Betrieb des Endlagers getroffen ist. Für die dabei durchzuführenden Arbeiten oder Tätigkeiten gelten die Regelungen der Strahlenschutzverordnung. Ebenso sind bei Errichtung und Betrieb eines geologischen Endlagers die einschlägigen Bestimmungen des Bundesberggesetzes zu beachten. Der Betrieb des Endlagers ist an analogen Anforderungen zu messen wie der Betrieb anderer kerntechnischer Anlagen. Es ist ein umfassender Sicherheitsnachweis für alle Betriebszustände des Endlagers einschließlich der übertägigen Anlagen zu führen. Insbesondere sind für den Einlagerungsbetrieb und die Stilllegung anlagenspezifische Sicherheitsanalysen unter Berücksichtigung von definierten Auslegungstörfällen durchzuführen, die den gemäß Strahlenschutzverordnung notwendigen Schutz von Betriebspersonal, Bevölkerung und Umwelt*

belegen. Dazu gehört, dass die Robustheit des Endlagersystems analysiert und dargestellt wird. [...]“

- Anforderung 8.2: „Die Durchörterung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs mit Schächten, Auffahrungen oder Bohrungen ist zu minimieren. Bohrungen, Schächte und weitere Auffahrungen 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.“
- Anforderung 8.4: „Die Handhabung von Abfallgebinden ist möglichst vollständig von den z. B. für Erhalt, Auffahrung oder Versatz von Stollen erforderlichen bergmännischen Arbeiten zu trennen.“
- Anforderung 8.5: „Das Endlager ist in Einlagerungsfelder mit einzelnen Einlagerungsbereichen zu untergliedern. Die Anzahl der offenen Einlagerungsbereiche ist gering zu halten. Diese sind zügig zu beladen, anschließend zu verfüllen und sicher gegen das Grubengebäude zu verschließen.“
- Anforderung 8.6: „[...] In der Betriebsphase bis zum Verschluss der Schächte oder Rampen muss eine Rückholung der Abfallbehälter möglich sein. Maßnahmen, die zur Sicherstellung der Möglichkeiten zur Rückholung oder Bergung getroffen werden, dürfen die passiven Sicherheitsbarrieren und damit die Langzeitsicherheit nicht beeinträchtigen.“
- Anforderung 8.7: „Das Einschlussvermögen des Endlagers muss auf verschiedenen Barrieren mit unterschiedlichen Sicherheitsfunktionen beruhen. Mit Blick auf die Zuverlässigkeit des Einschlusses ist das Zusammenspiel dieser Barrieren in ihrer Redundanz und Diversität zu optimieren. Dabei sind das Gefährdungspotenzial der Abfälle und die unterschiedliche Wirkung der Barrieren in den verschiedenen Zeitbereichen zu berücksichtigen. Die Sicherheit des Endlagers nach seiner Stilllegung ist demnach durch ein robustes, gestaffeltes Barrierensystem sicherzustellen, das seine Funktionen passiv und wartungsfrei erfüllt und das seine Funktionstüchtigkeit selbst für den Fall in ausreichendem Maße beibehält, falls einzelne Barrieren nicht ihre volle Wirkung entfalten.“

3.4.2 Anforderungen nach Bergrecht

In Deutschland gelten das Bundesberggesetz (BBergG) /BBergG 2013/, Bundesbergverordnungen und entsprechende Landesbergverordnungen. Da das Endlagerkonzept im Vorhaben KOSINA auf Basis eines generischen geologischen Modells für die Zechstein-Formation erstellt wird, müssen alle Landesbergverordnungen in Betracht gezogen werden, deren Länder grundsätzlich über Zechstein-Salzlagerstätten in flacher Lagerung verfügen, die in erster Näherung den Standortkriterien des AkEnd /AkEnd 2002/ genügen. Auf der Basis der Abbildung 3-14 zeigt Tabelle 3-16 die für ein Endlager in Zechstein-Steinsalzfolgen in flacher Lagerung möglicherweise in Frage kommenden Bundesländer sowie die für das Endlagerkonzept relevanten Landesbergverordnungen. Die Relevanz wird danach beurteilt, ob die jeweilige Landesbergverordnung konkrete Vorgaben erlässt, die die technische Konzeption des Endlagerbergwerks beeinflusst. Da dies für die Landesbergverordnungen in Brandenburg und Hessen nicht der Fall ist, werden diese Länder im Hinblick auf das Lan-

desbergrecht nicht weiter betrachtet, obwohl sie über potentiell geeignete Zechstein-Salzlagerstätten in flacher Lagerung verfügen.

Tabelle 3-16 Übersicht der relevanten Bergverordnungen für die prinzipiell in Betracht kommenden Bundesländer

Urheber	Relevante Verordnungen
BUND	ABBergV (Allgemeine Bundesbergverordnung) /ABBergV 2012/ KlimaBergV (Klima- Bergverordnung) /KlimaBergV 1983/
NRW	BVOESSE (Bergverordnung für die Erzbergwerke, Steinsalzbergwerke und für die Steine- und Erden Betriebe) /BVOESSE 2001/ BVOS (Bergverordnung für Schacht- und Schrägförderanlagen) /BVOS 2003/
Niedersachsen	ABVO (Allgemeine Bergverordnung über Untertagebetriebe, Tagebaue und Salinen) /ABVO 1966/ BVOS (Bergverordnung für Schacht- und Schrägförderanlagen) /BVOS 2003/
Bayern	BayBergV (Bayerische Bergverordnung) /BayBergV 2006/
Thüringen	ThürBVOS (Thüringer Bergverordnung für Schacht- und Schrägförderanlagen) /ThürBVOS 2004/
Sachsen-Anhalt	BVOS (Bergverordnung für Schacht- und Schrägförderanlagen) /BVOS 2003/

Während der Analyse des Bergrechts hat sich kein länderübergreifender Widerspruch von Vorschriften auf Konzeptebene ergeben. Diese Aussage gilt ebenfalls für alle Landesbergverordnungen der Bundesländer, die keine potentiell geeignete flache Lagerung im Zechstein-Salinar aufweisen.

Im Folgenden werden die bergrechtlichen Vorgaben für das Endlagerkonzept vorgestellt. Außer den Bundesbergverordnungen sind diese zur besseren Lesbarkeit thematisch gegliedert, anstatt die Verordnungen selbst einzeln vorzustellen. Eine Befolgung dieser Sammlung von bergrechtlichen Anforderungen während der Konzeptplanung würde aus bergrechtlicher Sicht die Anwendung dieses Konzepts in jedem Land der Bundesrepublik Deutschland erlauben. Alle anderen Quellen von Anforderungen beziehen sich sowieso auf das gesamte Bundesgebiet.

Ein wesentliches Ziel des BBergG /BBergG 2013/ ist die Sicherheit vor Gefährdungen, die der Bergbaubetrieb auslöst. Dieses Schutzziel bezieht sich sowohl auf das im Bergwerk beschäftigte Personal und Gerät, als auch auf die allgemeine Öffentlichkeit (§1 BBergG /BBergG 2013/). Jenseits dieser allgemeinen Vorschrift enthält das BBergG /BBergG 2013/ keine weiteren Anforderungen, die für ein Endlagerkonzept relevant wären.

Die allgemeinen Schutzziele der Allgemeinen Bundesbergverordnung gelten natürlich auch für ein Endlagerbergwerk. Diese betreffen z. B.

- die Pflicht, den Ausbau fachgerecht einzubringen und instand zu halten,
- die Aufgabe der Bewetterung und Sonderbewetterung und
- das Bereitstellen von persönlicher Schutzausrüstung.

§15 ABergV /ABergV 2012/ macht zwei konkrete Vorgaben mit Einfluss auf das Endlagerkonzept:

- „(1) [...] jeder untertägige Betrieb [muss] über mindestens zwei getrennte, fachgerecht erstellte und für die Beschäftigten leicht zugängliche Wege mit der Oberfläche verbunden [sein] [...]“
- (2) In jedem untertägigen Betrieb [muss] jede Arbeitsstätte auf mindestens zwei getrennten Wegen verlassen werden [können] [...].“

Die Klimabergverordnung /KlimaBergV 1983/ regelt in §§3-4 das Verhältnis von Wettertemperaturen unter Tage, Aufenthaltsdauer in festgelegten Temperaturzonen und die daraus resultierende maximale Beschäftigungszeit des Personals bis hin zum Beschäftigungsverbot. Tabelle 3-17 stellt die beiden Paragraphen graphisch dar.

Tabelle 3-17 Graphische Darstellung der §§3 und 4 der KlimaBergV

Trockentemperatur	
>52°C	Beschäftigungsverbot
46-52°C	Arbeitszeit von 6,5 h, wenn >4 h bei dieser Temperatur
37-46°C	Arbeitszeit von 7h, wenn >4,5 h bei dieser Temperatur
28-37°C	Arbeitszeit von 7h, wenn >5 h bei dieser Temperatur
<28°C	Keine Einschränkung durch KlimaBergV

3.4.2.1 Landesvorschriften mit Einfluss auf den Streckenquerschnitt

Zum Schutz von Fußgängern unter Tage definiert der §106 der ABVO /ABVO 1966/ die Mindestmaße eines lichten Querschnitts von Fahrwegen, nämlich 0,8 m in der Breite und 1,8 m in der Höhe. Diese Mindestvorgaben gelten in einer Strecke mit gleisgebundener Förderung oder mit Stetigförderern. Für Strecken mit gleislosem Verkehr ist Personenfahung nur erlaubt, wenn die Strecke mindestens 2 m breiter ist, als das breiteste gleislose Fahrzeug oder die Möglichkeit besteht, aus der Strecke heraus zu treten, wenn sich ein Fahrzeug nähert oder eine bauartbedingte Begrenzung der gleislosen Fahrzeuge auf 6 km/h vorliegt. § 36 der BVOESSE /BVOESSE 2001/ beschränkt sich darauf, die lichten Maße des Fahrweges zu definieren und nennt dieselben Maße von 0,8 m x 1,8 m. Der Fahrweg muss hier allerdings am Streckenstoß liegen.

3.4.2.2 Landesvorschriften zur Wettertechnik

§113 ABVO /ABVO 1966/, §28 Bay.BergV /BayBergV 2006/ und §55 BVOESSE /BVOESSE 2001/ sind sich alle darin einig, dass die Wettermenge in Bezug auf das anwesende Personal mit 2 m³ pro Minute und Person zu berechnen ist. Die zweite Gruppe der Wetterverbraucher, nämlich Verbrennungsmotoren, wird von der TRGS 554 (Technische Regel für Gefahrstoffe 554: Abgase von Dieselmotoren) /TGRS 2009/ behandelt. Pro kW Leistung in Form von Dieselmotoren unter Tage soll das Bergwerk mit weiteren 3,4 m³ pro Minute bewettert werden. Zusätzlich limitiert die Bayerische Bergverordnung in §28 /BayBergV 2006/ die maximale Wettergeschwindigkeit von allen regelmäßig befahrenen Grubenbauen (also auch von Schächten) auf 6 m/s.

3.4.2.3 Landesvorschriften über Sicherheitspfeiler

§224 der ABVO /ABVO 1966/ definiert den Sicherheitspfeiler von Schächten in Salzbergwerken wie folgt:

„(1) [...] *mindestens 50 m*: [...]“

b) um die Schachtachse von Tagesschächten sowie um deren um 50 m unter die Schachtentiefe gedachte Verlängerung, [...]

3.4.2.4 Landesvorschriften über Schachtförderanlagen

Der §3 der BVOS /BVOS 2003/ klassifiziert Schachtförderanlagen nach Anzahl der Personen und der Fördergeschwindigkeit in Hauptseilfahrtanlagen, mittlere Seilfahrtanlagen und kleine Seilfahrtanlagen. Weiterhin definiert die TAS (Technische Anforderungen an Schacht- und Schrägförderanlagen) /TAS 2005/ mit normativem Charakter Hilfsfahrtanlagen und Befahrungsanlagen. Je nach Klassifikation der Schachtförderanlage sind unterschiedliche Sicherheitseinrichtungen und Berechnungsvorschriften einschlägig. Diese können sich auf die konzeptionelle Beschreibung der Anlage auswirken; außerdem wird es die Betriebssicherheitsanalyse beeinflussen.

3.4.3 Anforderungen nach Atomrecht

Anforderung 7.1 /BMU 2010a/ verlangt die Anwendung der Strahlenschutzverordnung (StrlSchV) /StrlSchV 2014/ im Falle eines Endlagers für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle in tiefen geologischen Schichten. Das übergeordnete Atomgesetz (AtG) sollte infolge dessen auch Betrachtung finden. Beide Werke sind Bundesrecht.

Ähnlich wie das BBergG /BBergG 2013/ formuliert das AtG /AtG 2015/ ein allgemeines Schutzziel und ist ansonsten für die Konzeptplanung des Endlagers nicht relevant. Dieses ist formuliert in §1 AtG /AtG 2015/:

„Zweck dieses Gesetzes ist, [...] Leben, Gesundheit und Sachgüter vor den Gefahren der Kernenergie und der schädlichen Wirkung ionisierender Strahlung zu schützen.“

Die StrlSchV /StrlSchV 2014/ beschreibt in §6 zunächst die wesentlichen Grundsätze im Umgang mit Strahlung: Jede unnötige Strahlenexposition oder Kontamination von Mensch und Umwelt ist zu vermeiden. Ist sie nötig, dann ist sie unter Beachtung des Standes von Wissenschaft und Technik und aller Umstände des Einzelfalles so gering wie möglich zu halten.

Für den konkreten betrieblichen Strahlenschutz weist die StrlSchV in § 36 /StrlSchV 2014/ drei Strahlenschutzbereiche aus, abhängig von der möglichen Strahlenexposition innerhalb des entsprechenden Bereichs. Die Definition der Bereiche lautet wie folgt:

- „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.“

Des Weiteren verpflichtet die StrlSchV in den §§39, 40 und 44 /StrlSchV 2014/ zur messtechnischen Überwachung dieser Bereiche in Form von Ortsdosisleistungen und Überwachung der Wetter, von Personal im Kontrollbereich in Form der Personendosis und der Kontrolle auf Kontamination von Personal und Gerät, da den Kontrollbereich verlässt.

§ 47 StrlSchV /StrlSchV 2014/ definiert weiterhin Grenzwerte für Ableitungen radioaktiver Stoffe mit Wasser oder Luft aus der Gesamtanlage heraus. Die Pflicht, diese Ableitungen zu überwachen, legt § 48 StrlSchV /StrlSchV 2014/ fest. Die *Richtlinie zur Emissions- und Immissionsüberwachung kerntechnischer Anlagen (REI) /REI 2008/* führt diese Anforderungen der Strahlenschutzverordnung weiter aus, indem sie eine Beurteilung der aus Ableitungen resultierenden Strahlenexposition ermöglicht und die Kontrolle von Grenzwerten gewährleistet.

3.4.4 Anforderungen nach dem Sicherheitskonzept

Die quantitativen Anforderungen an die technische Auslegung des Endlagerbergwerks, die sich aus dem Sicherheitskonzept ergeben, beziehen sich vor allem auf die Mindestabstände des Grubengebäudes zu den das Endlagerbergwerk umgebenden Salzsichten und der Einlagerungsbereiche zu den Schächten. Zunächst werden orientierende Werte für die jeweiligen Mindestabstände auf Grundlage von gebirgsmechanischen Erfahrungen aus dem Salzbergbau festgelegt. Die endgültige Festlegung der Mindestabstände erfolgt in einem iterativen Prozess, bei dem anhand der zu erbringenden Nachweise geprüft wird, ob die Mindestabstände auch unter Berücksichtigung der Ungewissheiten in der zerstörungsfreien Detektion von Schichtgrenzen ausreichen, um die Barrierefunktion des Salzgesteins zu gewährleisten.

Im Sicherheitskonzept der VSG /GRS 2012 b/, das dem in KOSINA zu entwickelnden Sicherheitskonzept für flach lagernde Salzformationen zugrunde liegt (siehe Kapitel 3.3),

wurde weitgehend auf die Angabe von Zahlenwerten verzichtet, vielmehr wurde von „großer Mächtigkeit der hangenden Salzschieben“, von „großen Abständen zu den Salzstockflanken“ oder von „ausreichenden Sicherheitsabständen zu Salzbereichen wie z. B. Carnallitit“ gesprochen. Diese qualitativen Vorgaben wurden erst bei der Planung der Endlagerkonzepte, bzw. bei der Festlegung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (ewG) in konkrete Zahlenwerte umgesetzt. Im Ergebnis wurde festgehalten, dass ein Abstand von 50 m zu Schichten außerhalb des Hauptsalzes allseitig um die Grubenbaue ausreichend ist und dass die Einlagerungsgrubenbaue mindestens 300 m von den Tagesschächten entfernt sein sollen /GRS 2013/.

Im Vorhaben KOSINA werden zunächst folgende Sicherheitsabstände (siehe Abbildung 3-16) im Sicherheitskonzept festgelegt (siehe Kapitel 5):

- 150 m zum Top des Salinars,
- 50 m zu Top und Basis des Steinsalzlagers (Einlagerungshorizont),
- 500 m lateraler Sicherheitspfeiler (um Beeinflussungen durch ggf. vorhandenen Salzhänge auszuschließen, unter Berücksichtigung des Einfallens der Schichten, in Abbildung 3-16 nicht darstellbar)
- 300 m Abstand der Einlagerungsgrubenbaue zu den Tagesschächten

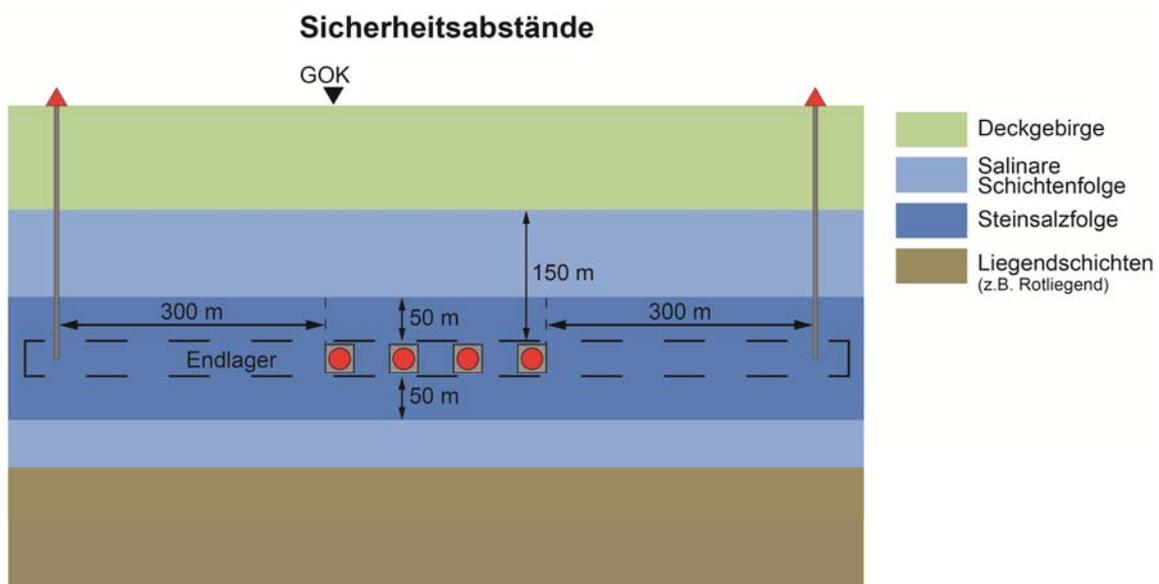


Abbildung 3-16 Schematische Darstellung der vorläufigen, den Endlagerplanungen zugrunde liegenden Sicherheitsabstände

Des Weiteren wird eine maximale Auslegungstemperatur von 200 °C für das Endlager vorgeschrieben. Dies erlaubt die Berechnung von Mindestabständen zwischen Abfallgebinden und zwischen Einlagerungsstrecken.

Weitere qualitative Anforderungen an das Endlagerkonzept sind im Sicherheitskonzept in Kapitel 5.3.3.2 als strategische bzw. planerische Maßnahme aufgeführt.

3.4.5 Konflikte der Anforderungen

Bei der technischen Auslegung des Endlagerbergwerks muss die Einhaltung aller geltenden Anforderungen aus den verschiedenen Rechtsbereichen sichergestellt werden. Darüber hinaus sollen auch die Festlegungen aus dem Sicherheitskonzept berücksichtigt werden. Im Einzelfall kann es dabei auch zu scheinbaren Widersprüchen kommen, wenn aus den Einzelanforderungen Parameter und Zahlenwerte für die technische Auslegung des Endlagerbergwerks abgeleitet werden. In diesen Fällen muss unter Berücksichtigung aller einen bestimmten Aspekt beeinflussenden Einzelanforderungen eine anforderungsgerechte Abwägung und Festlegung erfolgen.

Die Anforderung 8.2 /BMU 2010a/, die Durchörterung des ewG zu minimieren, würde nahelegen, das Endlager mit nur einem Zugang auszustatten. Rein technisch ist dies zwar möglich, allerdings stehen dem zwei weitere Anforderungen entgegen: §15 der ABergV /ABergV 2012/ fordert zunächst mindestens zwei Zugänge zum Bergwerk, damit immer mindestens ein Fluchtweg zur Verfügung steht. Auch wäre die Trennung der Handhabung von Abfallgebinden und der bergtechnischen Arbeiten (§8.4 /BMU 2010a/) in einem Schacht nur sehr aufwendig möglich. Fasst man diese drei Anforderungen zusammen, ist eine Festlegung auf zwei Tageszugänge zum Endlager anforderungsgerecht.

Nach Anforderung 8.4 /BMU 2010a/ ist die Handhabung der Abfallgebinde von den bergmännischen Arbeiten zu trennen. Dies ist eine logische Folgerung von §36 StrlSchV /StrlSchV 2014/, die die Unterteilung der kerntechnischen Anlage in Strahlenschutzbereiche anordnet. Aufgrund der Pflicht nach §44 StrlSchV /StrlSchV 2014/, alle Personen und Gegenstände beim Verlassen des Kontrollbereichs auf Kontamination zu überprüfen, wäre es mit erheblichem betrieblichen Aufwand verbunden, die Handhabung der Abfallgebinde und die bergmännischen Arbeiten nicht zu trennen. In diesem Fall müsste z. B. der Abraum aus dem Auffahren des Grubengebäudes ebenfalls beim Verlassen des Kontrollbereichs freigegeben werden. Die Anforderungen des Umweltministeriums /BMU 2010a/ und der StrlSchV /StrlSchV 2014/ gehen also in dieselbe Richtung.

§224 der ABVO /ABVO 1966/ fordert Schachtsicherheitspfeiler von 50 m im Salz. In der „Systemanalyse Mischkonzept, Übertragung der Planungsergebnisse auf das Arbeitsmodell zum strukturellen Aufbau des Salzstocks Gorleben, Technischer Anhang 10, DBE, Oktober 1989“ /KfK 1989b/ wurde ein Schachtsicherheitspfeiler von 150 m empfohlen. Dies soll zusätzliche Sicherheit bieten zu dem Sicherheitsabstand zwischen Schacht und schachtnächstem Einlagerungsbereich von 300 m, um die mechanische Integrität des Schachts trotz der thermischen Einflüsse der Abfallgebinde zu garantieren. Diese 150 m werden als vorläufiger Wert in die Planungen im Vorhaben KOSINA übernommen.

Auf Grundlage der vorgenannten Anforderungen werden die Konzepte für die Endlagergrubengebäude für die im Vorhaben KOSINA vorgesehenen vier Einlagerungsvarianten entworfen.

4 Erstellung der generischen geologischen Modelle, Ableitung von Modellparametern

Im Rahmen des Vorhabens KOSINA werden zwei generische geologische 3D-Modelle erarbeitet: Modell A (Typ „flache Lagerung“) und Modell B (Typ „Salzkissen“). Die von der BGR und vom IfG gemeinsam erarbeiteten generischen geologischen 3D-Modelle und zusammengestellten Modellparameter zu den Gesteinseigenschaften sind wesentliche Grundlagen für die Entwicklung der Endlagerkonzepte, die Integritätsanalyse der geologischen und geotechnischen Barrieren sowie für die Entwicklung und Überprüfung eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes.

4.1 Strukturgeologische Merkmale der flach lagernden Steinsalzfolgen und Salzkissen

Im Gegensatz zu den Salzdiapiren (Salzstöcken, Salzmauern), wo der Salzkörper Einheiten des Deckgebirges durchbrochen hat, sind flach lagernde Salzschieben innerhalb der sedimentären Schichtenfolge durch großräumige konkordante (subparallele) Lagerungsverhältnisse gekennzeichnet. In flach lagernden, steinsalzführenden Schichtenfolgen können lokal begrenzt flachwellige Deformationsstrukturen (Intrasalinarstrukturen mit Mächtigkeitsschwankungen des Steinsalzes) und z. T. intensiv verfaltete Salzlagen (z. B. Kaliflöze) vorkommen. Meist handelt es sich dabei nur um kleine Schichtverstellungen oder lokal verfaltete Salzschieben sowie um Flexurbildungen, die überwiegend auf das „Abpuffern“ von Störungszonen im Liegenden und/oder Hangenden der Salzlager oder auf halokinetische Salzverteilungen in benachbarte Salzstrukturen zurückzuführen sind. Eine flach lagernde salinare Schichtenfolge weist aber trotz dieser intrasalinaren Strukturen insgesamt eine deckgebirgskonforme Lagerung auf (Abbildung 4-1A).

Salzkissen sind durch Salzzuwanderungen entstandene domförmige Strukturen (Brachyantiklinale). Wesentlich für die Strukturgenese ist die Akkumulation des Steinsalzes durch das laterale Zusammenfließen der am leichtesten mobilisierbaren Salinare, häufig das Steinsalzlager der Staßfurt-Formation. Durch die Akkumulation kommt es zur Aufwölbung des Deckgebirges, wobei sich die jüngeren, weniger kriechfähigen Salzgesteine der salinaren Schichtenfolge sehr ähnlich dem Deckgebirge verhalten und sich ebenfalls aufwölben (Abbildung 4-1B). Die Lagerung der Deckgebirgsschichten, d.h. der postsalinaren Sedimentschichten, ist konform mit dem Streichen und Fallen der äußeren Kontur des Salzkissens. In der konkordanten, suprasalinaren Schichtenfolge treten insbesondere im Scheitelbereich häufig reduzierte Sedimentmächtigkeiten auf, z. T. sogar Schichtlücken. In den die Salzstruktur umgebenden Senken ist dagegen eine verstärkte Sedimentation zu beobachten. Salzkissen, die durch eine hohe Aufwölbung und steile Flanken charakterisiert sind, werden reife Salzkissen genannt. Oft sind solche Salzkissen im Scheitelbereich der Struktur von Störungen im Deckgebirge (teilweise Gräben) begleitet.

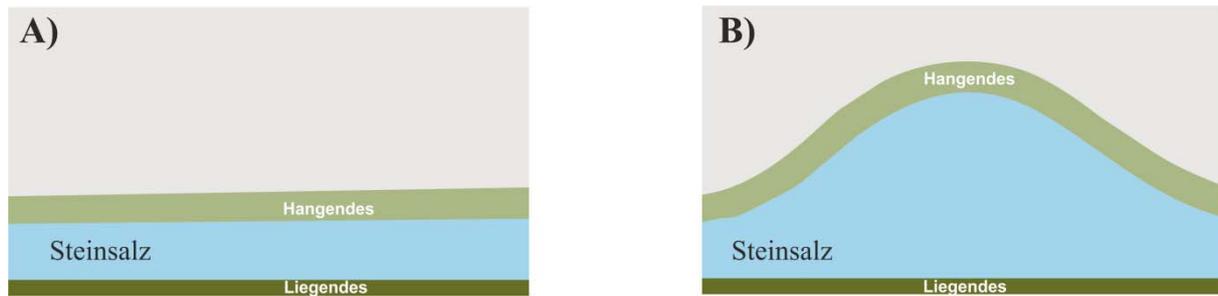


Abbildung 4-1 Schematische Darstellung der Lagerungsformen im Modell A (Typ „flache Lagerung“) und Modell B (Typ „Salzkissen“).

4.2 Vorgehensweise

In der ersten Vorhabensphase wird das generische geologische 3D-Modell für den Typ „flache Lagerung“ erstellt. Die Erstellung des geologischen generischen 3D-Modells für den Typ „Salzkissen“ wird in der zweiten Phase des Vorhabens, die im Jahr 2016 beginnt, realisiert. Die Arbeiten im Vorhaben KOSINA nutzen den im Zuge vorangegangener Forschungsvorhaben erreichten Kenntnisstand zur Verbreitung, Zusammensetzung und zu den geologischen Lagerungsverhältnissen von Steinsalzfolgen in Deutschland (z. B. /Golder 2006/, /BGR 2014/). In Kapitel 3.2 erfolgte eine kurze Übersicht zu den altersverschiedenen salinar geprägten Formationen in Deutschland. Unter Berücksichtigung vorhabensspezifischer Randbedingungen (Kapitel 4.2.1) wurde ein schematisches Referenzprofil für das Modell A (Typ „flache Lagerung“) erarbeitet. Entsprechend der Schichtenfolge in diesem Profil und den strukturgeologischen Kenntnissen werden ein generischer geologischer Schnitt und anschließend ein geologisches 3D-Modell (Typ „flache Lagerung“) für einen generischen Standort entwickelt.

4.2.1 Randbedingungen für die Erstellung der generischen geologischen 3-D-Modelle

Für die im Vorhaben KOSINA zu bearbeitenden Fragestellungen ist die Erstellung von generischen geologischen Standortmodellen auf der Grundlage generalisierter geologischer Standortbeschreibungen erforderlich. In die Zusammenstellung der dafür genutzten geologischen Erkundungsdaten sind Informationen von mehreren, potentiell in Frage kommenden Standortregionen (siehe Kapitel 3.2, Abbildung 3-14) eingeflossen. Die Datenkompilation stützt sich auf bereits bestehende Empfehlungen des AkEnd zu den geologischen Verhältnissen eines potentiellen Endlagerstandortes /AkEnd 2002/. Im Rahmen des Vorhabens KOSINA werden keine neuen Mindestanforderungen oder Auswahlkriterien formuliert. Aufgrund der aktuell noch nicht erfolgten Festlegungen durch die damit beauftragte Endlagerkommission /StandAG 2013/ wurde angesichts der Notwendigkeit dieser Daten für die Erarbeitung der generischen geologischen Standortmodelle auf Empfehlungen des AkEnd und aus den Arbeiten von /BGR 2004/, /Hammer 2009/ und /IfG 2010/ zurückgegriffen.

Die verwendeten Ausschlusskriterien dienen dazu, Regionen mit besonders ungünstigen geologischen Voraussetzungen für die Errichtung eines Endlagers auszuschließen. Das sind im Einzelnen:

- Der generische Standort darf keine großräumigen geogenen Hebungen von mehr als einem Millimeter pro Jahr im zu prognostizierenden Zeitraum aufweisen,
- am generischen Standort dürfen keine quartären vulkanischen Aktivitäten vorhanden bzw. im Nachweiszeitraum zu erwarten sein,
- im Bereich des generischen Standortes dürfen keine aktiven Störungen vorhanden sein,
- im Bereich des generischen Standortes dürfen die zu erwartenden seismischen Aktivitäten nicht größer als in Erdbebenzone 1 nach DIN 4149 (2005) sein.

Diese Ausschlusskriterien sind grundsätzlich nach wie vor gültig. Allerdings sollte auf Basis aktueller Erkenntnisse eine Überprüfung und ggf. eine Anpassung der quantitativen Kriterienwerte erfolgen. So ist beispielsweise in der DIN 4149 von 1992 für das in Hessen und Thüringen liegende Kali-Werra-Revier aufgrund der bergbauinduzierten seismischen Aktivität in diesem Gebiet die Erdbebenzone 2 ausgewiesen /Grünthal 2005/. Die geologische Barriere der Kalibergwerke aus Steinsalz und Salzton zu grundwasserführenden Schichten hat bei dynamischen Beanspruchungen entsprechend Erdbebenzone 2 in allen Fällen ihre Dichtheit bewahrt /IfG 2010/.

Darüber hinaus muss der einschlusswirksame Gebirgsbereich neben den günstigen Barriereigenschaften Anforderungen an die Verbreitung, Mächtigkeit und Tiefenlage erfüllen sowie eine möglichst homogene Ausbildung in lateraler und vertikaler Richtung aufweisen.

Im AkEnd-Bericht /AkEnd 2002/ und in den Arbeiten der BGR (z. B. /BGR 2004/) wird eine Mindestmächtigkeit von 100 m für den Einlagerungsbereich empfohlen. In den BGR-Studien, die sich mit der Endlagerung von wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen und ausgediente Brennelemente in Salzstöcken auseinandergesetzt haben, werden zusätzlich noch eine Mindestschwebe von 300 m und 100 m Mächtigkeit im Liegenden des Einlagerungsbereiches als notwendig angesehen (vgl. /BGR 2004/). Aufgrund der im Vergleich zu Salzstöcken deutlich geringeren Mächtigkeiten der flach lagernden Steinsalzfolgen ist eine Übertragung dieser Empfehlungen auf flach lagernde Steinsalzfolgen nicht möglich. Die im Vorhaben KOSINA vorgesehenen numerischen THM-Modellrechnungen zu den Auswirkungen eines Endlagers für wärmeentwickelnde Abfälle und ausgediente Brennelemente in flach lagernden Steinsalzfolgen dienen zur Überprüfung dieser Empfehlungen und ggf. zur Ableitung neuer Anforderungen.

/IfG 2010/ formulierte folgende Anforderung für ein mögliches Endlagerbergwerk in flach lagernden Steinsalzfolgen:

- Abstand zu Kaliflözen ≥ 50 m.

Die im Vorhaben KOSINA für die generischen geologischen 3D-Modelle definierte Teufenlage des Einlagerungsbereiches folgt dem geowissenschaftlichen Abwägungskriterium Teufenlage aus den Empfehlungen des AkEnd /AkEnd 2002/. Danach wurde eine Teufe der oberen Begrenzung des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches von mehr als 500 m als günstig für die Robustheit und hinsichtlich einer Sicherheitsreserve bezüglich des Abstandes zur Biosphäre beurteilt. In den Kali- und Steinsalzrevieren Mitteldeutschlands, wo die flach lagernden Salzlagerstätten bergmännisch erschlossen sind, treten die Hauptzuflüsse von Salzlösungen in den Bergwerken in Teufen oberhalb von 500 m auf /Schwandt 1991/.

Mit der vorhabensspezifischen Teufenlage des Einlagerungsbereiches von mehr als 500 m wird zudem die Wahrscheinlichkeit von Subrosionserscheinungen in diesem Niveau minimiert. Subrosionsprozesse von leicht löslichen Stein- und Kalisalzen salinar geprägter Schichtenfolgen wurden nur bis in Teufen von einigen hundert Metern festgestellt. So fehlt das primär vorhandene Steinsalz in der Schichtenfolge des Muschelkalk-Salinars heute in weiten Teilen Hessens, Sachsen-Anhalts und Thüringens bis in Teufen von maximal 450 m u. GOK /Althen 1989/, /Röhling 2002/, /Langbein 2003/, /Bock 2009/. Die Voraussetzungen für den Prozess der Subrosion können sich während der geologischen Entwicklung einer Region deutlich verändert haben. Dort wo die Steinsalzlager aufgrund einer geringen Grundwasserströmung in größeren Teufen und/oder durch abdichtende Schichtenfolgen gegen Ablaugung geschützt werden, fehlen die Voraussetzungen für die Subrosion. Daher kommen Steinsalzlager auch in geringerer Teufe vor, z. B. die Steinsalzlager im Raum Heilbronn.

Die Basis des Einlagerungsbereiches soll nach AkEnd /AkEnd2002/ nicht unterhalb von 1.500 m u. GOK liegen. Die in den BGR-Berichten abgeleiteten diesbezüglichen Anforderungen besagen, dass der Einlagerungsbereich in einer Tiefe von maximal 1.000 m u. NN liegen sollte. Als Begründung dafür werden die mit zunehmender Tiefe steigende Gebirgstemperatur und höhere Hohlraumkonvergenz genannt. Die maximale Gebirgstemperatur im Endlagerungsbereich sollte 50°C nicht überschreiten /Hammer 2009/. /BGR 2002/ stellten fest, dass heute in Norddeutschland die Temperaturen in 1000 m Tiefe u. NN zwischen 40°C und 50°C schwanken. Die maximale Tiefe des Endlagerbergwerkes wurde für diesen Bericht auf ca. 1000 m u. GOK festgelegt.

Zusammenfassend werden folgende vorhabensspezifische Parameter als Randbedingungen für die Erstellung der generischen geologischen 3D-Modelle zugrunde gelegt:

Tiefenlage Endlagerbergwerk	zwischen 500 m und 1.000 m u. GOK
Mächtigkeit Einlagerungshorizont	größer 100 m.

4.2.2 Schichtenfolge für die Referenzprofile sowie Definition des Wirtsgesteins und Einlagerungsbereichs

Ein Vergleich der in Kapitel 4.2.1 für das KOSINA-Forschungsvorhaben formulierten Randbedingungen für die generischen geologischen 3D-Modelle mit den bisher vorliegenden Informationen zu den flach lagernden Steinsalzfolgen in Deutschland (Kapitel 3.2) ergab,

dass insbesondere die Steinsalzlager in den Werra-, Staßfurt- und Leine-Formationen des Zechstein-Salinars für die Erstellung der Referenzschnitte und generischen geologischen Standortmodelle von Interesse sind.

Charakteristisch für das Zechstein-Salinar der Werra-, Staßfurt- und Leine-Formationen sind die zyklischen Abfolgen von lithologisch unterschiedlich zusammengesetzten Sedimentgesteinen. Ein Zyklus besteht aus basalen feinklastischen Ablagerungen gefolgt von Karbonaten und einer salinar geprägten Schichtenfolge. Letztere beginnt mit anhydritischen Gesteinen, dann folgen Steinsalz und zuletzt die nur geringmächtigen Kali- und Magnesiumsalze. Danach folgt häufig eine rezessive Phase des Zyklus mit halitischen und anhydritschtonigen Ablagerungen. In Abhängigkeit von ihrer regionalgeologischen Position variieren Mächtigkeit und Ausprägung der einzelnen Schichtglieder.

Aufgrund der heute vergleichsweise geringen Tiefenlage der Zechstein-Steinsalzlager wurden für die weiteren Betrachtungen geologische Erkundungsergebnisse aus dem südlichen Bereich des Zechsteinbeckens ausgewertet. Für die Darstellung der geologischen Verhältnisse am südlichen Rand des norddeutschen Zechsteinbeckens wurde aus den Angaben von /BGR 2014/ eine synthetisierte Schichtenfolge für die Staßfurt (z2)- und Leine-Formationen (z3) des Zechstein-Salinars abgeleitet und durch regionalgeologische Kenntnisse zur Schichtenfolge ergänzt. Die Basis des schematischen Profils bildet eine Schicht, die durch eine sandige Zusammensetzung geprägt ist, gefolgt von einer karbonatischen und dann einer anhydritischen Schicht (Abbildung 4-2).

Der Hauptteil der sich anschließenden Staßfurt-Formation besteht aus einem mächtigen Steinsalzlager (z2NA) und einer carnallitisch geprägten Schichtenfolge (z2SF). Die Leine-Formation setzt sich aus 6 lithologischen Einheiten zusammen, von tonig-anhydritischen, über halitische bis hin zu Kalisalzen (Abbildung 4-3). Im Hangenden der Leine-Formation folgen die Schichten der Aller-Formation (z4), beginnend mit einer tonig-anhydritischen (z4RT-z4PA) Schicht und einer darauffolgenden Steinsalzfolge (z4NA). Die Schichten der Ohre-Folge (z5) sind im generischen geologischen Profil nicht weiter aufgegliedert (Abbildung 4-2).

Das postpermische Deckgebirge beginnt mit den über hundert Meter mächtigen Ablagerungen des Unteren Buntsandsteins, gefolgt von Ablagerungen des Mittleren Buntsandsteins. Die Schichtenfolgen des Unteren Buntsandsteins werden von tonigen und feinsandigen Ablagerungen dominiert. Die Folge kann durch bankige Einlagerungen karbonatischer Sandsteine und Oolithe (Rogensteine) untergliedert werden. Die Sedimente des Mittleren Buntsandsteins werden aufgrund der Korngrößenverteilung in vier Sohlbank-Zyklen gegliedert. Die Sohlbank-Zyklen beginnen mit geringmächtigen Sandsteinen und gehen zum Hangenden in eine Wechselfolge von Ton- und Siltsteinen mit nur noch geringem Sandanteil über.

Nach oben hin wird das generische geologische Referenzprofil durch känozoische Ablagerungen abgeschlossen. Die Sande und tonigen Ablagerungen, z. T. auch Kiese können in tertiäre und quartäre Ablagerungen unterteilt werden. Aus Abbildung 4-2 sind die Lage des geplanten Einlagerungsbereiches und die Abgrenzung des Wirtsgesteins ersichtlich.

Deckgebirge	q t sm su	Quartär Tertiär mittlerer Buntsandstein unterer Buntsandstein
Ohre-Folge	z5	Ohre-Sedimente
Aller-Folge	z4NA z4RT-z4PA	Aller-Steinsalz Roter Salzton/Pegmatitanhydrit
Leine-Folge	z3SS-TM z3AM z3RO z3NA z3HA z3GT	Schwadensalz/Tonmittelsalz Anhydritmittelsalz Kaliflöz Ronnenberg Leine-Steinsalz Hauptanhydrit Grauer Salzton
Staßfurt-Folge	z2SF z2NA	Kaliflöz Staßfurt Staßfurt-Steinsalz
Liegendes	z_Anhydrit z_Karbonat	Einlagerungshorizont
	Sandstein	

Wirtsgestein

Abbildung 4-2 Schematisches geologisches Referenzprofil für den Modelltyp „flache Lagerung“

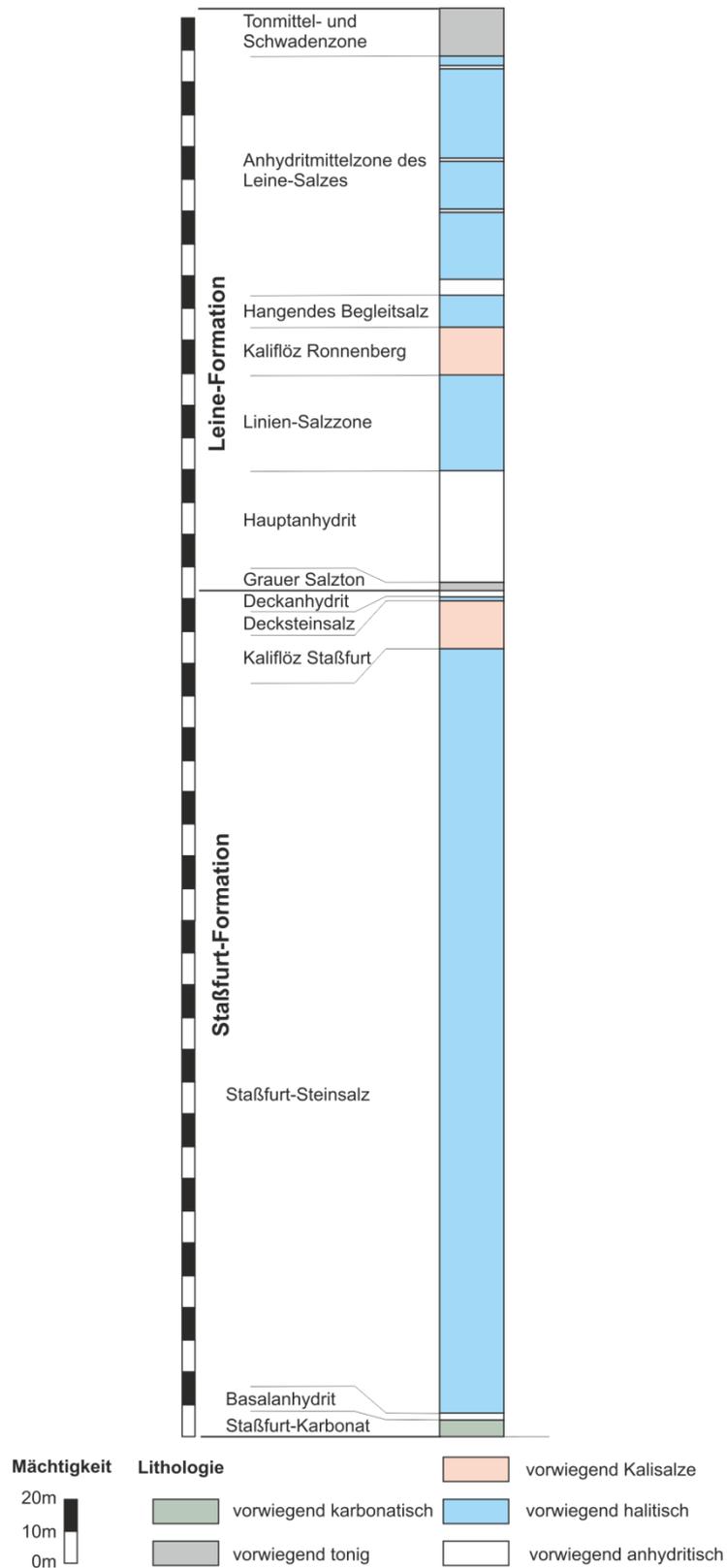


Abbildung 4-3 Generalisiertes Normalprofil der Staßfurt- und Leine-Formationen für das generische 3D-Modell für die flach lagernden Steinsalzfolgen

4.3 Erstellung des geologischen Referenzschnittes für den Typ „flache Lagerung“

Basierend auf der in Kapitel 4.2.2 beschriebenen generischen geologischen Schichtenfolge wurden Referenzschnitte erarbeitet. Diese stellen die Abfolge, Mächtigkeit und Lagerungsverhältnisse der Schichten dar und dienen als eine Grundlage für die räumliche Planung des Endlagers. Das darauf basierende generische geologische 3D-Modell stellt die Basis für die Entwicklung des Endlagerkonzeptes sowie des Sicherheits- und Nachweiskonzeptes dar (Abbildung 4-4).

Im Ergebnis der Auswertungen wurden 18 regional gut charakterisierbare lithostratigraphische Einheiten im Referenzschnitt berücksichtigt. Jede Modell-Einheit ist lithologisch einheitlich definiert und wird mit geomechanischen, thermischen und hydraulischen Parametern hinterlegt. Da durch regionale Fazieswechsel oder aufgrund der Lagerungsverhältnisse eine Variation der Modellparameter im Rahmen natürlicher Schwankungen gegeben ist, werden für die einzelnen Modell-Einheiten gemittelte Parameter abgeleitet.

Der ca. 10 km lange generische geologische Schnitt AA´ wurde basierend auf den z. Zt. vorhandenen Kenntnissen zu flach lagernden Salinarschichten in Deutschland erarbeitet. Der Schnitt stellt eine charakteristische geologische Gesamtsituation in den Regionen mit flach lagernden Steinsalzfolgen des Zechsteins in Deutschland dar. Die Mächtigkeiten und Tiefenlagen der 18 Modell-Einheiten sind dem generischen geologischen Schnitt und der dazugehörigen Tabelle zu entnehmen (Abbildung 4-4).

Als Einlagerungshorizont wurde für das Vorhaben KOSINA das Steinsalzlager der Staßfurt-Formation festgelegt. Es liegt im Tiefenbereich, der entsprechend den Randbedingungen für die Errichtung eines Endlagers für wärmeentwickelnde Abfälle und ausgediente Brennelemente als günstig angesehen wird (Kapitel 4.2.1) und weist eine Mächtigkeit deutlich größer 100 m auf (Tabelle 4-1).

Tabelle 4-1 Tiefenlage und Mächtigkeit des Einlagerungshorizontes im Schnitt AA´

	Von	bis
Tiefenlage des Tops	-540 m NN (610 m u. GOK)	-980 m NN (1050 m u. GOK)
Tiefenlage der Basis	-700 m NN (760 m u. GOK)	-1200 m NN (1270 m u. GOK)
Mächtigkeit, ca.	150 m	265 m

Die Lagerungsverhältnisse im generischen geologischen Schnitt sind durch eine Neigung der salinaren Schichtenfolge von 5° bis 7° gekennzeichnet. Eine leichte Neigung der Sedimentschichten ist für alle betrachteten Regionen mit flach lagernden Salzschiechten in Deutschland charakteristisch und wird deswegen im generischen geologischen Schnitt widergespiegelt.

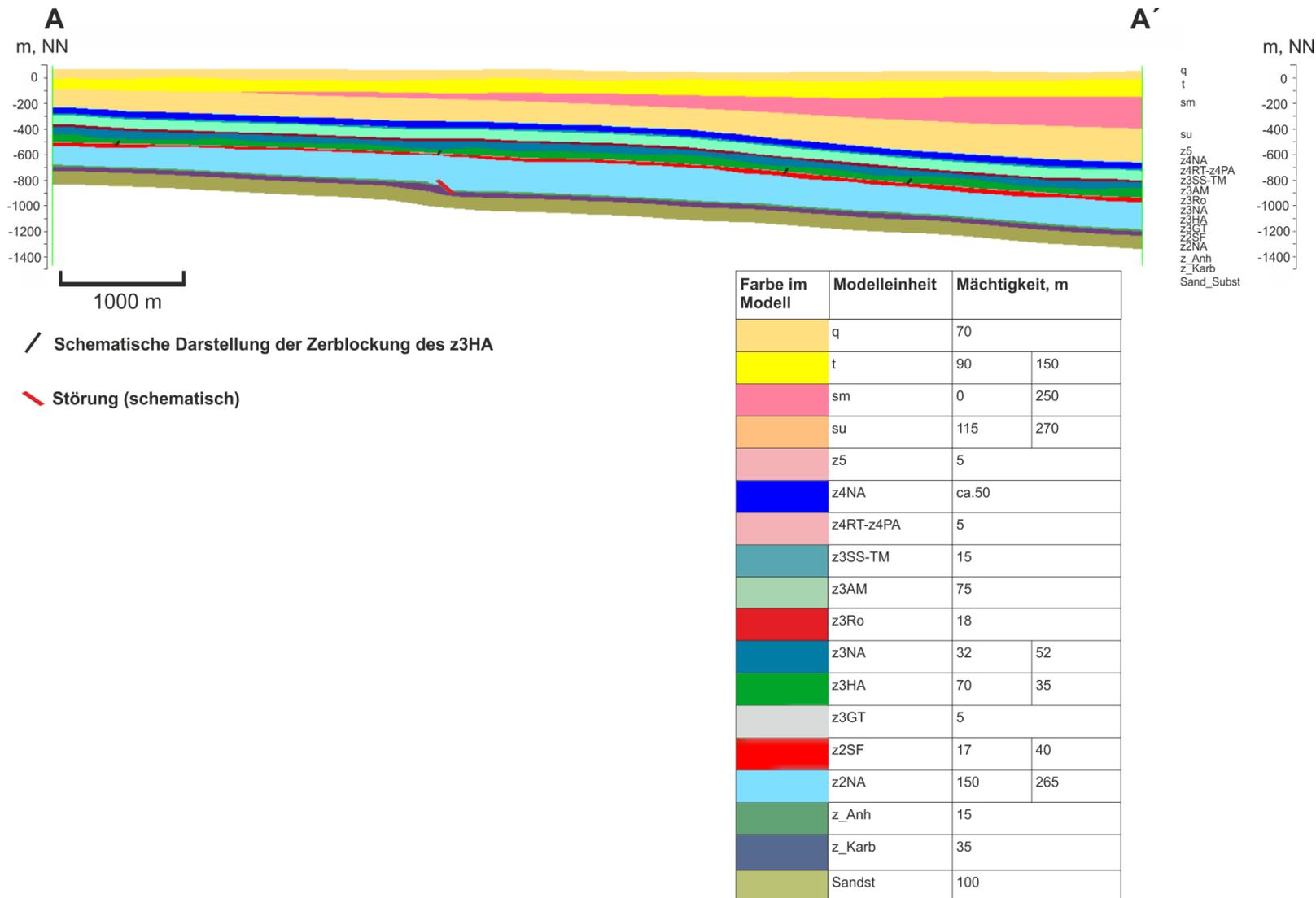


Abbildung 4-4 Generischer geologischer Schnitt AA' für den Modelltyp „flache Lagerung“

Zwecks Verbesserung der räumlichen Vorstellungen zu der Verbreitung, Neigung und zu den Mächtigkeitsänderungen der Schichten wurden senkrecht zu dem Schnitt AA' (Abbildung 4-4) drei weitere Schnitte erstellt (Abbildung 4-5). Aus Abbildung 4-5 ist ersichtlich, dass die saline Schichtenfolge im Modellgebiet eine SW-Haupteinfallrichtung aufweist. Diese Darstellung ist die Grundlage für die Auswahl eines Teilgebietes für die räumliche Positionierung des Endlagers. Nach der Festlegung der Lage und Größe des Endlagerbereichs wird die Größe des Modellgebietes definiert. Der entsprechende Abschnitt des Schnittes AA' wird anschließend als Grundlage für die Erstellung des generischen geologischen 3D-Modells verwendet.

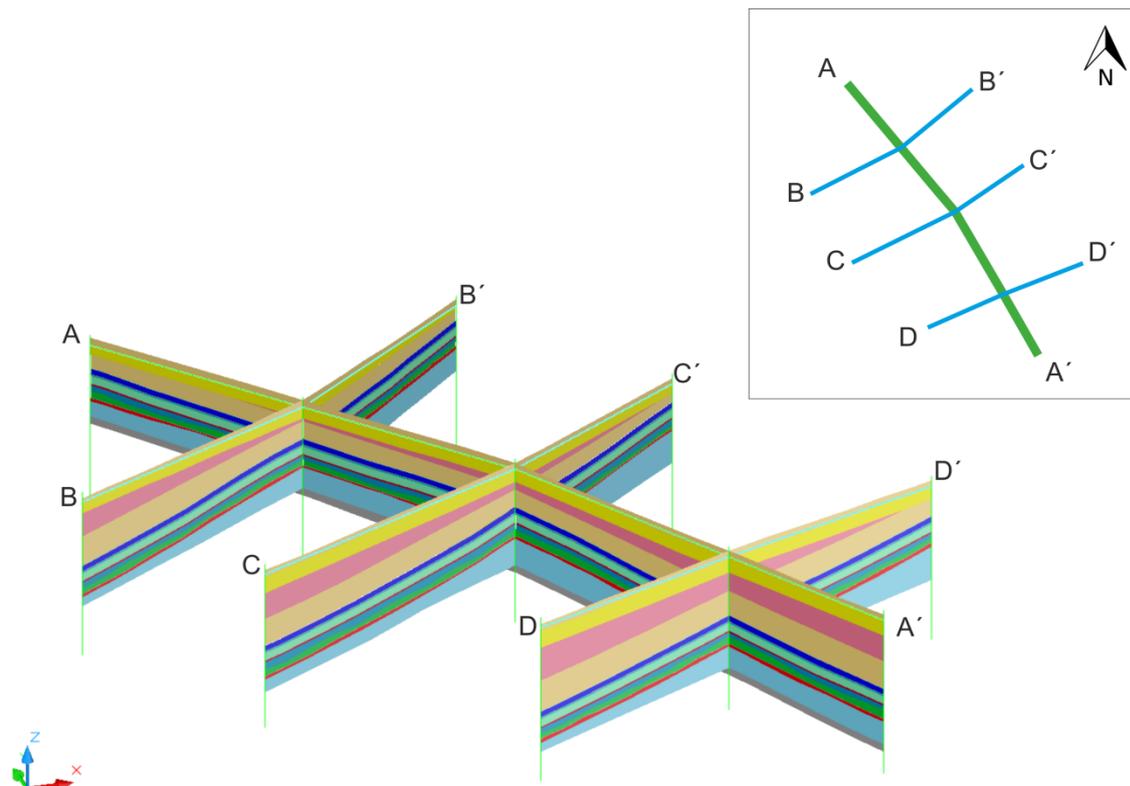


Abbildung 4-5 Generische geologische Schnitte durch das Modellgebiet

4.4 Ausblick

Aufgrund der weit verbreiteten halokinetischen Prozesse werden auch in Gebieten überwiegend flach lagernder Steinsalzfolgen lokale Anstauungen durch Salzzustrom und Aufwölbungen des supra-salinaren Deckgebirges beobachtet. Die damit verbundenen Mächtigkeitszunahmen des Salzes können für die Betrachtung der Steinsalzfolgen als Endlagerwirtsgestein genutzt werden und werden im Modell B (Typ „Salzkissen“) berücksichtigt.

Der Referenzschnitt für das Modell B „Salzkissen“ wird in der nächsten Vorhabensphase erstellt.

Als Grundlage für die Erstellung des Referenzschnittes für das Modell B „Salzkissen“ werden analog zum Modell A die Randbedingungen (Kapitel 4.2.1) und die durch Literaturrecherchen

zusammengestellten Kenntnisse über Salzkissen in Deutschland berücksichtigt. Außerdem werden in der nächsten Vorhabensphase für die generischen geologischen 3D-Modelle eine differenzierte Beschreibung aller Schichten durchgeführt sowie die thermischen, hydraulischen und mechanischen Modellparameter für die THM-Modellberechnungen zusammengestellt.

5 Grundzüge des Sicherheits- und Nachweiskonzeptes

5.1 Vorgehensweise

Das Sicherheits- und Nachweiskonzept im Vorhaben KOSINA wird iterativ entwickelt. Der vorliegende Zwischenbericht enthält daher zunächst die Grundzüge des Sicherheitskonzeptes. Hierfür wurde auch überprüft, inwieweit die entsprechenden Arbeitsergebnisse aus dem FuE-Vorhaben ISIBEL /DBETEC 2008a/ und der VSG /GRS 2012b/ für ein Endlager in flach lagernden Steinsalzformationen verwendet werden können. Notwendige Anpassungen sind entsprechend hergeleitet und beschrieben.

Wie in Kapitel 3.3 beschrieben, liegen dem Sicherheitskonzept Leitgedanken zu Grunde, die in übergeordneter und qualitativer Weise beschreiben, wie die sichere und langfristige Endlagerung der radioaktiven Abfälle erreicht werden soll. Anhand der Leitgedanken werden zunächst Zielsetzungen für das Sicherheitskonzept formuliert sowie strategische planerische und technische Maßnahmen für die Entwicklung des Endlagerkonzeptes und für die Auslegung des Endlagerbergwerks abgeleitet und ggf. Anforderungen an diese Maßnahmen beschrieben. Dabei werden nicht alle Aspekte aus den Sicherheitsanforderungen /BMU 2010a/ vollumfänglich einbezogen. Da das FuE-Vorhaben KOSINA sich im konzeptionellen Bereich bewegt, sind die Anforderungen, die sich auf administrative Maßnahmen beziehen, im Wesentlichen im Abschnitt 9 und 10, nicht einschlägig. Das hier dargestellte Sicherheits- und Nachweiskonzept bezieht sich deshalb nur auf die Aspekte und Anforderungen, die die technische Sicherheit in der Nachverschlussphase betreffen.

Die Anforderungen an die aus den Zielsetzungen des Sicherheitskonzeptes abgeleiteten Maßnahmen sind in der Regel zunächst qualitativer Natur. Bei der Entwicklung des Endlagerkonzeptes und bei der detaillierten technischen Auslegung des Endlagerbergwerks ist die Erfüllung der qualitativen Anforderungen zu belegen. In einigen Fällen können aber bereits auf Ebene des Sicherheitskonzeptes auf Grund vorhandener Erkenntnisse quantitative Anforderungen formuliert werden, so z. B. bei der Festlegung von Maximaltemperaturen oder bei der Festlegung von Sicherheitsabständen. Für die in diesem Bericht dargelegten Grundzüge des Sicherheits- und Nachweiskonzeptes werden an einigen Stellen Angaben aus der Literatur zitiert, die als Ausgangswerte für die einzelnen Nachweise dienen sollen. Diese Werte sind keine festgelegten Vorgaben aus dem Sicherheitskonzept.

5.2 Randbedingungen und Zielsetzungen

Die nationalen gesetzlichen und untergesetzlichen Regelungen legen die wesentlichen Rahmenbedingungen für die Endlagerung radioaktiver Abfälle fest. Dazu gehören unter anderem das Atomgesetz /AtG 2015/, die Strahlenschutzverordnung /StrlSchV 2014/ sowie das Bundesberggesetz /BBergG 2013/ mit der zugehörigen Bundesbergverordnung /ABergV 2012/. Sie sind somit auch für das Vorhaben KOSINA einschlägig; darüber hinaus sind vor allem die „Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle“ /BMU 2010a/ maßgeblich. Im Vorhaben KOSINA sind ferner die einschlägigen internationalen Empfehlungen der ICRP, der IAEA /IAEA 2011/ sowie der OECD-NEA /NEA 2004, NEA 2009/ zu berücksichtigen, insbesondere soweit sie Ergänzung-

gen oder Konkretisierungen zu den nationalen Regelungen enthalten. Das Dokument /IAEA 2011/ ist für alle Arten von Endlagern, auch für oberflächennahe, formuliert worden, weshalb im Vorhaben KOSINA auch noch auf die früheren, spezifischeren Anforderungen für ein Endlager in tiefen geologischen Schichten /IAEA 2006/ zurückgegriffen wird.

In Kapitel 3 der Sicherheitsanforderungen /BMU 2010a/ werden für die Endlagerung wärmeentwickelnder hochradioaktiver Abfälle zwei wesentliche allgemeine Schutzziele formuliert:

- *Der dauerhafte Schutz von Mensch und Umwelt vor der ionisierenden Strahlung und sonstigen schädlichen Wirkungen dieser Abfälle*
- *die Vermeidung unzumutbarer Lasten und Verpflichtungen für zukünftige Generationen.*

Darüber hinaus werden in Kapitel 4 insgesamt acht Sicherheitsprinzipien genannt, unter deren Beachtung die beiden allgemeinen Schutzziele zu erreichen sind. Von diesen lassen sich einige konkrete Hinweise für die Erstellung des Sicherheits- und Nachweiskonzeptes im Vorhaben KOSINA ablesen. Außerdem muss sich das Endlagersystem durch Robustheit auszeichnen.

In den Sicherheitsanforderungen /BMU 2010a/ wird die Entwicklung eines Sicherheitskonzeptes für die Betriebsphase und die Nachverschlussphase des Endlagers gefordert. Dabei muss das Sicherheitskonzept sowohl sicherheitsrelevante Aspekte der Betriebsphase als auch der Nachverschlussphase in einem ganzheitlichen Ansatz widerspruchsfrei berücksichtigen. Es muss gewährleistet sein, dass gemäß den Sicherheitsanforderungen /BMU 2010a/, Abschnitt 8.6, in der Betriebsphase bis zum Verschluss der Schächte eine Rückholung der Abfallbehälter möglich ist. Dabei dürfen Maßnahmen, die zur Sicherstellung der Möglichkeiten zur Rückholung getroffen werden, die Langzeitsicherheit des Endlagersystems nicht beeinträchtigen.

Die sicherheitsrelevanten Aspekte der betrieblichen Abläufe als solche (Abschnitte 8.1 und 8.8 der Sicherheitsanforderungen) können erst dann detailliert bewertet werden, wenn die Planung der Endlagerkonzepte im dazu notwendigen Detaillierungsgrad vorliegt, welches im Vorhaben KOSINA nicht geplant ist. Es erfolgt aber eine Einschätzung, ob die für KOSINA entwickelten Endlagerkonzepte dem Stand von Wissenschaft und Technik entsprechen und ob aus Sicht der Betriebssicherheit grundlegende Bedenken gegen die Machbarkeit erkennbar sind.

Das im Vorhaben KOSINA zu entwickelnde Sicherheits- und Nachweiskonzept für ein Endlager in flach lagernden Steinsalzformationen bezieht sich somit im Wesentlichen auf die Nachverschlussphase und dient der Konkretisierung der für das Vorhaben relevanten Vorgaben in /BMU 2010a/. Dabei werden die entsprechenden Arbeitsergebnisse aus dem FuE-Vorhaben ISIBEL /DBETEC 2008a/ und der VSG /GRS 2012b/ berücksichtigt. Im Einzelnen werden folgende Aufgaben durchgeführt:

1. Entwicklung eines Sicherheitskonzeptes für ein Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle und ausgediente Brennelemente in flach lagernden Salzformationen
2. Entwicklung eines auf dem Sicherheitskonzept basierenden Nachweiskonzeptes
3. Entwicklung eines Konzepts zum Umgang mit Ungewissheiten

Die bis zum Jahresende 2015 vorliegenden Zwischenergebnisse der Arbeiten zu den ersten beiden Aufgaben sind in den folgenden Kapiteln dokumentiert. Die Ausarbeitung eines Konzeptes zum Umgang mit Ungewissheiten erfolgt im weiteren Verlauf des Vorhabens KOSINA.

5.3 Entwicklung eines Sicherheitskonzeptes

5.3.1 Relevante Vorgaben der Sicherheitsanforderungen des Umweltministeriums

Im Sicherheitskonzept müssen für die zur Durchführung des Vorhabens KOSINA relevanten Aspekte der Sicherheitsanforderungen /BMU 2010a/ Konkretisierungen vorgenommen werden. Für das Sicherheitskonzept für die Nachverschlussphase sind vor allem Aspekte in den Abschnitten 4 (Sicherheitskriterien), 5 (Optimierung), 6 (Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen), 7 (Sicherheitsnachweise) und 8 (Endlagerauslegung) relevant. Da das Vorhaben KOSINA sich eher im technisch-konzeptionellen Bereich bewegt, sind die Sicherheitsanforderungen, die sich auf administrative Maßnahmen beziehen (i. W. Abschnitt 9: Sicherheitsmanagement, Abschnitt 10: Dokumentation) dagegen nicht einschlägig.

Nachfolgend sind die für das Vorhaben KOSINA relevanten Bestimmungen aus /BMU 2010a/ auszugsweise zitiert (in Kursivschrift) und die entsprechenden Abschnitte angegeben, um später eine einfachere Zuordnung der für das Sicherheitskonzept formulierten Ziele und der daraus abgeleiteten Maßnahmen zu diesen Vorgaben zu ermöglichen:

Der dauerhafte Schutz von Mensch und Umwelt ist unter Beachtung folgender Sicherheitsprinzipien zu erreichen:

- 4.1 *Die radioaktiven und sonstigen Schadstoffe in den Abfällen müssen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich konzentriert und eingeschlossen und damit möglichst lange von der Biosphäre ferngehalten werden.*
- 4.2 *Die Endlagerung muss sicherstellen, dass Freisetzungen radioaktiver Stoffe aus dem Endlager langfristig die aus der natürlichen Strahlenexposition resultierenden Risiken nur sehr wenig erhöhen.*
- 4.3 *Die Endlagerung darf die Artenvielfalt nicht gefährden. Dabei wird davon ausgegangen, dass auch terrestrische Ökosysteme sowie andere Spezies in ihrer Art geschützt werden, wenn der Mensch als Individuum vor ionisierender Strahlung geschützt ist.*

- 4.4 Die anderweitige Nutzung der natürlichen Ressourcen darf nicht unnötig eingeschränkt werden.

[...]

Zur Vermeidung unzumutbarer Lasten und Verpflichtungen für zukünftige Generationen sind folgende Sicherheitsprinzipien zu beachten:

- 4.6 Das Endlager ist so zu errichten und so zu betreiben, dass für den zuverlässigen langfristigen Einschluss der radioaktiven Abfälle im einschlusswirksamen Gebirgsbereich in der Nachverschlussphase keine Eingriffe oder Wartungsarbeiten erforderlich werden.

[...]

Über die genannten Sicherheitsprinzipien hinaus sind folgende Bestimmungen der Sicherheitsanforderungen /BMU 2010a/ für das Vorhaben KOSINA relevant:

- 5.1 [...] Entscheidend für die Zuverlässigkeit des langzeitsicheren Einschlusses ist ein robustes Barrierensystem, bei dem die Sicherheitsfunktionen des Endlagersystems und seiner Barrieren gegenüber inneren und äußeren Einflüssen und Störungen unempfindlich sind, das Verhalten des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs gut prognostizierbar ist und die Ergebnisse der Sicherheitsanalyse gegenüber Abweichungen von den zugrunde gelegten Annahmen unempfindlich sind. [...]
- 5.2 Die Optimierung des Endlagers mit Blick auf eine zuverlässige Isolation der radioaktiven Stoffe im Endlager vor zukünftigen menschlichen Aktivitäten ist nachrangig zu den oben aufgeführten Optimierungszielen durchzuführen. [...]
- 6.1 Maßgeblich für den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen in der Nachverschlussphase ist die Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs. Die radioaktiven Abfälle müssen in diesem Gebirgsbereich so eingeschlossen sein, dass sie dort verbleiben und allenfalls geringfügige Stoffmengen diesen Gebirgsbereich verlassen können. Zusätzliche Expositionen sollen nur in einem begrenzten Gebiet auftreten können, so dass möglichst wenige Personen einer Generation betroffen sein können.
- 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.
- 8.2 Die Durchörterung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs mit Schächten, Auffahrungen oder Bohrungen ist zu minimieren. Bohrungen, Schächte und weitere Auffahrungen sind gebirgsschonend auszuführen und, falls sie nicht mehr gebraucht werden, vor dem Einlagerungsbetrieb so zu verschließen, dass die Barriereeigen-

schaften des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs und sonstiger sicherheitsrelevanter Barrieren erhalten bleiben.

- 8.3 *Bei der Festlegung der Grenzen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs mit den darin aufgefahrenen Einlagerungsfeldern und Einlagerungskammern oder Einlagerungsbohrlöchern müssen sowohl eine hinreichende Tiefenlage wie auch ein ausreichender Abstand zu geologischen Störungen eingehalten werden. Die Tiefenlage und der Abstand sind im Rahmen der durchgeführten Sicherheitsanalysen und Sicherheitsbewertungen abzuleiten.*
- 8.5 *Das Endlager ist in Einlagerungsfelder mit einzelnen Einlagerungsbereichen zu untergliedern. Die Anzahl der offenen Einlagerungsbereiche ist gering zu halten. Diese sind zügig zu beladen, anschließend zu verfüllen und sicher gegen das Grubengebäude zu verschließen.*
- 8.6 *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.*
 - In der Betriebsphase bis zum Verschluss der Schächte oder Rampen muss eine Rückholung der Abfallbehälter möglich sein.*

Maßnahmen, die zur Sicherstellung der Möglichkeiten zur Rückholung oder Bergung getroffen werden, dürfen die passiven Sicherheitsbarrieren und damit die Langzeitsicherheit nicht beeinträchtigen.

- 8.7 *Das Einschlussvermögen des Endlagers muss auf verschiedenen Barrieren mit unterschiedlichen Sicherheitsfunktionen beruhen. Mit Blick auf die Zuverlässigkeit des Einschlusses ist das Zusammenspiel dieser Barrieren in ihrer Redundanz und Diversität zu optimieren. Dabei sind das Gefährdungspotenzial der Abfälle und die unterschiedliche Wirkung der Barrieren in den verschiedenen Zeitbereichen zu berücksichtigen. Die Sicherheit des Endlagers nach seiner Stilllegung ist demnach durch ein robustes, gestaffeltes Barrierensystem sicherzustellen, das seine Funktionen passiv und wartungsfrei erfüllt und das seine Funktionstüchtigkeit selbst für den Fall in ausreichendem Maße beibehält, falls einzelne Barrieren nicht ihre volle Wirkung entfalten.*
- 9.7 *Für die Zeit nach erfolgtem Verschluss sind administrative Vorkehrungen zu treffen, die so effektiv wie praktisch erreichbar bewirken, dass keine den dauerhaften Einschluss der Abfälle gefährdenden menschliche Aktivitäten im Bereich des Endlagers durchgeführt werden. Diese Maßnahmen müssen außerdem so konzipiert sein, dass sie möglichst lange in die Zukunft wirksam bleiben.*

5.3.2 Leitgedanken

Das Sicherheitskonzept für ein Endlager in einer flach lagernden Salzformation basiert, ausgehend von den allgemeinen Vorgaben zum Sicherheitskonzept in /BMU 2010a/, auf folgenden Leitgedanken:

- Es soll ein möglichst weitgehender Einschluss der radioaktiven Abfälle in einem definierten Gebirgsbereich um die Abfälle herum erreicht werden. (vgl. Abschnitte 4.1, 4.2, 4.3 und 6.1 der Sicherheitsanforderungen /BMU 2010a/)
- Der Einschluss soll dabei sofort nach Verschluss des Endlagerbergwerks wirksam werden und durch das Endlagersystem dauerhaft und nachsorgefrei sichergestellt sein. (vgl. Abschnitt 4.6 der Sicherheitsanforderungen /BMU 2010a/)
- Der sofortige und dauerhafte Einschluss der radioaktiven Abfälle in einem definierten Gebirgsbereich um die Abfälle soll vorrangig dadurch erreicht werden, dass ein Zutritt von Lösungen zu den Abfällen verhindert oder zumindest stark begrenzt wird.

Diese Leitgedanken gelten gleichermaßen für alle Endlagersysteme im Wirtsgestein Salz. Sie sind daher identisch mit den für ein Sicherheitskonzept bei Endlagern in Salzstöcken formulierten Leitgedanken in /GRS 2012b/.

Die geologische Barriere soll den Einschluss der radioaktiven Abfälle nachsorgefrei und dauerhaft sicherstellen. Wesentlich für die dauerhafte Einschlusswirkung eines Endlagers im Salzgestein ist die geologische Barriere im ewG mit ihrer praktischen Dichtheit gegenüber Fluiden. Dazu muss die Integrität der geologischen Barriere sichergestellt sein, was durch die Eigenschaften des Salzgesteins im ewG gewährleistet werden muss.

Steinsalz und Kalisalze besitzen die Fähigkeit zur bruchlosen duktilen Deformation mit gleichzeitigem Abbau lokaler Spannungen. Unter andauernd kompressiver Belastung verheilen Klüfte und Risse im Steinsalz aufgrund seines hohen Kriechvermögens relativ schnell, insbesondere bei Anwesenheit von Feuchtigkeit. Verheilung bedeutet, dass sich zwischen benachbarten Rissflächen wieder Kohäsion aufbaut oder aber, dass ein Riss durch Sekundärmineralisation wieder verschlossen wird. Die Permeabilitäten des vormals geklüfteten Gesteins erreichen im Ergebnis der Rissschließungs- und Verheilungsprozesse wieder die Werte des ungeklüfteten Gesteins; wie durch In-situ-Messungen nachgewiesen worden ist /GRS 2004/.

Bei der Bergwerksauffahrung ist die Durchfahrung der geologischen Barriere unvermeidbar. Dadurch werden direkte Wegsamkeiten zu den einzulagernden Abfällen geschaffen. Außerdem wird die geologische Barriere in konturnahen Bereichen aufgelockert und damit in ihrer Wirkung lokal geschwächt. Das visko-elastische bzw. visko-plastische Verhalten des Salzgesteins führt, allerdings erst mit der Zeit, zum Verschluss bergbaulicher Auffahrungen wie Schächte und Strecken, wobei das Salzgestein in konturnahen Bereichen seine ursprünglichen barrierewirksamen Eigenschaften zurückgewinnt. Durch Einbringung von Versatz kann dieser Prozess unterstützt werden, wobei das Versatzmaterial langfristig und dauerhaft möglichst ähnliche hydraulische sowie thermo- und geomechanische Eigenschaften wie das unverritzte Steinsalz aufweisen sollte.

Eine Verfüllung der bergbaulich geschaffenen Hohlräume mit Versatzstoffen, die sofort nach Verschluss des Endlagers zu einer wirksamen Abdichtung führen, ist prinzipiell möglich /Minkley 2015/. Nach dem Stand der Technik müssten dazu aber Versatzstoffe (Salzschmelzen u.a.) verwendet werden, die sich in ihrer Zusammensetzung deutlich vom Salzgestein der geologischen Barriere unterscheiden, was möglicherweise zu Wechselwirkungen führt, die langfristig die Wirksamkeit der Versatzstoffe in Frage stellen können.

Um eine dauerhafte und langzeitstabile Hohlraumverfüllung sicherzustellen, soll daher als Versatzstoff der bei der Auffahrung anfallende Salzgrus, und damit dasselbe Salzgestein wie die umgebende geologische Barriere, verwendet werden. Durch die Kompaktion des Salzgrusversatzes entfaltet der Versatz mit der Zeit eine Dichtwirkung, die vergleichbar mit derjenigen der anstehenden, ungestörten geologischen Barriere ist. Die bis zum Erreichen der Endzustände erforderlichen Zeiträume liegen je nach Konvergenzrate, Feuchtegehalt und Umgebungstemperatur zwischen einigen zehn bis einigen tausend Jahren. Deshalb sind zusätzlich geotechnische Verschlussbauwerke wie Schacht- und Streckenverschlüsse vorgesehen, die sofort nach Verschluss des Endlagers eine spezifizierte Dichtwirkung aufweisen. Dabei muss insbesondere der Zutritt von Tages-, Deckgebirgs- und Formationswässern zu den Einlagerungsbereichen bereits zum Zeitpunkt des Verschlusses des Endlagers verhindert werden oder hinreichend klein sein.

Die Verschlussbauwerke sind in der Nachverschlussphase Einwirkungen und Alterationsprozessen ausgesetzt, so dass möglicherweise die Wirksamkeit dieser Verschlussbauwerke nicht über den gesamten Nachweiszeitraum gegeben ist bzw. nicht zweifelsfrei nachgewiesen werden kann. So müssen die Schachtverschlüsse und Streckenverschlüsse mindestens solange hinreichend dicht sein, bis der hydraulische Widerstand des Versatzstoffes groß genug ist, um ein Vordringen von Lösungen zu den Abfällen zu verhindern bzw. soweit zu begrenzen, dass das Schutzniveau gemäß Abschnitt 6 der Sicherheitsanforderungen /BMU 2010a/ erreicht wird.

Neben der Verhinderung oder Begrenzung eines Lösungszutritts zu den Abfällen tragen diese und weitere Barrieren zum dauerhaften Einschluss bei, indem sie die Freisetzung von Radionukliden aus dem ewG verhindern bzw. behindern. So verzögert die Abfallmatrix die Freisetzung von Radionukliden aus den Abfällen.

In Abbildung 5-1 ist schematisch dargestellt, wie die einzelnen Barrieren in der Nachverschlussphase zeitlich wirken und sich in ihrer Wirkung ergänzen. Der Zeitpunkt $t = 0$ entspricht dem Zeitpunkt, zu dem das Endlagerbergwerk verschlossen wird. Die Farbtintensität spiegelt für die einzelnen Barrieren jeweils die Zu- bzw. Abnahme ihrer Barrierenwirkung wider, die für die geologische Barriere, die Schacht- und Streckenverschlüsse sowie die BE-Behälter nachzuweisen ist. Die auf der logarithmischen Zeitskala dargestellten Zeitmarken dienen dabei nur einer groben Orientierung und stellen keine Anforderungen oder Vorgaben dar. Allerdings ergeben sich für die Brennelement-Behälter quantitative Anforderungen aus Abschnitt 8.6 der Sicherheitsanforderungen (siehe Kapitel 5.3.1).



Abbildung 5-1 Zeitliche Wirkung der verschiedenen Barrieren im Endlagersystem in der Nachverschlussphase /GRS 2012b/.

5.3.3 Zielsetzungen und Maßnahmen für die Nachverschlussphase

Für die Konkretisierung des Sicherheitskonzeptes im Vorhaben KOSINA lassen sich, ausgehend von den Sicherheitsanforderungen /BMU 2010a/ und den in Kapitel 5.3.2 genannten Leitgedanken, drei Grundanforderungen definieren, aus denen sich die konkreten Zielsetzungen ableiten und strategische, planerische Maßnahmen festlegen lassen:

- Grundanforderung A: Die eingelagerten Abfallgebinde sollen schnell und möglichst dicht vom Salzgestein im Verbund mit den geotechnischen Barrieren eingeschlossen werden (Einschlussgedanke).
- Grundanforderung B: Der ausgewiesene einschlusswirksame Gebirgsbereich bleibt im Nachweiszeitraum erhalten und seine Barrierefunktion (geologische Barriere und geotechnische Barrieren) wird weder durch interne noch durch externe Vorgänge und Prozesse beeinträchtigt (Integritätsgedanke / Wartungsfreiheit).
- Grundanforderung C: Eine Kritikalität muss in jeder Phase der Endlagerentwicklung ausgeschlossen werden. (Kritikalitätsausschluss)

Aus den Sicherheitsanforderungen /BMU 2010a/ ergibt sich außerdem die Grundanforderung, dass die Abfallbehälter für alle wahrscheinlichen Entwicklungen über einen Zeitraum von 500 Jahren nach Verschluss des Endlagerbergwerks bei einer eventuellen Bergung handhabbar sein müssen, wobei es zu keiner Freisetzung von Aerosolen aus den Behälterinneren kommen darf. Abfallbehälter, für die derartige Nachweise bereits geführt worden

sind, gibt es aber zurzeit nicht. Es wird für das Vorhaben KOSINA davon ausgegangen, dass in der Zukunft die Abfallbehälter entsprechend ausgelegt werden können und ihre Handhabbarkeit für eine eventuelle Bergung nachgewiesen werden kann.

In den folgenden Unterkapiteln werden für die drei oben genannten Grundanforderungen die sich daraus ableitenden Zielsetzungen (Z) und strategischen Maßnahmen (M) aufgeführt und der jeweilige Bezug zu den entsprechenden Sicherheitsanforderungen genannt. Die Maßnahmen umfassen planerische Festlegungen in Bezug auf die Positionierung und Auslegung der Grubenbaue des Endlagerbergwerks im Einlagerungshorizont der flach lagernden Salzschiefer als auch technische Vorkehrungen. Dabei ist zu beachten, dass die Maßnahmen in ihrer Gesamtheit dazu beitragen, die Zielsetzungen des Sicherheitskonzeptes zu erreichen. Zur besseren Unterscheidung und Bezugnahme werden den einzelnen Zielsetzungen und Maßnahmen jeweils eindeutige Kennungen zugeordnet.

5.3.3.1 Zielsetzungen

Aus der Grundanforderung A, dass die eingelagerten Abfallgebinde schnell und möglichst dicht vom Salzgestein eingeschlossen werden sollen, lassen sich folgende Zielsetzungen ableiten:

- Z1: Bei den als wahrscheinlich eingestuften möglichen zukünftigen Entwicklungen des Endlagersystems wird angestrebt, dass keine Lösungen zu den Abfällen zutreten oder allenfalls ein Zutritt von sehr geringen Lösungsmengen zu den Abfällen erfolgt (vgl. Abschnitte 4.1, 4.2, 6.1 und 8.2 der Sicherheitsanforderungen /BMU 2010a/).
- Z2: Bei den als weniger wahrscheinlich eingestuften möglichen Entwicklungen des Endlagersystems soll es allenfalls zu einem Zutritt von geringen Lösungsmengen zu den Abfällen kommen (vgl. Abschnitte 4.1, 4.2, 6.1 und 8.2 der Sicherheitsanforderungen /BMU 2010a/).
- Z3: Für den Fall, dass es zu einer Mobilisierung von Schadstoffen aus den Abfällen kommt, soll der Transport dieser Schadstoffe aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich durch chemische und physikalische Prozesse behindert bzw. verzögert werden. Dies gilt sowohl für den Schadstofftransport in der Gasphase (Gaspfad) als auch in der flüssigen Phase (Lösungspfad) (vgl. Abschnitte 4.1, 4.2, 6.1 und 8.7 der Sicherheitsanforderungen /BMU 2010a/).
- Z4: Die Eigenschaften des Salzgesteins und der technischen Komponenten, die den Einschluss der Radionuklide gewährleisten sollen, sollen gut charakterisierbar sein (vgl. Abschnitte 5.1 und 8.7 der Sicherheitsanforderungen /BMU 2010a/).
- Z5: Das Endlager soll so ausgelegt werden, dass in der Nachverschlussphase keine korrigierenden Eingriffe notwendig sind (vgl. Abschnitte 4.6, 5.2 und 8.7 der Sicherheitsanforderungen /BMU 2010a/).

- Z6: Die technischen Komponenten sollen robust ausgelegt werden, so dass ihre Sicherheitsfunktionen unter Berücksichtigung unterschiedlicher Beanspruchungszustände sowie Korrosions- bzw. Degradationsprozesse und möglicher Alterungsprozesse gewährleistet sind (vgl. Abschnitte 5.1 und 5.2 der Sicherheitsanforderungen /BMU 2010a/).
- Z7: Der sofortige und dauerhafte Einschluss der radioaktiven Abfälle im einschlusswirksamen Gebirgsbereich soll durch ein gestaffeltes Barrierensystem, dessen einzelne Elemente zum Teil diversitär und redundant wirken und sich in ihrer zeitlichen Wirksamkeit ergänzen, gewährleistet werden (vgl. Abschnitte 5.2, 7.2.3 und 8.7 der Sicherheitsanforderungen /BMU 2010a/).
- Z8: Im Sinne einer auch im Hinblick auf die Nachweisführung robusten Endlagerplanung, durch welche sichergestellt ist, dass die Anzahl gleichzeitig offener Einlagerungsbereiche minimiert wird, sollen die Einlagerungsbereiche in einzelne Sektionen unterteilt werden, die möglichst schnell sequentiell beladen, verfüllt und gegen das Grubengebäude abgedichtet werden können. Die Separierung und Beladung der Einlagerungsfelder soll so erfolgen, dass Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Abfallarten durch physikalische und/oder chemische Prozesse, die das Einschlussvermögen des ewG negativ beeinflussen können, weitestgehend minimiert werden. (vgl. Abschnitte 5.1 und 8.5 der Sicherheitsanforderungen /BMU 2010a/)

Aus der Grundanforderung B, dass der ausgewiesene einschlusswirksame Gebirgsbereich im Nachweiszeitraum erhalten bleibt und seine Barrierefunktion weder durch interne noch durch externe Vorgänge und Prozesse beeinträchtigt wird, lassen sich folgende Zielsetzungen ableiten:

- Z9: Die Qualität des Einschlusses der radioaktiven Abfälle im einschlusswirksamen Gebirgsbereich soll im Nachweiszeitraum nicht durch oberflächennah ablaufende Prozesse beeinträchtigt werden. (vgl. Abschnitte 5.1 und 8.3 der Sicherheitsanforderungen /BMU 2010a/)
- Z10: Die Qualität des Einschlusses der radioaktiven Abfälle im einschlusswirksamen Gebirgsbereich soll im Nachweiszeitraum nicht durch thermisch induzierte Prozesse beeinträchtigt werden. (vgl. Abschnitt 5.1 der Sicherheitsanforderungen /BMU 2010a/)
- Z11: Kristallwasserhaltige Salzminerale, wie z. B. Carnallit, sollen durch die Temperaturerhöhung im Salzgestein infolge der Einlagerung wärmeentwickelnder Abfälle nicht zersetzt werden. (vgl. Abschnitte 5.1 und 6.1 der Sicherheitsanforderungen /BMU 2010a/)
- Z12: Gasentwicklung und Gasdruckaufbauraten in den Grubenbauen des Endlagerbergwerks sollen so gering sein, dass im einschlusswirksamen Gebirgsbereich kein Frac entsteht, der die Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches verletzt. (vgl. Abschnitte 5.1 und 6.1 der Sicherheitsanforderungen /BMU 2010a/)

Z13: Auswirkungen eines unbeabsichtigten menschlichen Eindringens in den einschlusswirksamen Gebirgsbereich sowie seine Eintrittswahrscheinlichkeit sollen durch entsprechende Auslegung des Endlagers sowie administrative Maßnahmen nach Möglichkeit reduziert werden, wenn die dafür zu treffenden Maßnahmen keine negativen Auswirkungen auf die Langzeitsicherheit haben (vgl. Abschnitte 5.2 und 9.7 der Sicherheitsanforderungen /BMU 2010a/)

Aus der Grundanforderung C, dass eine Kritikalität in jeder Phase der Endlagerentwicklung ausgeschlossen sein muss, lässt sich folgende Zielsetzung ableiten:

Z14 Eine Kritikalität muss durch entsprechende Beladung und Auslegung der Einlagerungsbehälter und durch die Einlagerungsplanung in jeder Phase der Endlagerentwicklung ausgeschlossen werden. (vgl. Abschnitt 7.2.4 der Sicherheitsanforderungen /BMU 2010a/)

5.3.3.2 Strategische Maßnahmen

Aus den Zielsetzungen lassen sich nun konkrete strategische bzw. planerische Maßnahmen ableiten. Folgende Maßnahmen dienen dazu, zur Erfüllung der Zielsetzungen Z1 bis Z8 (Einschluss) beizutragen, wobei in der Regel mit einer Maßnahme mehrere Zielsetzungen umgesetzt werden (in der nachfolgenden Auflistung jeweils durch ihre Kennung angegeben).

M1: Das aufzufahrende Hohlraumvolumen des Endlagerbergwerks wird – unter Berücksichtigung der Standortgegebenheiten – so klein wie möglich gehalten. Die Auffahrung erfolgt unter Einsatz gebirgsschonender (z. B. schneidender anstatt sprengender) Verfahren. Im Hinblick auf die besonderen Gegebenheiten bei der flachen Lagerung ist hierbei insbesondere die seigere Ausdehnung der Einlagerungsgrubenbaue so klein wie möglich zu halten. Auf diese Weise werden die Auswirkungen auf das flach anstehende Salzgestein und damit auf die geologische Barriere insgesamt minimiert. (→ Z1, Z2, Z3; entspricht auch der Sicherheitsanforderung 8.2 /BMU 2010a/)

M2: Die Grubenbaue der Einlagerungsbereiche werden in einem gut charakterisierbaren Salzbereich mit homogenem Aufbau und homogenen Eigenschaften, insbesondere im Hinblick auf ihre Einschlusseigenschaften, aufgefahren. Die Einlagerungsbereiche werden deshalb im Steinsalzhorizont der Staßfurt-Folge (z2NA) angelegt. Dieses zeichnet sich durch vergleichsweise große Mächtigkeiten, einen hohen Rekristallisationsgrad und die Abwesenheit von Störungen, makroskopischen Lösungsvorkommen oder anderen Inhomogenitäten aus. (→ Z4)

M3: Die Grubenbaue der Einlagerungsbereiche werden in Salzgesteinsbereichen angelegt, die frei von Lösungseinschlüssen mit sicherheitsrelevantem Volumen sind und günstige Kriecheigenschaften aufweisen, um eine schnelle Umschließung der Abfälle zu erreichen. Die Einlagerungsbereiche werden deshalb im Steinsalzhorizont der Staßfurt-Folge (z2NA) angelegt. (→ Z1, Z2)

- M4: Die Grubenbaue der Einlagerungsbereiche werden mit ausreichenden Sicherheitsabständen
1. zu den Tagesschächten,
 2. zu den liegend an das Steinsalz der Staßfurt-Folge z2NA angrenzenden Gesteinsschichten und damit zu Gesteinsschichten mit möglichen größeren Lösungs- oder Gasvorkommen sowie
 3. zu hangend angrenzenden potentiellen Fließwegen für Lösungen z. B. im zerblockten Hauptanhydrit z3HA
- errichtet.

Auf Basis der umfangreichen Erfahrungen im Salzbergbau kann abgeleitet werden, dass ein Sicherheitsabstand in der Größenordnung von einigen Zehner Metern ausreicht, um die Integrität des Gebirgsbereichs im Einlagerungshorizont zu bewahren. Für die Arbeiten im Vorhaben KOSINA wurde als Planungsgrundlage für die Entwicklung der verschiedenen Endlagerkonzepte festgelegt, für die Auslegung der Grubenbaue einen Mindestabstand von 50 m anzusetzen, der an jeder Stelle des jeweils konzipierten Endlagerbergwerks zwischen Einlagerungsbereichen und o.g. Gesteinsschichten einzuhalten ist⁴. Es ist für diesen Sicherheitsabstand unter Berücksichtigung von Ungewissheiten bei der Detektion von geologischen Schichtgrenzen, der möglichen Existenz von Klüften begrenzter Reichweite sowie der Ausdehnung der Auflockerungszone um die Grubenbaue zu zeigen, dass die Integrität der geologischen Barriere im einschlusswirksamen Gebirgsbereich gewährleistet ist. Zusätzlich wird ausgehend von Empfehlungen in /IfG 2010/ um das Endlagerbergwerk ein lateraler Sicherheitspfeiler von 500 m festgelegt. Für den Sicherheitsabstand der Einlagerungsgrubenbaue zu den Tagesschächten werden nach /KfK 1989b/ bis zum Vorliegen standortspezifischer Auslegungsrechnungen zunächst 300 m festgelegt. (→ Z1, Z2)

- M5: In den Tagesschächten und in den Zugangstrecken zwischen dem Infrastrukturbereich und den Einlagerungsbereichen werden Verschlussbauwerke mit einem spezifizierten hydraulischen Widerstand qualitätsgesichert errichtet. Die Verschlussbauwerke müssen solange hinreichend dicht sein, bis der hydraulische Widerstand des kompaktierenden Salzgrusversatzes groß genug ist, um ein Vordringen von Lösungen zu den Abfällen zu verhindern bzw. soweit zu begrenzen, dass die Sicherheitsanforderungen (insbesondere die Abschnitte 4 und 8, siehe Kapitel 5.3.1) erfüllt sind. Aus diesem Grund muss ihre Wirksamkeit mindestens für den Zeitraum, der für eine hinreichende Versatzkompaktion benötigt wird, sichergestellt sein. Bei der Auslegung der Verschlussbauwerke werden Lastfälle, die die Bandbreite der möglichen zukünftigen Entwicklungen während ihrer geforderten Funktionsdauer nach Möglichkeit abdecken sollen, zu Grunde gelegt. (→ Z1, Z2, Z3, Z5, Z6, Z7)

⁴ Nach /IfG 2010/ ist ein Sicherheitsabstand zum Liegenden von 150 m ausreichend; in Übereinstimmung mit /GRS 2012a/ wird jedoch ein vorläufiger Wert von 50 m angesetzt

- M6: Die offenen Hohlräume in den Grubenbauen der Einlagerungsbereiche werden mit Salzgrus verfüllt. Die Hohlraumkonvergenz durch das Salzkriechen führt zu einer Kompaktion des Salzgruses und damit zu einer Verringerung seiner Porosität und Permeabilität. In der Nähe der wärmeentwickelnden Abfälle wird die Salzgruskompaktion durch die lokal erhöhten Temperaturen beschleunigt. Die Hohlraumkonvergenz wird durch das Salzgrusvolumen in ihrem Gesamtausmaß begrenzt. Der im Vergleich mit unverfüllten Grubenbauen früher einsetzende Stützdruck sowie der insgesamt geringere Umfang des Salzkriechens führen zu einer beschleunigten Verheilung des Steinsalzes im Bereich der Auflockerungszone sowie zu einer Reduzierung der im Gebirge herrschenden Differenzspannungen. Außerdem wird durch die Einbringung von Versatz der initiale Hohlraum, der maximal mit Lösung erfüllt werden kann, erheblich reduziert. (→ Z1, Z2, Z5, Z6, Z7)
- M7: In den Richtstrecken soll eine hinreichende Dichtwirkung des Versatzes in einem möglichst kurzen Zeitraum erreicht werden. Daher wird der Salzgrus in den Richtstrecken, die zu den Einlagerungsbereichen gehören, geringfügig angefeuchtet, um dessen Widerstand gegen die Kompaktion herabzusetzen und somit eine schnellere Kompaktion zu erreichen. (→ Z1, Z2, Z5, Z6, Z7)
- M8: Die in das Endlager abfallnah eingebrachte Feuchtigkeit wird minimiert. Ziel dieser Maßnahme ist es, die Korrosion der Abfallbehälter und damit die Gasbildung und den Gasdruckaufbau im Endlager zu begrenzen. Bei den wärmeentwickelnden Abfällen, bei denen allenfalls geringe Mengen Restfeuchte vorhanden sein können, wird in die Grubenbaue der Einlagerungsfelder Salzgrusversatz eingebracht, der den natürlichen, geringen Feuchtigkeitsgehalt des Staßfurt-Steinsalzes z2NA besitzt. Dazu werden bei Bedarf betriebliche Vorkehrungen, insbesondere zur Handhabung des bei der Auffahrung gewonnenen Salzgruses getroffen. (→ Z1, Z2, Z5, Z6, Z7)
- M9: Die Schachtverschlussbauwerke werden so ausgelegt, dass ihre Dichtwirkung auf mehreren Dichtelementen aus unterschiedlichen Materialien beruht, die aufgrund ihres jeweiligen Aufbaus teilweise diversitäre Funktionsweisen besitzen. (→ Z6, Z7)
- M10: Im Rahmen der Entwicklung und Auslegung von Endlagerkonzepten werden Einlagerungsstrategien entwickelt, die sicherstellen, dass maximal nur das aus betrieblicher Sicht zur Abfalleinlagerung gleichzeitig erforderliche Hohlraumvolumen aufgefahren wird. Dazu werden die einzelnen Einlagerungsbereiche in Sektionen mit möglichst geringen Einzelvolumina (z. B. Einzelbohrloch, Einzelstrecke) untergliedert, die sequentiell mit Abfallgebinden beladen werden. Nach vollständiger Beladung wird die Einlagerungssektion umgehend verfüllt und mit geeigneten geotechnischen Maßnahmen gegen den restlichen Grubenraum verschlossen. Der Einlagerungsvorgang erfolgt, soweit aus betrieblicher Sicht möglich, im Rückbauverfahren, wobei schachtferne Einlagerungsfelder zuerst beladen, verfüllt und verschlossen werden. Hierdurch wird erreicht, dass die Kompaktion des Salzgrusversatzes bereits zu einem frühen Stadium, während der Betriebsphase, ablaufen kann.

M11: Das Einlagerungsregime wird so angelegt, dass Abfälle mit unterschiedlichen Eigenschaften voneinander getrennt werden. Dies betrifft insbesondere Abfälle mit unterschiedlichen Gasbildungseigenschaften oder chemischen Eigenschaften, die sich auf das geochemische Milieu in Abfallnähe und damit auf die Radionuklidlöslichkeit auswirken können. Hierdurch wird erreicht, dass sicherheitsrelevante chemische oder physikalische Wechselwirkungen zwischen Abfällen verschiedener Eigenschaften weitestgehend vermieden werden und die Prognose des Freisetzungsverhaltens (Quellterm) erleichtert wird. Aus sicherheitstechnischen und methodischen Gründen erfolgt die Einlagerung von wärmeentwickelnden Abfällen (einschließlich der Brennelementstrukturteile) und ggf. der im Vorhaben KOSINA nicht weiter zu betrachtenden vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfällen in separaten Einlagerungsbereichen, die durch geotechnische Bauwerke jeweils von einander als auch vom Infrastrukturbereich mit den Tagesschächten getrennt werden. Hierdurch wird eine hinsichtlich des sicheren Einschlusses nachteilige Beeinflussung der wärmeentwickelnden Abfälle durch vernachlässigbar wärmeentwickelnde Abfälle (z. B. infolge signifikanter Gasentwicklung) unterbunden. (→ Z8)

Folgende Maßnahmen dienen dazu, zur Erfüllung der Zielsetzungen Z9 bis Z13 (Integritäts-erhalt) beizutragen, wobei in der Regel mit einer Maßnahme mehrere Zielsetzungen verfolgt werden (in der nachfolgenden Auflistung jeweils durch ihre Kennung angegeben).

M12: Die Grubenbaue der Einlagerungsbereiche werden mit ausreichenden Sicherheitsabständen zu Salzbereichen wie z. B. Carnallit, die einen nennenswerten Anteil kristallwasserhaltiger Salzminerale enthalten, errichtet, um eine thermische Zersetzung dieser Salzminerale unter den gegebenen Gebirgsbedingungen (Einspanndruck und lokale Temperatur) auszuschließen. Dadurch wird in Verbindung mit der Maßnahme M 14 sichergestellt, dass derartige Salzbereiche stabile und gut prognostizierbare Eigenschaften behalten und die den einschlusswirksamen Gebirgsbereich angrenzenden Salzbereiche keine Eigenschaften annehmen, die zur Beeinträchtigung der Barriereigenschaften des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs führen können. Bis zum Vorliegen standortspezifischer Temperaturausbreitungsrechnungen wird basierend auf bisherigen Erfahrungen für die weiteren Arbeiten in KOSINA vorläufig ein Sicherheitsabstand der Einlagerungsbereiche zum Staßfurt-Carnallit (z2SF) von mindestens 50 m festgelegt. (→ Z11)

M13: Die Grubenbaue des Infrastrukturbereichs und der Einlagerungsbereiche werden in einer Teufenlage errichtet, die eine dauerhafte Einbettung des Endlagerbergwerks im salinaren Wirtsgestein gewährleistet und eine ausreichend große Mächtigkeit der hangenden Salzschieben sowie eine ausreichende Deckgebirgsüberdeckung ermöglicht. In Anlehnung an /IfG 2010/ wird die Mindestmächtigkeit des Zechstein-Salinars im Hangenden vorläufig auf 150 m festgelegt. Insbesondere durch die Teufenlage von 500 bis 1.000 m u. GOK (siehe Kapitel 4.2.1) soll ausgeschlossen werden, dass eine negative Beeinflussung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs durch Prozesse, die an oder nahe der Erdoberfläche ablaufen, stattfinden kann. Gleichzeitig dient die Maßnahme dazu, ein unbeabsichtigtes menschliches Eindringen in den einschlusswirksamen Gebirgsbereich zu erschweren. (→ Z9, Z13)

- M14: Das Endlagerbergwerk wird in einem tektonisch ruhigen Gebiet errichtet, bei dem eine Salzabwanderung praktisch ausgeschlossen ist. Im Nachweiszeitraum kann daher keine relevante Ausdünnung der barrierewirksamen Salzsichten (z2NA) erfolgen, die in Verbindung mit Subrosionsvorgängen oder einer glazial verstärkten Erosion zu einer relevanten Verringerung der Barrierenmächtigkeit und möglicherweise in Folge zu einer Beeinträchtigung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs von außen führen könnte. (→ Z9)
- M15: Die Temperaturen im Einlagerungshorizont z2NA, in dem die wärmeentwickelnden hochradioaktiven Abfälle eingelagert werden, werden durch entsprechende Beladung der Abfallbehälter und angepasste Einlagerungsgeometrien auf 200 °C begrenzt. Die Festlegung dieser Temperaturgrenze dient allein der Auslegung des Endlagers. Sie soll zum einen sicherstellen, dass die maximal auftretenden Temperaturen innerhalb der Abfallbehälter niedrig genug liegen, um negative Veränderungen der Abfälle (verringerte Stabilität der Brennstäbe bzw. Umwandlung des Glaskörpers bei den CSD-V) zu vermeiden. Zum anderen ist bei den vorgesehenen Sicherheitsabständen der Einlagerungsfelder von mindestens 50 m zu den das Staßfurt-Steinsalz z2NA begrenzenden Salzsichten, zu denen auch Carnallit gehört, aufgrund der Begrenzung der Temperaturentwicklung in den Einlagerungsfeldern davon auszugehen, dass Carnallit thermisch nicht zersetzt und kein Kristallwasser freigesetzt werden kann. Bei unter Gebirgsdruck in einer Tiefe von 870 m eingespannten Carnallit-Vorkommen liegt der Schmelzpunkt von Carnallit bei 167,5 °C /Popp 1993/. Weiterhin ist mit der Begrenzung der Maximaltemperatur im Steinsalz auf 200 °C die thermische Stabilität des Polyhalits sicher gewährleistet. (→ Z10, Z11)
- M16: Durch entsprechende Auslegung des Nahbereiches der eingelagerten Abfälle, z. B. durch die Begrenzung der Restfeuchte des Versatzes und ggf. durch die Verwendung entsprechender Behältermaterialien, werden die Gasentwicklung und die Gasdruckaufbaurrate in den Grubenbauen des Endlagerbergwerks soweit reduziert, dass im einschlusswirksamen Gebirgsbereich kein Frac bis zu dessen Außenrand entsteht und somit zu einem Integritätsverlust der geologischen Barriere führt. (→ Z12)

Zur Erreichung der Zielsetzung Z13 (unbeabsichtigtes menschliches Eindringen) sind weltweit bisher nur vereinzelte Untersuchungen durchgeführt worden. Dies betrifft sowohl die Möglichkeiten, die Wahrscheinlichkeit eines menschlichen Eindringens in den ewG zu reduzieren oder Auswirkungen eines solchen Eindringens zu minimieren, als auch denkbare administrative Vorkehrungen, die wie der in /BMU 2010a/ geforderte Wissenserhalt bewirken können, dass zumindest für eine gewisse Zeit keine den dauerhaften Einschluss der Abfälle gefährdenden menschlichen Aktivitäten im Bereich des Endlagers durchgeführt werden. Daher werden für das Sicherheitskonzept in KOSINA keine konkreten Maßnahmen zur Erreichung der Zielsetzung Z13 beschrieben.

In Deutschland wurden erstmalig im Rahmen der vorläufigen Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben /GRS 2012b/ Fragestellungen im Zusammenhang mit dem menschlichen Eindringen in den ewG systematisch untersucht und bewertet. Hierbei wurde berücksichtigt,

dass die vorrangigen Optimierungsziele Strahlenschutz in der Betriebsphase, Langzeitsicherheit, Betriebssicherheit des Endlagers, Zuverlässigkeit und Qualität des langfristigen Einschlusses der Abfälle, Sicherheitsmanagement sowie technische und finanzielle Realisierbarkeit durch Maßnahmen im Zusammenhang mit dem menschlichen Eindringen nicht konterkariert werden dürfen.

Folgende Maßnahmen dienen dazu, zur Erfüllung der Zielsetzung Z14 (Kritikalitätsausschluss) beizutragen.

M17 Durch eine geeignete Beladung und Auslegung der Einlagerungsbehälter, andere technische Maßnahmen, wie die Beigabe von Neutronenfängern, sowie die Einlagerungsplanung wird ausgeschlossen, dass sich spaltbares Material im Endlager in einer kritischen Anordnung ansammelt. Dazu sind entsprechende Analysen auf der Basis von plausiblen möglichen Entwicklungen des Endlagersystems mit realistischen Werten für die einzulagernden Nuklidinventare unter Berücksichtigung ihrer Ungewissheiten durchzuführen.

Zur Erreichung der Zielsetzung Z14 tragen indirekt auch die Maßnahmen M3 (Einlagerung in Salzbereichen, die frei von Lösungseinschlüssen mit nennenswertem Volumen sind), M4 (Ausreichende Sicherheitsabstände zu den Tagesschächten, zu Gesteinsschichten mit möglichen größeren Lösungsvorkommen sowie zu potentiellen Fließwegen für Lösungen) und M16 (Begrenzung der Restfeuchte des Versatzes) bei. Die unter M17 genannten Analysen sind in der Vergangenheit für verschiedene Endlagerbehälter bereits durchgeführt worden, so dass im Rahmen des Vorhabens KOSINA keine gesonderten Nachweise für den Kritikalitätsausschluss geführt werden sollen.

5.4 Entwicklung eines auf dem Sicherheitskonzept basierenden Nachweiskonzeptes

Das Nachweiskonzept beschreibt detailliert die Vorgehensweise, wie die Sicherheit des Endlagersystems im Rahmen des Vorhabens KOSINA bewertet wird. Im Nachweiskonzept werden auf Basis des Sicherheitskonzeptes die für eine Sicherheitsaussage erforderlichen Nachweise formuliert, so dass die Anforderungen gemäß /BMU 2010a/ erfüllt werden. Dabei ist es für das Vorhaben KOSINA nicht das Ziel, alle in /BMU 2010a/ geforderten Sicherheitsnachweise zu erbringen, sondern ggf. zu überprüfen, inwieweit sie im Rahmen des vorliegenden Kenntnisstandes erbracht werden können. Dies betrifft beispielsweise den geforderten umfassenden Sicherheitsnachweis für alle Zustände des Endlagerbetriebes (Abschnitt 7.1) sowie das nach Abschnitt 7.4 geforderte Kontroll- und Beweissicherungsprogramm.

Ausgangspunkt für die Entwicklung des Nachweiskonzeptes ist der sichere Einschluss der Radionuklide und sonstigen Inhaltsstoffe der radioaktiven Abfälle in der Nachverschlussphase in einem ewG, der einen definierten Bereich um die Grubenbaue des Endlagerbergwerks im Salzgestein, mindestens um die Grubenbaue der Einlagerungsbereiche, darstellt. Als sicherer Einschluss wird der Zustand des Endlagersystems bezeichnet, bei dem es im Nachweiszeitraum allenfalls zu einer geringfügigen Freisetzung von Radionukliden aus dem

ewG kommt. Dieser Ansatz basiert auf der Anforderung gemäß Abschnitt 4.2 der Sicherheitsanforderungen /BMU 2010a/, dass die Freisetzungen radioaktiver Stoffe aus dem Endlager langfristig die aus der natürlichen Strahlenexposition resultierenden Risiken nur sehr wenig erhöhen dürfen. Gleichzeitig muss für den ewG gemäß Abschnitt 7.2.1 der Sicherheitsanforderungen gezeigt werden, dass dessen Integrität für alle wahrscheinlichen Entwicklungsmöglichkeiten nachgewiesen werden kann.

Aus dem Nachweiskonzept leiten sich alle weiteren Arbeiten im Rahmen der Sicherheitsanalysen im Vorhaben KOSINA ab, die in der Synthese schließlich zu einer sicherheitlichen Gesamtbewertung des generischen Systems führen.

Das Nachweiskonzept wird die folgenden Aspekte umfassen:

- Vorgehensweise zur Ausweisung der Lage und Grenze des ewG
- Erhalt des ewG im Nachweiszeitraum
- Mächtigkeit der Salzbarriere im ewG
- Integrität der geologischen Barriere
- Integrität der geotechnischen Verschlussbauwerke
- Kritikalitätsausschluss
- Einschluss der Radionuklide im ewG
- Radiologische Konsequenzen in der Biosphäre anhand der Kriterien der Sicherheitsanforderungen bei Freisetzung von Radionukliden aus dem ewG

In dem noch zu konkretisierenden Nachweiskonzept wird auf jeden dieser Aspekte ausführlich eingegangen. Gemäß den Sicherheitsanforderungen /BMU 2010a/ sind diese Aspekte für sämtliche Entwicklungsmöglichkeiten des Endlagersystems zu bewerten, deren Eintreten als wahrscheinlich oder weniger wahrscheinlich eingestuft wird. Im Vorhaben KOSINA wird dabei keine formelle Szenarienanalyse durchgeführt. Die Bewertung erfolgt mit Hilfe einer Auswahl möglichst abdeckender Rechenfälle (expert judgement) für die Entwicklungen des Endlagersystems. Bei Entwicklungsmöglichkeiten, bei denen es zu einer Freisetzung von Radionukliden aus den Abfällen kommen kann, wird im Rahmen von KOSINA ausschließlich der Lösungspfad berücksichtigt.

Im Hinblick auf den dauerhaften Schutz von Mensch und Umwelt vor sonstigen schädlichen Wirkungen der radioaktiven Abfälle wird Abschnitt 3 der Sicherheitsanforderungen /BMU 2010a/ für die durchzuführenden Arbeiten im Vorhaben KOSINA dahingehend interpretiert, dass die Voraussetzungen zum Nachweis eines solchen Schutzes gegeben sind, wenn der

dauerhafte Schutz von Mensch und Umwelt vor der ionisierenden Strahlung nachgewiesen werden kann (radiologische Konsequenzenanalyse).

6 Zusammenfassung

Das Vorhaben hat zum Ziel, erstmalig ein technisches (standortunabhängiges) Konzept für ein Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle und ausgediente Brennelemente auf der Grundlage generischer geologischer Modelle für flach lagernde Steinsalzformationen zu entwickeln. Dies soll auch die Entwicklung und Überprüfung eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein solches Endlager einschließen. Damit soll eine technisch-wissenschaftliche Grundlage geschaffen werden für eine sicherheitstechnische Bewertung von Endlagersystemen in unterschiedlichen geologischen Formationen, die es letztlich ermöglicht, „den Standort für eine Anlage zur Endlagerung (...) zu finden, der die bestmögliche Sicherheit für einen Zeitraum von einer Million Jahre gewährleistet“ /StandAG 2013/.

In dem vorliegenden Zwischenbericht wurde der Stand der Arbeiten des zum 01.07.2015 gestarteten Forschungsvorhabens KOSINA bis Jahresende 2015 zusammengefasst.

In einem ersten Schritt wurden die Grundlagen (Kapitel 3) für die Planungen und Untersuchungen zusammengestellt und abgestimmt. Dazu gehörte eine detaillierte Beschreibung der Art und Menge der radioaktiven Abfälle und ausgedienten Brennelemente. Diese Informationen sind für die Auslegung eines Endlagers und dessen Betrieb maßgeblich. Während das aktuelle Mengengerüst der radioaktiven Abfälle aus der Wiederaufarbeitung dem NaPro entnommen werden konnte, wurde entschieden, Daten für die ausgedienten Brennelemente im Rahmen des KOSINA-Vorhabens aus den Berichten zur VSG zu verwenden. Der Vorteil besteht darin, dass in der VSG das Mengengerüst auf die einzelnen Leistungsreakortypen aufgeteilt wurde und damit eine konkrete Zuordnung zu Behälterarten sowie eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse des Vorhabens KOSINA mit den VSG-Daten erreicht wird.

Außerdem gehörte zu der Grundlagenermittlung eine Beschreibung des Kenntnisstandes zur Verbreitung salinar geprägter Schichtenfolgen in Deutschland sowie die Ableitung der Randbedingungen für die Erstellung der generischen geologischen Modelle. Der Kenntnisstand zur räumlichen Verbreitung und lithologischen Zusammensetzung sowie zu den geologischen Lagerungsverhältnissen der flach lagernden Steinsalzfolgen in Deutschland wurde zuletzt von der BGR zusammengefasst /BGR 2014/.

Ein weiterer wesentlicher Aspekt der Grundlagenermittlung war die Zusammenstellung der Sicherheits- und Nachweiskonzepte für bereits vorliegende Endlagerkonzepte. Es wurde festgestellt, dass für Salzformationen in steiler Lagerung und für Tongestein Sicherheitskonzepte vorliegen. Sicherheitskonzepte für andere Wirtsgesteinstypen wurden in Deutschland bisher nicht erarbeitet.

Im Zuge der Grundlagenermittlung wurden anschließend die Anforderungen für die Endlagerkonzeptentwicklung zusammengestellt. Diese Anforderungen betreffen die Planungen für das Grubengebäude, die Transport- und Einlagerungstechnik, die Wettertechnik, das Verfüll- und Verschlusskonzept und grundsätzlich die Bergtechnik. Die Anforderungen wurden im Wesentlichen aus vier unterschiedlichen Quellen abgeleitet; dem deutschen Atomrecht, dem deutschen Bergrecht, den Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickeln-

der radioaktiver Abfälle /BMU 2010a/ sowie dem im Vorhaben KOSINA entworfenen vorläufigen Sicherheitskonzept.

Auf diesen Grundlagen erfolgte im Vorhaben KOSINA bisher die Erarbeitung des generischen, geologischen Modells für den Typ „flache Lagerung“. Unter Berücksichtigung vorhabensspezifischer Randbedingungen wurde ein schematisches Referenzprofil erarbeitet. Basierend auf der beschriebenen generischen geologischen Schichtenfolge in diesem Profil und den strukturgeologischen Kenntnissen wurden Referenzschnitte erarbeitet. Diese stellen die Abfolge, Mächtigkeit und Lagerungsverhältnisse der Schichten dar und dienen als eine Grundlage für die räumliche Planung des Endlagers. Anschließend wird unter Berücksichtigung der Geometrie und der Position des Endlagers ein geologisches 3D-Modell (Typ „flache Lagerung“) für einen generischen Standort entwickelt. Das generische geologische 3D-Modell stellt die Basis für die Entwicklung des Endlagerkonzeptes sowie des Sicherheits- und Nachweiskonzeptes dar.

Zusammenfassend wurden folgende vorhabensspezifische Parameter als Randbedingungen für die Erstellung der generischen geologischen 3D-Modelle zugrunde gelegt:

- Tiefenlage Endlagerbergwerk zwischen 500 m und 1.000 m u. GOK
- Mächtigkeit Einlagerungshorizont > 100 m.

Der Zwischenbericht schließt mit der Beschreibung der Grundzüge eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für flach lagernde Steinsalzformationen. Im Sicherheitskonzept müssen für die zur Durchführung des Vorhabens KOSINA relevanten Aspekte der Sicherheitsanforderungen /BMU 2010a/ Konkretisierungen vorgenommen werden. Das Sicherheitskonzept für ein Endlager in einer flach lagernden Steinsalz-Formation basiert, ausgehend von den allgemeinen Vorgaben zum Sicherheitskonzept in den Sicherheitsanforderungen /BMU 2010a/, auf drei Leitgedanken zum Einschluss der radioaktiven Abfälle. Daraus wiederum wurden drei Grundanforderungen definiert, aus denen die konkreten Zielsetzungen abgeleitet und strategische, planerische Maßnahmen festgelegt wurden.

Aus dem Sicherheitskonzept leiten sich alle weiteren Arbeiten im Rahmen der Sicherheitsanalysen im Vorhaben KOSINA ab, die in der Synthese schließlich zu einer sicherheitlichen Gesamtbewertung des generischen Systems führen.

7 **Ausblick**

In den ersten sechs Monaten des Vorhabens, die dem Berichtszeitraum des Zwischenberichtes entsprechen, wurden im Wesentlichen die Grundlagen für die Planungen und Untersuchungen im FuE-Vorhaben KOSINA zusammengestellt und erste Arbeiten zur Erstellung des generischen geologischen Modelles für den Typ „flache Lagerung“ durchgeführt sowie Grundzüge eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes skizziert. In den folgenden Monaten werden planmäßig die Arbeiten an den generischen geologischen Modelle weitergeführt, Endlagerkonzepte für vier Einlagerungsvarianten entworfen (je zwei Varianten für die beiden geologischen Typen „flache Lagerung“ und „Salzkissen“) entsprechende Sicherheitsuntersuchungen (u.a. Analyse der geomechanischen Barrierenintegrität) durchgeführt sowie die radiologischen Konsequenzen untersucht. Details dazu sind in dem als Anhang ausgewiesenen Arbeitsprogramm mit seinen acht Arbeitspakten beschrieben. Alle Planungs- und Untersuchungsergebnisse werden in einem Synthesebericht dokumentiert und Anfang zweites Quartal 2018 veröffentlicht.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3-1	POLLUX®-Behälter mit gezogenen Brennstäben aus 10 DWR-BE	11
Abbildung 3-2	CASTOR® THTR/AVR mit zwei Stahlkannen für AVR-BE und mit einer Stahlkanne für THTR-BE (links) und CASTOR® KNK mit Phenix-Büchsen (rechts)	13
Abbildung 3-3	CASTOR® MTR 2	14
Abbildung 3-4	Gussbehälter Typ II	15
Abbildung 3-5	Brennstabkockille für die vertikale Bohrlochlagerung (BSK-V)	17
Abbildung 3-6	Transport und Lagerbehälter CASTOR® V/19	19
Abbildung 3-7	Transport und Lagerbehälter CASTOR® V/52	20
Abbildung 3-8	Transport und Lagerbehälter CASTOR® 440/84	21
Abbildung 3-9	Transport und Lagerbehälter CASTOR® HAW 20/28	23
Abbildung 3-10	Transport und Lagerbehälter TS 28 V	23
Abbildung 3-11	Transport und Lagerbehälter TN 85	24
Abbildung 3-12	Transport und Lagerbehälter CASTOR® HAW 28 M	26
Abbildung 3-13	Stratigraphische Position und Bezeichnung der salinaren Schichtenfolgen mit Steinsalzlagern in Deutschland (/Menning 2002/ verändert, aus: /BGR 2014/)	33
Abbildung 3-14	Schematische on-shore-Verbreitung der Halit-führenden Zechstein-Salinare in Deutschland (nach: /Kulick 1984/, /Freudenberger 1996/, /BGR 2004/ , Verbreitung der Zechsteinstrukturen nach /BGR 2014/)	35
Abbildung 3-15	Elemente des Nachweiskonzeptes für eine Salzformation in steiler Lagerung.	41
Abbildung 3-16	Schematische Darstellung der vorläufigen, den Endlagerplanungen zugrunde legenden Sicherheitsabstände	49
Abbildung 4-1	Schematische Darstellung der Lagerungsformen im Modell A (Typ „flache Lagerung“) und Modell B (Typ „Salzkissen“).	52
Abbildung 4-2	Schematisches geologisches Referenzprofil für den Modelltyp „flache Lagerung“	56
Abbildung 4-3	Generalisiertes Normalprofil der Staßfurt- und Leine-Formationen für das generische 3D-Modell für die flach lagernden Steinsalzfolgen	57
Abbildung 4-4	Generischer geologischer Schnitt AA´ für den Modelltyp „flache Lagerung“	59
Abbildung 4-5	Generische geologische Schnitte durch das Modellgebiet	60
Abbildung 5-1	Zeitliche Wirkung der verschiedenen Barrieren im Endlagersystem in der Nachverschlussphase /GRS 2012b/.	70

Abbildung 7-1 Vorhabensablaufschemata

105

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1	Mengengerüst der ausgedienten Brennelemente aus Leistungsreaktoren	6
Tabelle 3-2	Mengengerüst der ausgedienten Brennelemente aus Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken und Forschungsreaktoren	7
Tabelle 3-3	Mengengerüst der Wiederaufarbeitungsabfälle ausgedienter Brennelemente aus den Leistungsreaktoren	8
Tabelle 3-4	Bestandteile eines beispielhaften DWR-Brennelementes mit zugehörigen Werkstoffen und Massen	9
Tabelle 3-5	Bestandteile der Strukturteile eines beispielhaften DWR-Brennelementes mit zugehörigen Werkstoffen und Massen	10
Tabelle 3-6	Abmessungen und Masse der Endlagerbehälter für die Streckenlagerung	15
Tabelle 3-7	Abmessungen und Masse der BSK-V (Brennstäbe) für die Bohrlochlagerung	17
Tabelle 3-8	Abmessungen und Masse der Endlagerbehälter für die direkte Endlagerung von Transport- und Lagerbehältern	27
Tabelle 3-9	Anzahl der Endlagerbehälter für die Streckenlagerung	28
Tabelle 3-10	Anzahl der Endlagerbehälter für die horizontale Bohrlochlagerung	29
Tabelle 3-11	Anzahl der Endlagerbehälter für die vertikale Bohrlochlagerung	30
Tabelle 3-12	Anzahl der Endlagerbehälter bei der direkten Endlagerung von Transport- und Lagerbehältern	31
Tabelle 3-13	Gesamtmasse und -volumen der Endlagerbehälter für die Streckenlagerung	31
Tabelle 3-14	Gesamtmasse und -volumen der Endlagerbehälter für die horizontale bzw- vertikale Bohrlochlagerung	31
Tabelle 3-15	Gesamtmasse und -volumen der Endlagerbehälter für die direkte Einlagerung von Transport- und Lagerbehältern	32
Tabelle 3-16	Übersicht der relevanten Bergverordnungen für die prinzipiell in Betracht kommenden Bundesländer	45
Tabelle 3-17	Graphische Darstellung der §§3 und 4 der KlimaBergV	46
Tabelle 4-1	Tiefenlage und Mächtigkeit des Einlagerungshorizontes im Schnitt AA´	58

Literaturverzeichnis

- ABBergGV 2012 Allgemeine Bundesbergverordnung vom 23. Oktober 1995 (BGBl. I S. 1466), zuletzt geändert durch Artikel 22 des Gesetzes vom 31. Juli 2009 (BGBl. I S. 2585).
- ABVO 1996 Allgemeine Bergverordnung über Untertagebetriebe, Tagebaue und Salinen ABVO vom 2. Februar 1966 (Nds. MBl. Nr. 15/1966 S. 337)
- AtG 2015 Gesetz über die friedliche Verwendung der Kernenergie und den Schutz gegen Gefahren (Atomgesetz – AtG) vom 23. Dezember 1959 (BGBl. I S. 814), in der Fassung der Bekanntmachung vom 15. Juli 1985 (BGBl. I S. 1565), zuletzt geändert durch Artikel 1 des Gesetzes vom 20. November 2015 (BGBl. I S. 2053)
- AkEnd 2002 AkEnd - Arbeitskreis Endlagerstandorte (2002): Auswahlverfahren für Endlagerstandorte - Empfehlungen des AkEnd-Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte. – Abschlußbericht: 272 S.; Hannover.
- Althen 1980 Althen, G.W., Rusbült, J. & Seeger, J. (1980): Ergebnisse einer regionalen Neubearbeitung des Muschelkalkes der DDR. – Zeitschrift für Geologische Wissenschaften, 8(8): 985-999, 7 Abb., 1 Tab.; Berlin.
- Barnasch 2009 Barnasch, J. (2009): Der Keuper im Westteil des Zentraleuropäischen Beckens (Deutschland, Niederlande, England, Dänemark) - Diskontinuierliche Sedimentation, Litho-, Zylo- und Sequenzstratigraphie. – Diss.: 225 S.; Martin-Luther-Universität, Institut für Geowissenschaften, Halle.
- BayBergV 2006 Bayerische Bergverordnung (BayBergV) vom 6. März 2006
BBergG 2013 Bundesberggesetz vom 13. August 1980 (BGBl. I S. 1310), zuletzt geändert durch Artikel 4 Absatz 71 des Gesetzes vom 7. August 2013 (BGBl. I S. 3154).
- Benox 1997 Benox, D., Ludwig, A.O., Schulze, W., Schwab, G., Hartmann, H., Knebel, G. & Januszewski, I. (1997): Struktur und Entwicklung mesozoischer Störungszonen in der Südwest-Altmark. – Hallesches Jahrbuch für Geowissenschaften, B 19: 83-114; Halle (Saale).
- Beutler 1999 Beutler, G., Hauschke, N. & Nitsch, E. (1999): Faziesentwicklung des Keupers im Germanischen Becken. – In: Hauschke, N. & Wilde, V. (Hrsg.): Trias - Eine ganz andere Welt: 129-174; München (Pfeil).
- Beutler 2005 Beutler, G. & Tessin, R. (2005): Der Keuper im Norddeutschen Becken. – In: Deutsche stratigraphische Kommission (Hrsg.): Stratigraphie von Deutschland IV. Keuper: 1-296, 64 Abb., 50 Tab., 2 Taf.; Frankfurt a. M. (Courier Forschungsinstitut Senckenberg).

- BGR 1982 Best, G., Leydecker, G., Bornemann, O. & Kockel, F. (1982): Bewertung von Salzformationen außerhalb Niedersachsens für die Errichtung von Endlagern, 28.04.1982. – Bericht: 91 S.; Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.
- BGR 1999 Kockel, F., Brückner-Röhling, S., Röhling, H.-G. & Frisch, U. (1999): Geotektonischer Atlas von Nordwestdeutschland 1 : 300 000 - Teil 18: Die paläogeographische und strukturelle Entwicklung Nordwestdeutschlands - Bd. 3: Der Zechstein, die Trias. – Bericht: 133 S.; Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.
- BGR 2002 Jung, R., Röhling, S., Ochmann, N., Rogge, S., Schellschmidt, R., Schulz, R., Thielemann, T. (2002): Abschätzung des technischen Potentials der geothermischen Stromerzeugung und der geothermischen Kraftwärmekopplung (KWK) in Deutschland. – Bericht: 88 S.; Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover
- BGR 2003 Frisch, U. & Kockel, F. (2003): Der Bremen-"Knoten" im Strukturnetz Nordwest-Deutschlands - Stratigraphie, Paläogeographie, Strukturgeologie. – Bericht: 379 S.; Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.
- BGR 2004 Krull, P., Hoth, P., Bräuer, V. & Wirth, H. (2004): Endlagerung radioaktiver Abfälle in Deutschland Untersuchungswürdige Regionen mit potentiellen Wirtsgesteinsformationen. – Bericht: 91 S.; Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Berlin.
- BGR 2008 Reinhold, K., Krull, P. & Kockel, F. (2008): Salzstrukturen Norddeutschlands (1 : 500.000)..; Berlin / Hannover (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe).
- BGR 2011a Bebiolka, A., Göthel, M. & Höding, T. (2011): Endbericht zum Projekt Speicher-Kataster Deutschland für die Bundesländer Brandenburg, Berlin und Teilgebiete in Sachsen. – Abschlussbericht; Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Berlin / Hannover.
- BGR 2011b Brandes, J. & Obst, K. (2011): Speicher- und Barrierekomplexe in Mecklenburg-Vorpommern. – Abschlussbericht; Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Berlin / Hannover.
- BGR 2011c Brandes, J. (2011): Mesozoische Speicher- und Barrierekomplexe der Altmark-Fläming-Scholle (Sachsen-Anhalt) - Abschlussbericht zum Projekt „Speicher-Kataster Deutschland“. – Abschlussbericht; Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Berlin / Hannover.
- BGR 2011d Grimm, M.C., Wielandt-Schuster, U., Hottenrott, M., Grimm, K.I. & Radtke, G. (2011): 5. Regionalgeologische Darstellungen. – In: Deutsche Stratigraphische Kommission (Hrsg.): Stratigraphie von Deutschland IX. Tertiär, Teil 1: 57-132; Hannover (Schriftenreihe der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften). ISBN 9783510492237.

- BGR 2014 Reinhold, K., Hammer, J. & Pusch, M. (2014): Verbreitung, Zusammensetzung und geologische Lagerungsverhältnisse flach lagernder Steinsalzfolgen in Deutschland – Zwischenbericht: 98 S.; Berlin / Hannover (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe)
- Bock 2009 Bock, H., Werner, W. & Simon, T. (2009): Die Verbreitung der steinsalzführenden Schichten in Baden-Württemberg - eine Aktualisierung des Wissenstandes. – LGRB-Nachrichten, 08/2009: 2.
- Boigk 1981 Boigk, H. (1981): Erdöl und Erdölgas in der Bundesrepublik Deutschland - Erdölprovinzen, Felder, Förderung, Vorräte, Lagerstättentechnik. – 330 S.; Stuttgart (Enke).
- BMI 1983 Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk, Rdschr. D. BMI v. 20.4.1983 –RS – AGK 3 – 515 790/2.
- BMU 2010a Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Stoffe, 30. September 2010.
- BMU 2010b Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Keine Zustimmung zum Transport bestrahlter Forschungsreaktor-Brennelemente nach Russland, Pressemitteilung Nr. 190/10, 06.12.2010
- BMUB 2013 Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, Verzeichnis radioaktiver Abfälle, Bestand zum 31. Dezember 2013 und Prognose
- BMUB 2015a Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, Programm für eine verantwortungsvolle und sichere Entsorgung bestrahlter Brennelemente und radioaktiver Abfälle (Nationales Entsorgungsprogramm), August 2015
- BMUB 2015b Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, Bericht des BMUB zur Entsorgung bestrahlter Brennelemente aus Forschungs-, Versuchs- und Demonstrationsreaktoren, 7. September 2015
- BVOESSE 2001 Bekanntmachung der Neufassung der Bergverordnung für die Erzbergwerke, Steinsalzbergwerke und für die Steine- und Erden-Betriebe (BVOESSE) vom 1. Juni 1999 in der Fassung vom 01. Mai 2001
- BVOS 2003 Bergverordnung für Schacht- und Schrägförderanlagen (BVOS) vom 15.10.2003 (Nds. MBl. S 769)
- Cramer 1965 Cramer, P. (1965): Zur Geologie der Gegend von Bad Windsheim/Mfr. unter besonderer Berücksichtigung neuer Tiefenaufschlüsse. – Geologica Bavarica, 55: 105-118.
- DBE 2006 DBE-Reisebericht vom 12.05.2006, Besprechung am 11.05.2006 bei GNS Essen, Datenblatt mit Angaben zu Werkstoffen und Massen eines DWR-BE

- DBETEC 2008a Buhmann, D.; Mönig, J., Wolf, J., Heusermann, S., Keller, S., Weber, J.R., Bollingerfehr, W., Filbert, W., Kreienmeyer, M., Krone, J., Tholen, M. (2008): Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine sicherheitliche Bewertung von Endlagern für HAW – ISIBEL. Zusammenfassender Abschlussbericht, DBE TECHNOLOGY GmbH, BGR und GRS, Peine. BMWi-FKZ 02E10065 und 02E10055. TEC-09-2008-AB.
- DBETEC 2008b DBE TECHNOLOGY GmbH, Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine sicherheitliche Bewertung von Endlagern für HAW (ISBEL), AP 1.2 Konzeptionelle Endlagerplanung und Zusammenstellung des endzulagernden Inventars, April 2008, BMWi FKZ 02 E 10065
- DBETEC 2010 Buhmann, D.; Mönig, J., Wolf, J., Keller, S., Mrugalla, S., Weber, J.R., Krone, J., Lommerzheim, A. (2010b): Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine sicherheitliche Bewertung von Endlagern für HAW – ISIBEL. Nachweis und Bewertung des Isolationszustandes "Sicherer Einschluss". Gemeinsamer Bericht von DBE TECHNOLOGY GmbH, BGR und GRS, Peine. BMWi-FKZ 02E10065 und 02E10055.
- DBETEC 2011 DBE TECHNOLOGY GmbH, Status quo der Lagerung ausge-dienter Brennelemente aus stillgelegten/rückgebauten deutschen Forschungsreaktoren und Strategie (Lösungsansatz) zu deren künftigen Behandlung/ Lagerung (LABRADOR), Dezember 2011, FKZ 02S8679
- Doben 1996 Doben, K. & Risch, H. (1996): Nördliche Kalkalpen (Oberostalpin). – In: Freudenberger, W. & Schwerd, K. (Hrsg.): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Bayern 1 : 500 000 - 4. Aufl.: 220-231; München (Bayerisches Geologisches Landesamt).
- Doornenbal 2010 Doornenbal, J.C. & Stevenson, A.G. (Hrsg.) (2010): Petroleum Geological Atlas of the Southern Permian Basin Area (SPBA). – 342 S.; Houten (EAGE Publications b.v.).
- Exler 1987 Exler, H.J. (1987): Salz und Sole. – *Geologica Bavarica*, 91: 47-63, 3 Abb., 5 Tab. 2 Fotos.
- Feist-Burkhardt 2008 Feist-Burkhardt, S., Götz, A.E., Szulc, J., Borkhataria, R., Geluk, M., Haas, J., Hornung, J., Jordan, P., Kempf, O., Michalik, J., Nawrocki, J., Reinhardt, L., Ricken, W., Röhling, H., Rüffer, T., Török, A. & Zühlke, R. (2008): Triassic. – In: McCann, T. (Hrsg.): *The Geology of Central Europe - Vol. 2: Mesozoic and Cenozoic*: 749-821; London (The Geological Society). ISBN 9781862392649.
- Freudenberger 1996 Freudenberger, W. & Schwerd, K. (1996): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Bayern 1 : 500 000 - 4. neubearbeitete Auflage. – 329 S.; München (Bayerisches Geologisches Landesamt).

- Gaertner 1993 Gaertner, H. & Röhling, H.-G. (1993): Zur lithostratigraphischen Gliederung und Paläogeographie des Mittleren Muschelkalks im Nordwestdeutschen Becken. – In: Hagdorn, H. & Seilacher, A. (Hrsg.): Muschelkalk - Schöntaler Symposium 1991: 85-103; Stuttgart (Goldschneck-Verlag).
- Gaupp 2000 Gaupp, R., Gast, R.E. & Forster, C. (2000): Late Permian Playa Lake deposits of the Southern Permian Basin (Central Europe). – In: Gierlowski-Kordesch, E. H. & Kelts, K. R. (Hrsg.): Lake Basins Through Space and Time: 75–86; Tulsa, Oklahoma (American Association of Petroleum Geologists Studies in Geology).
- Geyer 2011 Geyer, O.F. & Gwinner, M.P. (2011): Geologie von Baden-Württemberg - 5., völlig neu bearbeitete Auflage, herausgegeben von Matthias Geyer, Edgar Nitsch und Theo Simon. – 627 S., 185 Abb., 4 Tab.; Stuttgart (Schweizerbart).
- GNS 2010a GNS Gesellschaft für Nuklear-Service mbH: Produktdatenblätter für verschiedene Transport- und Lagerbehälter für ausgediente Brennelemente und Abfälle aus der Wiederaufarbeitung ausgedienter Brennelemente, übermittelt per E-Mail im Zeitraum September bis Dezember 2010
- GNS 2010b <http://www.gns.de/language=de/2181/transport-und-lagerbehaelter-tn-85>, Transport- und Lagerbehälter TN 85, Zugriff am 5.11.2010.
- Golder 2006 Golder, Geophysik GGD, Institut für Gebirgsmechanik GmbH, K+S AG, Entwicklung zuverlässiger Datengrundlagen und Auswertemethoden für die Endlagerstandortsuche (unveröff. Bericht im Auftrag des BfS), Salzgitter.
- Gralla 1988 Gralla, P. (1988): Das Oberrotliegend in NW-Deutschland - Lithostratigraphie und Faziesanalyse. – Geologisches Jahrbuch, A 106: 3-59, 34 Abb., 3 Taf.
- Gramann 1997 Gramann, F., Heunisch, C., Klassen, H., Kockel, F., Dulce, G., Harms, F.-J., Katschorek, T., Moennig, E., Schudack, M., Schudack, U., Thies, D., Weiss, M. & Hinze, C. (1997): Das Niedersächsische Oberjura-Becken - Ergebnisse interdisziplinärer Zusammenarbeit. – Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft, 148(2): 165-236; Federal Republic of Germany. ISSN 0012-0189.
- GRS 2004 Wieczorek, K.; Schwarzianeck, P.: Untersuchungen zur hydraulisch wirksamen Auflockerungszone um Endlagerbereiche im Salinar in Abhängigkeit vom Hohlraumabstand und Spannungszustand. Abschlussbericht. GRS-198, ISBN 3-931995-65-8, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Braunschweig, 2004.

- GRS 2011a Bollingerfehr, W., Filbert, W., Lerch, C., Tholen, M., Endlagerkonzepte, Bericht zum Arbeitspaket 5, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-272, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Köln, Juli 2011.
- GRS 2011b 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. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Köln, September 2011.
- GRS 2012a Bollingerfehr, W., Filbert, W., Dörr, S., Herold, P., Lerch, C., Burgwinkel, P., Charlier, F., Thomauske, B., Bracke, G., Kilger, R., Endlagerauslegung und Optimierung, Bericht zum Arbeitspaket 6, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-281, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Köln, Juni 2012.
- GRS 2012b Mönig, J.; Buhmann, D.; Rübel, A.; Wolf, J.; Baltes, B.; Fischer-Appelt, K.: 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, Köln, 2012.
- GRS 2012c Beuth, T., Baltes, B., Bollingerfehr, W., Buhmann, D., Charlier, F., Filbert, W., Fischer-Appelt, K., Mönig, J., Rübel, A., Wolf, J., Untersuchungen zum menschlichen Eindringen in ein Endlager, Bericht zum Arbeitspaket 11, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-280, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Köln, Juni 2012
- GRS 2013 Fischer-Appelt, K., Baltes, B., Buhmann, D., Larue, J., Mönig, J.: Synthesebericht für die VSG. Bericht zum Arbeitspaket 13, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-290, ISBN: 978-3-939355-66-3, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, März 2013.
- GRS 2014 Rübel, A.; Meleshyn, A.: Methodik und Anwendungsbezug eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein HAW-Endlager im Tonstein (AnSichT). Sicherheitskonzept und Nachweisstrategie. GRS-338, Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Braunschweig, 2014.
- Grünthal 2005 Grünthal, G. & Minkley, W. (2005): Berginduzierte seismische Aktivität als Quelle seismischer Belastungen - zur Notwendigkeit der Ergänzung der Karte der Erdbebenzonen der DIN 4149:2005-04. Bautechnik 82, Heft 8, 508 – 513.

- Hammer 2009 Hammer, J., Sönke, J. & Mingerzahn, G. (2009): Grundlagen und Beispiele für Standortauswahlverfahren für HAW-Endlager in unterschiedlichen Wirtsgesteinstypen. – Entwicklung und Umsetzung von technischen Konzepten für geologische Endlager in allen Wirtsgesteinen (EUGENIA Teil I): 161 S., 62 Abb.; Hannover (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe).
- Huckriede 2011 Huckriede, H. & Zander, I. (2011): Geologische Charakterisierung der Speicher- und Barrieregesteine im tieferen Untergrund des Freistaats Thüringen (Deutschland). – In: Müller, C. & Reinhold, K. (Hrsg.): Geologische Charakterisierung tiefliegender Speicher- und Barrierehorizonte in Deutschland - Speicher-Kataster Deutschland: 188-204; Hannover (Schweizerbart).
- IAEA 2006 International Atomic Energy Agency: Geological Disposal of Radioactive Waste. Safety Requirements. IAEA Safety Standards Series No. WS-R-4, ISBN 92-0-10570-9, Wien, 2006.
- IAEA 2011 International Atomic Energy Agency: Disposal of Radioactive Waste. IAEA Safety Standards Series, ISSN 1020-525X; no. SSR-5, STI/PUB/1449, Wien, 2011.
- IfG 2010 Minkley, W., Wüste, U., Popp, T., Neumann, D., Wiedemann, M., Bobinsky, J., Tejchman). Beweissicherungsprogramm zum geomechanischen Verhalten von Salinarbarrieren nach starker dynamischer Beanspruchung und Entwicklung einer Dimensionierungsrichtlinie zum dauerhaften Einschluss, BMWi-Projekt FKZ: 02C1264, IfG-Institut für Gebirgsmechanik GmbH, Leipzig, 31.01.2010.
- Käding 2005 Käding, K.-C. (2005): Der Zechstein in der Stratigraphischen Tabelle von Deutschland 2002. – Newsletters on Stratigraphy, 41(1-3): 123-127; Berlin / Stuttgart.
- Kellerbauer 1996 Kellerbauer, S. (1996): Geologie und Geomechanik der Salzlagertstätte Berchtesgaden. – Münchner Geologische Hefte, B 2: 101, 56 Abb., 11 Tab., 2 Taf.
- Katzung 1991 Katzung, G. (1991): Zu Auftreten, Ausbildung und Genese des Salinars in der mitteleuropäischen Saxon II-Senke (Oberperm). – Zentralblatt für Geologie und Paläontologie Teil I, 1990(11): 1565-1585; Federal Republic of Germany. ISSN 03405109.
- KfK 1989a Kernforschungszentrum Karlsruhe, Systemanalyse Mischkonzept, Hauptband, Zusammengestellt von der Projektgruppe Andre Entsorgungstechniken, Karlsruhe, Dezember 1989
- KfK 1989b Systemanalyse Mischkonzept (SAM), Anhang 10: Datensammlung. Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, KWA-Nr. 2190 A1, Karlsruhe, 1989.
- KlimaBergV 1983 Klima-Bergverordnung vom 9. Juni 1983 (BGBl. I S. 685)

- Kulick 1984 Kulick, J., Leifeld, D., Meisl, S., Pöschl, W., Stellmacher, R., Strecker, G., Theuerjahr, A.-K. & Wolf, M. (1984): Petrofazielle und chemische Erkundung des Kupferschiefers der Hessischen Senke und des Harz-Westrandes. – Geologisches Jahrbuch, D 68: 3-223, 37 Abb., 15 Tab., 34 Taf.; Hannover.
- Langbein 1976 Langbein, R. & Seidel, G. (1976): Zur Ausbildung des oberen Teils des Buntsandsteins im Thüringer Becken. – Zeitschrift für Geologische Wissenschaften, 4(5): 751-769; Berlin.
- Langbein 1997 Langbein, R. & Seidel, G. (1997): Zechstein, Buntsandstein und Muschelkalk im östlichen Thüringer Becken. – Schriftenreihe der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, 3: 101-114; Hannover.
- Langbein 2003 Langbein, R. & Seidel, G. (2003): Zechstein. – In: Seidel, G. (Hrsg.): Geologie von Thüringen: 601, 138 Abb., 34 Tab., 5 Taf.; Stuttgart (Schweizerbart). ISBN 3-510-65205-3
- Leitner 2014 Leitner, C., Friedl, G., Baumann, S. & Bieniok, A. (2014): Excavation and humidity induced extension veins of mudrock clasts in a ductile rock salt matrix, filled with secondary halite deposits (Northern Calcareous Alps, Austria, Bavaria). – Z. dt. Ges. Geowiss., 165(1): 77-90.
- McCann 2008 McCann, T. (Hrsg.) (2008): The Geology of Central Europe 1. Precambrian and Palaeozoic. Geol. Soc., London, 748 S., ISBN: 978-1-86239-246-5.
- Menning 2002 Menning & Hendrich (2002): Stratigraphische Tabelle von Deutschland 2002 (Hrsg. Deutsche Stratigraphische Kommission), ISBN 3-00-010197-7
- Minkley 2015 Minkley, W., Knauth, M., Brückner, D., Lüdeling C. (2015): Integrity of saliferous barriers for heat-generating radioactive waste – natural analogues and geomechanical requirements. Mechanical Behavior of Salt VIII, Rapid City, USA, 26-28 May 2015, 159 – 170
- NEA 2004 Nuclear Energy Agency: Post-Closure Safety Case for Geological Repositories. Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD), NEA No. 3679, ISBN 92-64-02075-6, Paris, 2004.
- NEA 2009 Nuclear Energy Agency: International Experiences in Safety Cases for Geological Repositories (INTESC), NEA No. 6251, ISBN 978-92-64-99103-3, Paris, 2009.
- Paul 2006 Paul, J. (2006): Der Kupferschiefer: Lithologie, Stratigraphie, Fazies und Metallogenese eines Schwarzschiefers. – Z. dt. Ges. Geowiss., 157(1): 57-76, Stuttgart
- Plein 1995 Plein, E. (Hrsg.) (1995): Norddeutsches Rotliegend-Becken Rotliegend-Monographie, Teil II. – 1-193, 180 Abb., 110 Tab., 198 Taf. S.; Frankfurt a. M. (Courier Forsch.-Inst. Senckenberg).

- Popp 1993 Popp, T.; Kern, H.: Thermal dehydration reactions characterized by combined measurements of electrical conductivity and elastic wave velocities. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 120: 43-57, 1993.
- Radzinski 2008a Radzinski, K.-H. (2008a): Buntsandstein. – In: Bachmann, G. H., Ehling, B.-C., Eichner, R. & Schwab, M. (Hrsg.): *Geologie von Sachsen-Anhalt*: S. 180-201; Stuttgart (E. Schweizerbart'scher Verlag).
- Radzinski 2008b Radzinski, K.-H. (2008b): Muschelkalk. – In: Bachmann, G. H., Ehling, B.-C., Eichner, R. & Schwab, M. (Hrsg.): *Geologie von Sachsen-Anhalt*: S. 201-; Stuttgart (E. Schweizerbart'scher Verlag).
- REI 2008 Richtlinie zur Emissions- und Immissionsüberwachung kerntechnischer Anlagen (REI), Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, Stand 01.08.2008
- Röhling 2002 Röhling, S. (2002): *Der Mittlere Muschelkalk in Bohrungen Norddeutschlands: Fazies, Geochemie, Zyklus- und Sequenzstratigraphie.* – Dissertation: 289 S.; Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Mathematisch-Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultät, Halle a. d. Saale.
- Röhling 2013 Röhling, H.-G. (2013): *Der Buntsandstein im Norddeutschen Becken - Regionale Besonderheiten.* – In: Lepper, J. & Röhling, H.-G. (Hrsg.): *Stratigraphie von Deutschland XI - Buntsandstein*: 269-384; Stuttgart (E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung).
- Schauberger 1955 Schauburger, O. (1955): *Zur Genese des alpinen Haselgebirges.* – *Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft*, 105: 736-751.
- Schauberger 1986 Schauburger, O. (1986): *Bau und Bildung der Salzlagerstätten des ostalpinen Salinars.* – *Archiv für Lagerstättenforschung der Geologischen Bundesanstalt*, 7: 217-254.
- Schröder 1995 Schröder, L., Plein, E., Bachmann, G.H., Gast, R.E., Gebhardt, U., Graf, R., Helmuth, H.-J., Pasternak, M., Porth, H. & Süsmuth, S. (1995): *Stratigraphische Neugliederung des Rotliegend im Norddeutschen Becken.* – *Geologisches Jahrbuch, A 148*: 3-21.
- Schwandt 1991 Schwandt, A. (1991): *Zur Hydrogeologie der Zechsteinsedimente in den Kali- und Steinsalzabbaugebieten Mitteldeutschlands.* – *Zbl. Geol. Paläont. Teil 1 (H 4)*: 1263-1273; Stuttgart.
- Seidel 1964 Seidel, G. (1964): *Aufbau und Eignung der Steinsalzlagerstätten des Thüringer Beckens.* – *Zeitschrift für Angewandte Geologie*, 10(4): 182-189.
- Spoetl 1989 Spoetl, C. (1989): *The Alpine Haselgebirge Formation, Northern Calcareous Alps (Austria); Permo-Scythian evaporites in an Alpine thrust system.* – *Sedimentary Geology*, 65(1-2): 113-125. ISSN 00370738.

- StandAG 2013 Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle (Standortauswahlgesetz - StandAG). – Bundesgesetzblatt , Teil I, Nr. 41 vom 23. Juli 2013: 2553-2564.
- StrlSchV 2014 Strahlenschutzverordnung vom 20. Juli 2001 (BGBl. I S. 1714; 2002 I S. 1459), zuletzt geändert durch Artikel 5 des Gesetzes vom 11. Dezember 2014 (BGBl. I S. 2010).
- TAS 2005 Technische Anforderungen an Schacht- und Schrägförderanlagen (TAS), erlassen am 15. Dezember 1977 durch das Bayerische Oberbergamt in München, das Hessische Oberbergamt in Wiesbaden, das Landesbergamt in Baden-Württemberg in Freiburg, das Landesoberbergamt in Nordrhein-Westfalen in Dortmund, das Oberbergamt in Clausthal-zellerfeld und das Oberbergamt für das Saarland und das Land Rheinland-Pfalz in Saarbrücken, Stand Dezember 2005
- ThürBVOS 2004 Thüringer Bergverordnung für Schacht- und Schrägförderanlagen (ThürBVOS) vom 01.11.2004
- TRGS 2009 Technische Regeln für Gefahrstoffe, TRGS 554, Abgase von Dieselmotoren, Ausgabe 2008, berichtigt: GMBL Nr. 28 S. 604-605 vom 02.07.2009
- Wagner 1955 Wagner, W. (1955): Die tertiären Salzlagerstätten im Oberrheingraben. – Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft, 105: 707-728.
- WTI 2006 Wissenschaftlich Technische Ingenieurberatung, CASTOR® KNK, Zusammenfassende Darstellung der Behälterinventare, WTI/98/05, Revision 1, Januar 2006 (S. 4, 5, 7, Anhang 1-4)

Abkürzungsverzeichnis

°	Grad
°C	Grad Celsius
%	Prozent
3D	3-dimensional
ABergV	Allgemeine Bundesbergverordnung
ABVO	Allgemeine Bergverordnung über Untertagebetriebe, Tagebaue und Salinen
AtG	Gesetz über die friedliche Verwendung der Kernenergie und den Schutz gegen ihre Gefahren (Atomgesetz)
AVR	Arbeitsgemeinschaft Versuchsreaktor, Jülich
BayBergV	Bayerische Bergverordnung
BBergG	Bundesberggesetz
BER II	Berliner Forschungsreaktor
BMUB	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit
BSK	Brennstabkockille
BSK-H	Brennstabkockille für die horizontale Bohrlochlagerung
BSK-V	Brennstabkockille für die vertikale Bohrlochlagerung
BVOS	Bergverordnung für Schacht- und Schrägförderanlagen
BVOESSE	Bergverordnung für die Erzbergwerke, Steinsalzbergwerke und für die Steine- und Erden Betriebe
CSD-B	Colis standard des déchets boues
CSD-C	Colis des déchets compactés
CSD-V	Colis des déchets vitrifiés
DIN	Deutsche Industrienorm
DWR	Druckwasserreaktor
ERAM	Endlager für radioaktive Abfallstoffe in Morsleben
ewG	Einschlusswirksamer Gebirgsbereich
FRM II	Forschungsreaktor München
FRMZ	Forschungsreaktor Mainz
FuE	Forschung und Entwicklung
GOK	Geländeoberkante
IAEA	International Atomic Energy Agency (Internationale Atomenergie-Organisation)
KlimaBergV	Klima- Bergverordnung
KNK	Kompakte natriumgekühlte Kernreaktoranlage, Karlsruhe
kW	Kilowatt
NaPro	Programm für eine verantwortungsvolle und sichere Entsorgung bestrahlter Brennelemente und radioaktiver Abfälle (Nationales Entsorgungsprogramm)
NE	Nordost
NN	Normalnull
NEA	Nuclear Energy Agency
NW	Nordwest
m	Meter

mm	Millimeter
PBq	Peta Becquerel (10^{15} Becquerel)
REI	Richtlinie zur Emissions- und Immissionsüberwachung kerntechnischer Anlagen
RFR	Rosendorfer Forschungsreaktor
StandAG	Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle (Standortauswahlgesetz)
StrlSchV	Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen (Strahlenschutzverordnung)
SW	Südwest
SWR	Siedewasserreaktor
THM	Thermo-hydraulisch-mechanisch
THTR 300	Thorium-Hochtemperaturreaktor in Hamm-Uentrop
ThürBVOS	Thüringer Bergverordnung für Schacht- und Schrägförderanlagen
TLB	Transport- und Lagerbehälter
TRU	Transuranhaltige Abfälle
tSM	Tonne Schwermetall
u.	unter
VEK	Verglasungseinrichtung Karlsruhe
VSG	Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben
WAK	Wiederaufarbeitungsanlage Karlsruhe
WIPP	Waste Isolation Pilot Plant
WWER	Druckwasserreaktor russischer Bauart

Anhang

Arbeitsprogramm/Arbeitspakete

Zur Erreichung der in Kapitel 2 festgelegten Vorhabensziele sind die nachfolgend zusammenfassend beschriebenen acht Arbeitspakete vorgesehen, die allesamt Bezug zum Förderkonzept des BMWi haben.

AP1: Grundlagen ermitteln und zusammenstellen

In diesem Arbeitspaket werden alle Grundlagen für die Vorhabensbearbeitung zusammengestellt. Die Bearbeitung wird in 4 Aufgaben untergliedert:

1. Art und Menge der wärmeentwickelnden radioaktiven Abfälle und ausgedienten Brennelemente (einschließlich Berücksichtigung des Berichtes zum nationalen Entsorgungsprogramm /BMUB 2015a/) sowie entsprechender Behälter
2. Beschreibung der geologischen Situation in Deutschland auf Grundlage des BGR-Berichtes „Verbreitung, Zusammensetzung und geologische Lagerungsverhältnisse flach lagernder Steinsalzfolgen in Deutschland“ /BGR 2014/ und Ableitung der Rahmenbedingungen von generischen geologischen Modellen; Hinzuziehung von Arbeiten des IfG im Bereich der Bewertung von Untertagedeponien und insbesondere derjenigen Arbeiten, die in das FuE-Vorhaben "Schachtverschlüsse für Endlager für hochradioaktive Abfälle, ELSA" (FKZ 02 E 10931) eingebracht wurden.
3. Überprüfung des Sicherheits- und Nachweiskonzeptes, das im Rahmen von ISIBEL entwickelt und bei der VSG erfolgreich angewandt wurde, auf seine Anwendbarkeit für ein Endlager in flach lagernden Steinsalzformationen; ggf. Anpassungsmaßnahmen herleiten und beschreiben
4. Anforderungen zur Endlagerkonzeptentwicklung zusammenstellen („update“ der Anforderungen gemäß VSG-Endlagerkonzeption), s. a. Sicherheitsanforderungen /BMU 2010a/)

AP2: Erstellung von generischen geologischen Modellen, Ableitung von Modellparametern

In diesem Arbeitspaket werden die für die weitere Planung benötigten generischen geologischen Modelle und die Modellparameter hergeleitet und zusammengestellt.

1. Herleitung von generischen geologischen Modellen für zwei Typen der „flachen Lagerung“ (Typ „flache Lagerung“ und Typ „Salzkissen“) auf der Basis der BGR-Studie „Verbreitung, Zusammensetzung und geologische Lagerungsverhältnisse flach lagernder Steinsalzfolgen in Deutschland“ /BGR 2014/
2. Ableitung von Mindestanforderungen zur geologischen Barrierenmächtigkeit auf Basis vorliegender Erfahrungen sowie vorläufiger Modellrechnungen (siehe AP4)

3. Zusammenstellung und Begründung der geologischen Randbedingungen und geomechanischen Modellparameter für die numerischen Modellrechnungen

AP3: Entwicklung eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes

In diesem Arbeitspaket werden die Grundzüge eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein Endlager in flach lagernden Salzschichten erarbeitet.

4. Entwicklung eines Sicherheitskonzeptes für ein Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle und ausgediente Brennelemente in flach lagernden Salzformationen
5. Entwicklung eines auf dem Sicherheitskonzept basierenden Nachweiskonzeptes
6. Umgang mit Ungewissheiten

AP4: Analyse der geomechanischen Integrität

In diesem Arbeitspaket werden die geomechanischen Modellrechnungen für eine Integritätsanalyse der geotechnischen und geologischen Barrieren durchgeführt.

1. Durchführung von (zunächst vorläufigen) Modellrechnungen zur Ableitung der erforderlichen Barrierenmächtigkeiten als Basis zur Herleitung eines oder mehrerer generischer Standortmodelle
2. Kalibrierung der Berechnungsmodelle zur Integritätsanalyse an Versagensfällen geologischer Barrieren durch fluiddruck-getriebene Perkolationsentlang diskreter Fließwege im Salzgestein
3. Durchführung von THM-gekoppelten Modellrechnungen zur Überprüfung der Integrität der geologischen und geotechnischen Barrieren für zwei generische Standortmodell-Typen der flachen Lagerung (Typ „flachen Lagerung“ und Typ „Salzkissen“)

AP5: Entwicklung von Endlagerkonzepten

In diesem Arbeitspaket werden die Konzepte für die Endlagerbergwerke entwickelt. Insgesamt werden die folgenden vier Einlagerungsvarianten betrachtet:

- Streckenlagerung von POLLUX®-Behältern
- Bohrlochlagerung (horizontal) von Kokillen (BSK-H)
- Bohrlochlagerung (vertikal) von Kokillen (BSK-V)
- Direkte Endlagerung von Transport- und Lagerbehältern.

Auf Basis generischer geologischer Modelle und Modellparameter werden für die zu betrachtende Art und Menge von wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen und ausgedienten Brennelementen thermische Berechnungen zur Vorauslegung des Grubengebäudes durchgeführt. Die Planung der Grubengebäude erfolgt unter der Randbedingung Rückholung in der Betriebsphase /BMU 2010a/. Dabei werden Erkenntnisse auch aus laufenden FuE-Vorhaben zur Rückholung genutzt (FuE-Vorhaben "Auswirkungen der Sicherheitsanforde-

rung Rückholbarkeit auf existierende Einlagerungskonzepte und Anforderungen an neue Konzepte, ASTERIX" (FKZ 02E11112) und "Entwicklung technischer Konzepte zur Rückholung von Endlagerbehältern mit wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen und ausgedienten Brennelementen aus Endlagern in Salz- und Tongesteinsformationen, ERNESTA" (FKZ 02E11294)). Die Endlagerkonzeption beinhaltet im Wesentlichen drei Planungsbereiche, die für die o. g. vier Einlagerungsvarianten zu untersuchen sind. Zur Vereinfachung werden die beiden ersten Einlagerungsvarianten (Streckenlagerung und Bohrlochlagerung horizontal) für den Modelltyp „flache Lagerung“ und die beiden Einlagerungsvarianten (Bohrlochlagerung vertikal und direkte Endlagerung von Transport- und Lagerbehältern) für den Modelltyp „Salzkissen“ betrachtet.

1. Grubengebäudekonzeption und -auslegung (Planungen und Temperaturberechnungen)

Zunächst werden alle Auslegungsanforderungen zusammengestellt und mit denen verglichen, die der VSG zugrunde gelegt wurden. Auf Grundlage von thermischen Berechnungen werden anschließend für die vier Einlagerungsvarianten für die zu betrachtenden Endlagerbehälter die Mindestabstände von Behältern, Strecken und Feldern ermittelt. Mit diesen Ergebnissen wird die geometrische Auslegung des Grubengebäudes unter Berücksichtigung aller notwendigen betrieblichen Belange (Bewetterung, Herstellung Grubenräume, Herstellung horizontaler Einlagerungsbohrungen, Transport, Strahlenschutz, etc.) geplant.

2. Transport- und Einlagerungstechnik und -systeme

Entsprechend der jeweiligen Einlagerungsvariante werden die bekannten Transport- und Einlagerungssysteme zusammengestellt und notwendige Modifikationen untersucht. Dabei werden sowohl alle übertägigen als auch untertägigen Prozesse und Abläufe betrachtet und die notwendigen technischen Einrichtungen und Maschinen beschrieben. Ein Schwerpunkt wird die konzeptionelle Neuentwicklung einer Einlagerungstechnik für die Variante der Einlagerung in horizontale Bohrlöcher sein.

3. Verfüll- und Verschlusskonzepte

In dieser Aufgabe werden aufbauend auf den Erkenntnissen aus der VSG, in der sowohl eine Vorbemessung als auch eine Auslegung von Strecken- und Schachtverschlüssen durchgeführt wurden, die erforderlichen Verfüll- und Verschlussmaßnahmen geplant. Ergebnisse aus laufenden FuE-Vorhaben zum Versatzmaterial werden bei der Konzeption des Verfüllkonzeptes berücksichtigt. Die Konzeption umfasst die Ermittlung der Auslegungsanforderungen an die geotechnischen Barrieren, überschlägige Dimensionierungen, technische Verfahren und Materialien zur Herstellung von geotechnischen Barrieren sowie überschlägige Modellrechnungen zum Nachweis der Standsicherheit.

AP6: Analyse der radiologischen Konsequenzen

In diesem Arbeitspaket werden die möglichen radiologischen Konsequenzen für das Endlager untersucht.

1. Ableitung von Rechenfällen zur radiologischen Konsequenzenanalyse, Überprüfung der Anwendbarkeit vorhandener radiologischer Indikatoren (RGI, etc.)
2. Überprüfung der Anwendbarkeit des vorhandenen Instrumentariums zur radiologischen Konsequenzenanalyse anhand der ermittelten Testfälle und Indikatoren

AP7: Bewertung der Betriebssicherheit

In diesem Arbeitspaket werden die Betriebsabläufe im Endlager untersucht und sicherheitstechnisch bewertet.

1. Die Bewertung der Betriebssicherheit beinhaltet eine Beschreibung der Betriebsabläufe (Transporte, Einlagerung, Verfüll- und Verschlussmaßnahmen, etc.) für die vorgenannten vier Einlagerungsvarianten. Dazu werden auch die bisher im Rahmen der Vorhaben ISIBEL und VSG durchgeführten Betriebssicherheitsuntersuchungen überprüft und eine Abweichungsanalyse und ggf. weitere Betrachtungen angestellt.
2. Im zweiten Schritt werden Schwachstellen, mögliche Betriebsstörungen und potentielle Störfälle identifiziert und analysiert.
3. Abschließend wird bewertet, wie Schwachstellen, Betriebsstörungen und potentielle Störfälle beherrscht oder eliminiert werden können.

AP8: Synthesebericht

In diesem Arbeitspaket werden die Ergebnisse und Erkenntnisse der Untersuchungen des gesamten Vorhabens zusammengestellt und bewertet.

1. Zusammenfassende Bewertung der Vorhabensergebnisse und Überprüfung des erarbeiteten und angewandten Nachweiskonzeptes sowie Identifikation von Verbesserungs- und Optimierungsbedarf
2. Dokumentation der Planungs- und Untersuchungsergebnisse in technischen Fachberichten und einem zusammenfassenden Synthesebericht, der veröffentlicht wird.

Ablauf des Vorhabens:

Die Arbeitspakete hängen inhaltlich stark voneinander ab und müssen z. T. iterativ bearbeitet werden. Das gilt insbesondere für AP 3, AP 5 und AP 6. Die nachfolgende Grafik veranschaulicht diese Zusammenhänge.

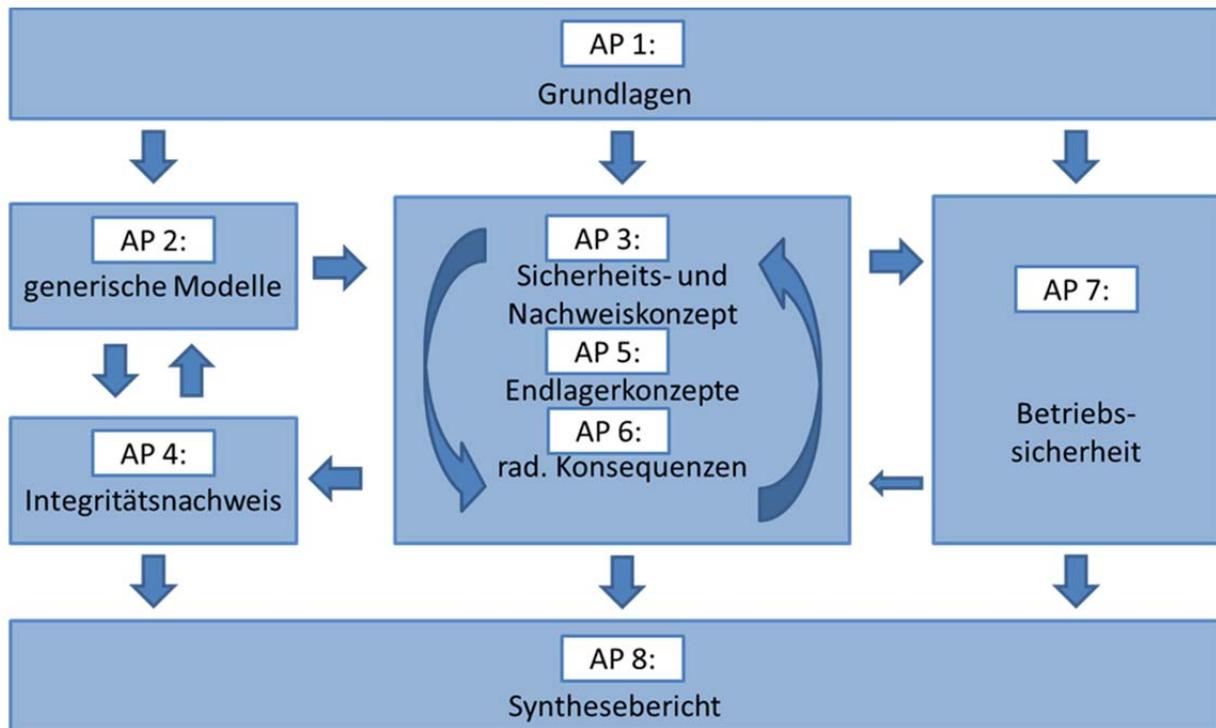


Abbildung A-1 Vorhabensablaufschema