

FuE-Verbundvorhaben KoBrA

**Anforderungen und Konzepte für Behälter zur Endlagerung von
Wärme entwickelnden radioaktiven Abfällen und ausgedienten
Brennelementen in Steinsalz, Tonstein und Kristallingestein**

Bericht zum Arbeitspaket 4:

**Erarbeitung von Vorschlägen für mögliche
Behälterkonzepte in den drei potenziellen Wirtsgesteinen
Steinsalz, Tonstein und Kristallingestein**

BAM 3.4/3205-3

BGE TEC

**Christian Herold
Teresa Orellana Pérez
Holger Völzke
Dietmar Wolff**

**Wilhelm Bollingerfehr
Sabine Prignitz
Ansgar Wunderlich**

Auftraggeber: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi)

Förderkennzeichen: 02E11537

Berlin, 30.09.2020

FuE-Verbundvorhaben KoBrA

Bericht zum Arbeitspaket 4:

Erarbeitung von Vorschlägen für mögliche Behälterkonzepte in den drei potenziellen Wirtsgesteinen Steinsalz, Tonstein und Kristallingestein

BAM 3.4/3205-3

Die diesem Bericht zugrunde liegenden Vorhaben wurden mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie, vertreten durch den Projektträger Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), unter den Förderkennzeichen 02E11527 und 02E11537 gefördert und von der BGE TECHNOLOGY GmbH in Zusammenarbeit mit der Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung (BAM) ausgeführt. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

BETREUT VOM



PTKA
Projektträger Karlsruhe
Karlsruher Institut für Technologie

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	IV
Tabellenverzeichnis.....	V
Abkürzungsverzeichnis.....	VI
1 Einleitung.....	1
1.1 Aufbau und Inhalt des Arbeitspaketes.....	2
1.2 Behälterkonzepte	3
1.3 Methodik	4
2 Entwicklungslinien bestehender Behälterkonzepte	6
2.1 Behälterkonzepte in kristallinen Wirtsgesteinen	7
2.2 Behälterkonzepte im Wirtsgestein Tonstein	9
2.3 Behälterkonzepte im Wirtsgestein Steinsalz.....	10
2.4 Transport- und Lagerbehälter (TLB).....	11
2.5 Weitere Behälterkonzepte	12
3 Vergleichbarkeit der Behälterkonzepte.....	13
3.1 Vergleichende Darstellung der Einwirkungen auf die Behälter	13
3.1.1 Mechanische Einwirkungen	13
3.1.2 Thermische Einwirkungen.....	16
3.1.3 Radiologische Einwirkungen.....	20
3.1.4 Chemisch-Biologische Einwirkungen	21
3.2 Vergleichende Darstellung der Anforderungen an die Behälterkonzepte.....	23
3.2.1 Anforderungen an Unterkritikalität.....	24
3.2.2 Anforderungen an den sicheren Einschluss.....	26
3.2.3 Thermische Anforderungen	28
3.2.4 Radiologische Anforderungen.....	28
3.2.5 Anforderungen an Transportfähigkeit.....	33
3.2.6 Anforderungen an Handhabbarkeit.....	35
3.2.7 Anforderungen an Rückholbarkeit.....	36
3.2.8 Weitere Anforderungen an die Behälterkonzepte.....	37
3.3 Vergleichende Darstellung der Randbedingungen und Auslegungsgrößen der Behälterkonzepte	38
3.3.1 Maße, Masse und Materialien.....	38
3.3.2 Inventare	39
3.3.3 Mechanische Auslegung.....	41
4 Anwendbarkeit und Übertragbarkeit der Behälterkonzepte	43
4.1 Wirtsgesteinsübergreifende Betrachtungen.....	44
4.1.1 Unterkritikalität.....	44
4.1.2 Thermische Anforderungen	45
4.1.3 Handhabbarkeit	46
4.1.4 Rückholbarkeit.....	47
4.1.5 Bergbarkeit	48

4.2	Anwendbarkeit der Behälterkonzepte in kristallinen Wirtsgesteinen	50
4.2.1	Spiegelung der Behälterkonzepte an Anforderungen und Einwirkungen in kristallinen Wirtsgesteinen	50
4.2.2	Schlussfolgerungen	53
4.3	Anwendbarkeit der Behälterkonzepte im Wirtsgestein Tonstein	56
4.3.1	Spiegelung der Behälterkonzepte an Anforderungen und Einwirkungen im Wirtsgestein Tonstein	56
4.3.2	Schlussfolgerungen	58
4.4	Anwendbarkeit der Behälterkonzepte im Wirtsgestein Steinsalz	59
4.4.1	Spiegelung der Behälterkonzepte an Anforderungen und Einwirkungen im Wirtsgestein Steinsalz	60
4.4.2	Schlussfolgerungen	62
4.5	Übertragbarkeit von Transport- und Lagerbehältern.....	62
4.5.1	Darstellung der Behälterfunktionen.....	63
4.5.2	Übersicht relevanter Behältereigenschaften	64
4.5.3	Spiegelung der TLB-Konzepte an Anforderungen und Einwirkungen in den Wirtsgesteinen.....	65
4.5.4	Schlussfolgerungen	66
4.6	Offene Fragen und weiterer Forschungsbedarf	67
4.6.1	Forschungsbedarf: Einwirkungen.....	67
4.6.2	Forschungsbedarf: endlagerrelevante Behälterfunktionen	67
4.6.3	Bergbarkeit	68
5	Herleitung generischer Behälterkonzepte	69
5.1	Methodik zur Erstellung von generischen Behälterkonzepten	69
5.2	Behälterfunktionen zur Erfüllung der Anforderungen	71
5.3	Erstellung einer Lösungsmatrix	72
5.3.1	Sicherer Einschluss	72
5.3.2	Abschirmung.....	73
5.3.3	Kritikalitätsausschluss.....	73
5.3.4	Temperaturbegrenzung	74
5.3.5	Begrenzung der Korrosion und Gasproduktion	74
5.3.6	Handhabbarkeit	74
5.4	Exemplarische Lösungsmatrix	75
5.4.1	Vor- und Nachteile ausgewählter Lösungsprinzipien.....	77
5.4.2	Anwendung auf vorhandene Behälterkonzepte.....	78
5.5	Erstellung generischer Behälterkonzepte	81
5.5.1	Wirtsgesteinübergreifende Überlegungen für generische Behälterkonzepte ..	82
5.5.2	Generische Endlagerbehälterkonzepte für kristalline Wirtsgesteine	83
5.5.3	Generische Endlagerbehälterkonzepte für das Wirtsgestein Tonstein	87
5.5.4	Generische Endlagerbehälterkonzepte für das Wirtsgestein Salz	90
5.6	Optimierung der Behälterkonzepte	93
5.6.1	Inventar und Entwurfsraum.....	94
5.6.2	Materialwahl	96

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Kapitelstruktur des Berichtes zum AP4	2
Abbildung 2: Graphische Darstellung der Methodik zum Vergleich von Behälterkonzepten...	5
Abbildung 3: Im schwedischen KBS-Programm untersuchte Behälterkonzepte.....	7
Abbildung 4: Behälterkonzepte in kristallinen Wirtsgesteinen	8
Abbildung 5: Der seit 2015 betrachtete kanadische UFC-II-Behälter	8
Abbildung 6: Assemblierung eines belgischen Supercontainers	9
Abbildung 7: Französisches Behälterkonzept für die Endlagerung von Kokillen	9
Abbildung 8: Das Schweizer Referenzkonzept der Nagra	10
Abbildung 9: Die Behälterkonzepte für das Wirtsgestein Salz: POLLUX® und BSK-3	10
Abbildung 10: Auswahl verschiedener TLB-Typen	11
Abbildung 11: Generisches britisches Behälterkonzept	12
Abbildung 12: Gesteinstemperatur in einer Tiefe von 1.000 m.....	19
Abbildung 13: Berechnete Temperaturentwicklung an einem finnischen KBS-3-Behälter	19
Abbildung 14: Kritikalitätsverhalten von Kernbrennstoffen im Behälter über 100.000 Jahre..	25
Abbildung 15: Probegravur auf der Gleitkufe eines französischen Kategorie-C-Behälters	48
Abbildung 16: Abkantung auf der Innenseite des Kupferdeckels eines KBS-3-Behälters.....	49
Abbildung 17: Erstellung generischer Behälterkonzepte (aus dem top-down-Ansatz).....	69
Abbildung 18: Erstellung von generischen Behälterkonzepten mit einer Lösungsmatrix.	71
Abbildung 19: Mögliche alternative Behältergeometrien	78
Abbildung 20: Mögliche Gestaltung der Behälterwand.....	78
Abbildung 21: Schematische Darstellung der Behälterkonzepte für Kristallingestein	79
Abbildung 22: Schematische Darstellung der Behälterkonzepte für Tonstein	80
Abbildung 23: Schematische Darstellung der Behälterkonzepte für Steinsalz	80
Abbildung 24: Schematische Darstellung von TLB-Konzepten	81
Abbildung 25: Skizze generischer Behälterkonzepte für kristalline Wirtsgesteine ohne ewG	84
Abbildung 26: Skizze generischer Behälterkonzepte für kristalline Wirtsgesteine mit ewG. ..	85
Abbildung 27: Skizze generischer Behälterkonzepte für Endlagerkonzepte in Tonstein.	88
Abbildung 28: Skizze generischer Behälterkonzepte für Endlagerkonzepte im Steinsalz.....	91
Abbildung 29: Darstellung möglicher Beladungen mit Brennelementen oder Brennstäben..	94
Abbildung 30: Wärmeleitfähigkeit verschiedener Materialien und Materialklassen.....	96
Abbildung 31: Mechanische Eigenschaften verschiedener Materialien.....	97
Abbildung 32: Thermische Ausdehnung verschiedener Materialien und Materialgruppen	98
Abbildung 33: Mechanische Festigkeit in Abhängigkeit von der Temperatur	99
Abbildung 34: Der Lösungsmatrix-Ansatz als Erweiterung des top-down-Ansatzes.....	107

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Im Arbeitspaket 1 identifizierte fortgeschrittene Behälterkonzepte	6
Tabelle 2: Lithostatischer Druck als Einwirkung in den verschiedenen Endlagerkonzepten ..	14
Tabelle 3: Hydrostatischer Druck als Einwirkung in verschiedenen Endlagerkonzepten.	14
Tabelle 4: Der Schwelldruck von Bentonit-buffern und Tonen um Endlagerbehälter.....	15
Tabelle 5: Thermische Einwirkungen in verschiedenen Behälter- bzw. Endlagerkonzepten.	18
Tabelle 6: Radiologische Einwirkungen auf die Endlagerbehälter und deren Umgebung.....	21
Tabelle 7: Hydrochemisches Milieu in verschiedenen Wirtsgesteinen	22
Tabelle 8: Vergleich der Anforderung nach Unterkritikalität in den Endlagerprogrammen.....	26
Tabelle 9: Vergleich der Anforderungen nach sicherem Einschluss.....	30
Tabelle 10: Temperaturgrenzwerte für die Abfallmatrix im Behälter	31
Tabelle 11: Grenzwerte für die Temperatur an der Gebindeoberfläche	32
Tabelle 12: Grenzwerte für die ODL an der Gebindeoberfläche (Schutz der Barrieren).....	33
Tabelle 13: Temperatur- und Dosisleistungsgrenzwerte (Schutz des Personals).....	36
Tabelle 14: Massen, Maße und Materialien verschiedener betrachteter Behälterkonzepte...	39
Tabelle 15: Übertragbarkeit in kristallinem Wirtsgestein mit ewG.	54
Tabelle 16: Übertragbarkeit in kristallinen Wirtsgesteinen ohne ewG.	54
Tabelle 17: Übertragbarkeit in (tiefen) Tonformationen.....	59
Tabelle 18: Übertragbarkeit im Wirtsgestein Salz.	62
Tabelle 19: Eigenschaften einiger TLB der CASTOR®-Familie	64
Tabelle 20: Übertragbarkeit betrachteter TLB-Konzepte für die Wirtsgesteine.....	66
Tabelle 21: Ansatz für die Herleitung einer Lösungsmatrix	70
Tabelle 22: Exemplarische Lösungsmatrix	76
Tabelle 23: Vor- und Nachteile ausgewählter Lösungsprinzipien.....	77
Tabelle 24: Zusammenfassung der betrachteten statischen mechanischen Lasten.....	102
Tabelle 25: Zusammenstellung wesentlicher Anforderungen aus Abschnitt 3.2.....	103
Tabelle 26: Behälterfunktionen (mit Verweisen auf Abschnitte im Bericht).....	109
Tabelle 27: Zusammenstellung der im Abschnitt 5.5 erstellten Behälterskizzen	111

Abkürzungsverzeichnis

Begriff/ Abkürzung	Langform	Bedeutung/Bereich
AGR	Advanced Gas-cooled Reactor	brit. CO ₂ -gekühltes Reaktorkonzept
Andra	Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs	französische Endlagerbetreibergesellschaft
AWA	Abfälle aus der Wiederaufarbeitung	im AP1 eingeführter Begriff zur Bezeichnung <i>aller</i> endzulagernden Abfälle aus der Wiederaufarbeitung (neben den Wärme entwickelnden high-level waste (HLW)-Gläsern auch verglaste Prozesslösungen und kompaktierte Metallteile)
BE	Brennelement(e)	
BSB	Brennstabbündel	gebündelte Brennstäbe für CANDU-Reaktoren
BSK	Brennstabkokille	deutsches Behälterkonzept einer Kokille für die Endlagerung gezogener Brennstäbe
CANDU	Canadian Deuterium Uranium (Reactor)	kanadischer schwerwassermoderierter Reaktor
CASTOR®	cask for storage and transport of radioactive material	Typenbezeichnung mehrerer deutscher TLB
CSD-V	colis standard de déchets vitrifiés	französische Standardkokille für verglaste Spaltproduktlösungen (V), verglaste Prozesslösungen (B) und kompaktierte Metallteile (C)
CSD-B	colis standard de déchets boues	
CSD-C	colis standard de déchets compactés	
KBS	Kärnbränslesäkerhet	schwedisches Endlagerkonzept (1977 KBS, 1978 KBS-2, seit 1983 KBS-3)
Nagra	Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle	Schweizer Endlagergesellschaft
ODL	Ortsdosisleistung	Maß für die je Zeiteinheit deponierte (Energie- oder Äquivalent-)Dosis
RWM	Radioactive Waste Management Ltd.	britische Endlagerbetreibergesellschaft
SKB	Svensk Kärnbränslehantering AB	schwedische Endlagerbetreibergesellschaft
TLB	Transport- und Lagerbehälter	Transportbehälter für radioaktive Abfälle mit einer begrenzten Genehmigung für deren Lagerung
UFC	used fuel canister	kanadischer Endlagerbehälter (seit 2015 UFC-II)
UOS	ukládací obalový soubor	tschechische Bezeichnung für den Endlagerbehälter
VSG	Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben	
WWER	Водо-водяной энергетический реактор	sowjetisch-russisches DWR-Konzept

1 Einleitung

Das Ziel des Vorhabens „KoBrA“ [1] besteht in der Herleitung und Zusammenstellung von Randbedingungen, Beanspruchungsgrößen und Anforderungen an Behälter für die Endlagerung ausgedienter Brennelemente und von hochradioaktiven Abfällen aus der Wiederaufarbeitung. Im Standortauswahlverfahren für ein Endlager in tiefen geologischen Formationen in Deutschland werden dafür drei potenzielle Wirtsgesteine betrachtet: Steinsalz, Tonstein und kristalline Gesteinsformationen. Dementsprechend werden im Vorhaben „KoBrA“ Randbedingungen und Anforderungen für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in diesen drei Wirtsgesteinstypen zusammengestellt und verschiedene Behälterkonzepte im Hinblick auf ihre potenzielle Eignung für ein deutsches Endlager untersucht.

Das Gesamtvorhaben ist in vier Arbeitspakete unterteilt, für die jeweils definierte Teilziele formuliert sind: Im **ersten Arbeitspaket** [2] wurde im Rahmen einer umfassenden Literaturrecherche der nationale und internationale Stand von Wissenschaft und Technik hinsichtlich Behälterkonzepten und Behälteranforderungen erfasst. Dabei wurde eine umfangreiche Dokumentensammlung zusammengestellt und sortiert, die als Quellenbasis für alle weiteren Arbeiten zur Verfügung steht. Die Auswertung der gesammelten Informationen ergab einen Überblick über internationale Behälterentwicklungen sowie eine detaillierte Übersicht über die Behälterkonzepte und die ihnen zugrundeliegenden Anforderungskataloge aus 11 fortgeschrittenen Endlagerprogrammen.

Im **zweiten Arbeitspaket** [3] wurden, aufbauend auf bisherigen Untersuchungen und Forschungsarbeiten, die geologischen und betrieblichen Randbedingungen und Beanspruchungsgrößen für Endlagerbehälter ermittelt und zusammengestellt. Grundlage hierfür waren bereits erarbeitete Endlagerkonzepte und Ergebnisse von Versuchen und Erkundungen in den drei potenziellen Wirtsgesteinen. Neben den Randbedingungen aus Geologie und Endlagerbetrieb wurde auch auf die Anforderungen aus möglichen Störfallszenarien sowie aus der für Einlagerung und mögliche Rückholung zu verwendenden Technik eingegangen.

Das **dritte Arbeitspaket** [4] baut auf den Ergebnissen der internationalen Recherche (AP1) sowie der Zusammenstellung der Randbedingungen und Beanspruchungsgrößen für die Endlagerbehälter (AP2) auf. Die Anforderungen an die Behälter – regulatorische, betriebliche sowie solche aus der Standortgeologie und den Einwirkungen und Prozessen, denen die Behälter ausgesetzt sind – wurden hergeleitet und systematisch dargestellt. Die für das Endlagersystem zu betrachtenden Zeitphasen wurden aus den Anforderungen hergeleitet und charakterisiert. Die Einwirkungen auf die Behälter in den drei potenziellen Wirtsgesteinen sowie die sich für die Erfüllung der Sicherheitsfunktionen des Behälters als Teil des Endlagersystems ergebenden Behälterfunktionen wurden ebenfalls wirtsgesteins- und zeitphasenabhängig betrachtet. Schließlich wurden aus den Einwirkungen auf die Behälter und den Anforderungen an die Behälterfunktionen auch quantifizierbare Behälterfunktionen für alle drei potenziellen Wirtsgesteine abgeleitet.

Das hier vorliegende vierte Arbeitspaket dient zwei Zielen: Zum einen sollen die im ersten Arbeitspaket ermittelten vorhandenen bzw. entwickelten Behälterkonzepte dahingehend untersucht werden, ob die jeweiligen Behälterfunktionen unter den im zweiten und dritten Arbeitspaket ermittelten Randbedingungen und Einwirkungen den im dritten Arbeitspaket ermittelten Anforderungen an endlagerfähige Behälter in einem deutschen Endlager genügen. Zum anderen sollen, basierend auf den im zweiten Arbeitspaket ermittelten Randbedingungen und den im dritten Arbeitspaket hergeleiteten und zusammengestellten Anforderungen an die Endlagerbehälter, Vorschläge für mögliche generische Endlagerbehälter in den drei

potenziellen Wirtsgesteinen Steinsalz, Tonstein und Kristallingestein erarbeitet werden. Die im ersten Arbeitspaket recherchierten Behälterkonzepte, deren Entwicklungslinien und zugrundeliegende Behälteranforderungen bilden hier den Ausgangspunkt für weitergehende Überlegungen hinsichtlich ihrer potenziellen Eignung für ein zukünftiges deutsches Endlager und zur Skizzierung generischer Konzepte für zukünftige Endlagerbehälter.

1.1 Aufbau und Inhalt des Arbeitspaketes

Im Arbeitspaket 4 werden die in den vorangegangenen Arbeitspaketen des Vorhabens gewonnenen Erkenntnisse zu Behälterkonzepten, Einwirkungen, Randbedingungen und Behälteranforderungen sowie -funktionen dazu genutzt, eine umfassende Gegenüberstellung der im Vorhaben betrachteten Behälterkonzepte mit den an sie gestellten Anforderungen durchzuführen.

Hierzu wird zunächst eine entsprechende Methodik für den Vergleich von verschiedenen Behälterkonzepten entwickelt (Abschnitt 1.3). Außerdem werden, aufbauend auf den Ergebnissen des ersten Arbeitspaketes, die Entwicklungslinien der Behälterkonzepte nochmals dargestellt und unter dem Gesichtspunkt der an sie gestellten Anforderungen, der in der Entwicklung betrachteten Einwirkungen und Randbedingungen und der daraus entwickelten Lösungen betrachtet (Kapitel 2). Die entwickelte Methodik wird in Kapitel 3 angewendet, um die Vergleichbarkeit der ausgewählten Behälterkonzepte zu untersuchen; hierbei werden die Einwirkungen (Abschnitt 3.1), die Anforderungen (Abschnitt 3.2) sowie Randbedingungen und Auslegungsgrößen (Abschnitt 3.3) jeweils einzeln gegenübergestellt. Mit den hierbei gewonnenen Erkenntnissen zur Vergleichbarkeit und möglichen Abweichungen zwischen den den Behälterkonzepten zugrundeliegenden Anforderungen und Größen werden im Kapitel 4 die Behälterkonzepte selbst auf die Übertragbarkeit und Umsetzbarkeit für ein Endlager in den drei potenziellen Wirtsgesteinen in Deutschland, Steinsalz, Tonstein und Kristallingestein hin untersucht. Kapitel 5 stellt das zweite Ziel des Arbeitspaketes dar: Aufbauend auf den Ergebnissen zu Randbedingungen, Einwirkungen und Anforderungen aus den Arbeitspaketen 2 und 3 des Vorhabens werden hier Vorschläge für generische Behälter für die drei Wirtsgesteine hergeleitet. Die hierzu verwendete Methodik wird parallel zur Methodik für den Vergleich der Behälterkonzepte ebenfalls in Abschnitt 1.3 entwickelt.

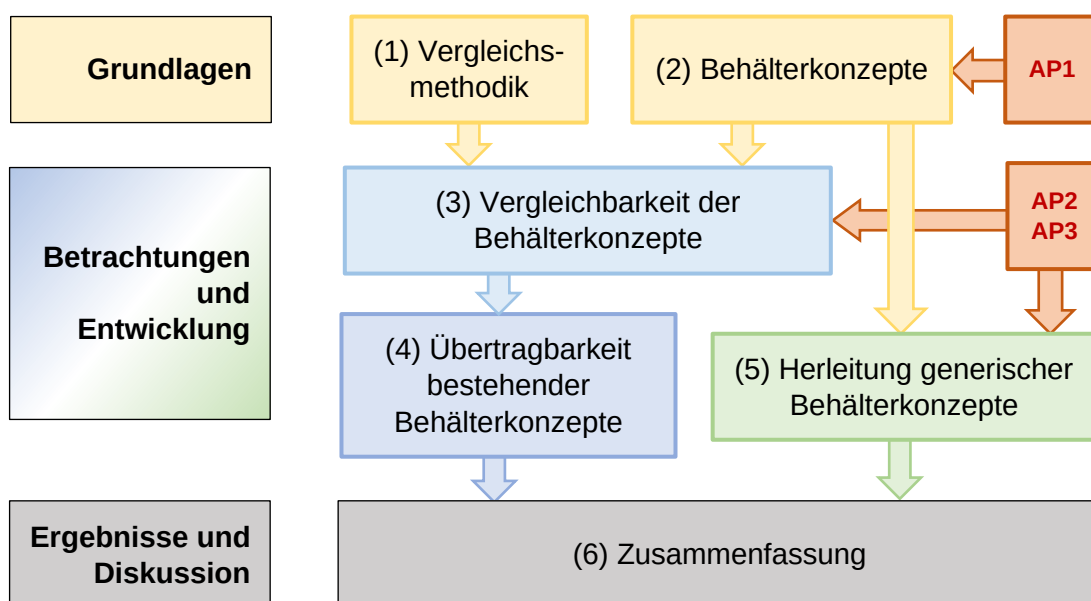


Abbildung 1: Kapitelstruktur des Berichtes zum AP4

1.2 Behälterkonzepte

Sowohl für die Betrachtung als auch für die Entwicklung von Behälterkonzepten ist es unerlässlich, diese in den Gesamtzusammenhang eines Endlagerprogrammes zu stellen. Im Kapitel 2 des Berichtes zum Arbeitspaket 3 des Vorhabens „KoBrA“ [4] wurde der Zusammenhang zwischen Anforderungen, Einwirkungen, Behälterfunktionen und der fortschreitenden Spezifizierung des Endlagerprogrammes von generischen Vorstudien über wirtsgesteinspezifische bis hin zu standortspezifischen Konzepten aufgezeigt. Der Endlagerbehälter ist sowohl als technische Barriere im Multibarrierensystem als auch als Komponente im Endlagersystem immer zusammen mit dem gesamten Endlagerkonzept zu betrachten. Die qualitativen wie quantitativen Einwirkungen auf den Behälter und die zur Erfüllung der gegebenen Anforderungen ausgelegten Behälterfunktionen sind sowohl von der geologischen und geotechnischen Behälterumgebung abhängig als auch von sich aus dem Betrieb (aus Transport, Handhabung und Einlagerung) ergebenden Randbedingungen, Belastungen oder Auflagen. Grundsätzlich kann man die zur Betrachtung eines Behälterkonzeptes notwendigen Größen und Zusammenhänge folgendermaßen gruppieren:

- **Randbedingungen** sind systemisch vorgegebene oder externe Faktoren und Gegebenheiten – also beispielsweise aus der Standortgeologie oder verwendeten Technologien –, die zu einer bestimmten Begrenzung der (physikalisch-technisch) möglichen Bandbreite an Einwirkungen oder Aktionen führen. Wesentliche Beispiele für solche Randbedingungen sind etwa die Wasserdurchlässigkeit und Temperatur des umliegenden Wirtsgesteines, die mögliche Korrosionsprozesse am Behälter ermöglichen oder begrenzen bzw. die thermische Auslegung des Behälters (als mathematisch-physikalische Randbedingung in der Wärmetransportberechnung) mitprägen. Auch verwendete Technologien zur Streckenauffahrung, zum Transport der Behälter oder zur Einlagerung bzw. zu einer möglichen späteren Rückholung und Bergung der Gebinde stellen Randbedingungen dar, da sie die Dimensionen eines Endlagergebindes technisch begrenzen. Wesentliche Randbedingungen an die Endlagergebinde sind im Bericht zum Arbeitspaket 2 dieses Vorhabens zusammengestellt worden [3].
- **Einwirkungen** sind Prozesse, Ereignisse oder Beanspruchungsgrößen, die einen Einfluss auf die Behälterfunktionen haben. Wesentliche Einwirkungen auf die Behälter sind bereits im Kapitel 5 des Berichtes zum Arbeitspaket 3 [4] umfassend dargestellt. Hierbei sind die Einwirkungen abhängig von Wirtsgesteinen, Endlagerkonzepten und Zeitphasen zusammengestellt und, wo möglich, quantifiziert worden. Beispiele für Einwirkungen auf die Behälter sind korrosive Prozesse an der Behälteroberfläche oder die durch dadurch freiwerdenden Wasserstoff mögliche Versprödung metallischer Komponenten. Der auf den Behälterkörper wirkende Druck – z. B. lithostatischer und ggfs. hydrostatischer Druck von außen sowie Gasdruck von innen – ist ebenfalls eine wesentliche Einwirkung.
- **Anforderungen** sind quantifizierbare Bedingungen, die von den Endlagergebinden erfüllt werden müssen. Sicherheitsanforderungen im Speziellen sind nach § 2 Nr. 15 StandAG „nach § 26 Absatz 3 durch Rechtsverordnung zu erlassenden Bestimmungen, die festlegen, welches Sicherheitsniveau ein Endlager für hochradioaktive Abfälle in tiefen geologischen Formationen zur Erfüllung der atomrechtlichen Anforderungen einzuhalten hat“ [5]. Im Rahmen der Erstellung und Auslegung von Behälterkonzepten müssen diese entsprechend auf eine Erfüllung der Anforderungen hin ausgelegt werden. Die Erfüllung der jeweiligen Behälterfunktionen gewährleistet dann, dass ein Behälterkonzept die daran gestellten Anforderungen erfüllt. In Sicherheitsnachweisen wird die Erfüllung der Anforderungen dann getestet

und überprüft. Die für Endlagergebinde relevanten Anforderungen wurden im dritten Arbeitspaket hergeleitet und zusammengestellt [4].

- **Auslegungsgrößen** sind Größen und Parameter, die das Behälterkonzept und die in seiner Auslegung an die Endlagerbehälter gestellten Erwartungen quantitativ beschreiben. Da die Endlagergebinde auf eine Erfüllung der an sie gestellten Anforderungen unter Berücksichtigung der zu erwartenden Einwirkungen ausgelegt werden, dienen die Auslegungsgrößen einer entsprechend abdeckenden Auslegung der Behälterfunktionen. In der Erstellung eines Behälterkonzeptes entsprechen die Auslegungsgrößen dem „Haben“ im Gegensatz zum durch die Anforderungen gegebenen „Soll“. Beispiele für Auslegungsgrößen sind sowohl konzeptseitig angenommene maximale Belastungen, denen die Gebinde anforderungsgerecht widerstehen müssen, als auch z. B. die Wandstärke oder die Tiefe von Schweißnähten

1.3 Methodik

Als Teilergebnis des dritten Arbeitspaketes wurde im dazugehörigen Bericht in Kapitel 2 [4] herausgestellt, dass für die Erstellung eines anforderungsgerechten Behälterkonzeptes die Auslegung der jeweiligen Behälterfunktionen anhand der zu erwartenden Einwirkungen und der an die Behälterfunktionen gestellten Anforderungen geschehen muss. Basierend auf dieser Erkenntnis wurden im vorangegangenen Abschnitt die entsprechenden Begriffe definiert. Die Einwirkungen und dementsprechend die den Einwirkungen zur Erfüllung der vorgegebenen Anforderungen entgegengestellten Behälterfunktionen werden mit dem weiteren Fortschritt des Standauswahlverfahrens und mit wachsendem Kenntnisstand und Detailgrad der Erkenntnisse zur Standortgeologie von generischen über wirtsgesteinspezifischen zu standortspezifischen Größen weiterentwickelt (siehe Abbildung 2-1 im Bericht zum Arbeitspaket 3 [4]). Für eine Betrachtung eines Behälterkonzeptes müssen somit auch immer die an das Behälterkonzept gestellten Anforderungen und die in der Erstellung des Konzeptes unterstellten Einwirkungen mitbetrachtet werden (Abbildung 2).

In diesem Arbeitspaket werden für die Untersuchung verschiedener nationaler und internationaler Behälterkonzepte auf eine Übertragbarkeit auf die drei potenziellen Wirtsgesteinstypen in Deutschland (Kapitel 4) untersucht. Daher müssen auch die für die Entwicklung der jeweiligen Behälterkonzepte berücksichtigten Einwirkungen und Anforderungen in die Betrachtung einbezogen (Kapitel 3) werden. Selbst bei den im Arbeitspaket 1 identifizierten vergleichbaren oder gar identischen Anforderungen an Endlagergebinde können die Behälterkonzepte nur verglichen werden, wenn auch die der Behälterentwicklung zugrundegelegten Einwirkungen auf die Behälterfunktionen vergleichbar oder zumindest abgedeckt sind. Von den in Wirtsgesteinen in Deutschland zu erwartenden Einwirkungen stark abweichende Einwirkungen in einem für andere Geologien oder Endlagerkonzepte entwickelten Behälterkonzept können auch bei vergleichbaren Anforderungen zu einer Nichterfüllung in einem deutschen Endlagerkonzept führen.

Für die Untersuchung der Behälterkonzepte auf eine Übertragbarkeit werden zuerst die zugrunde gelegten Einwirkungen verglichen. Werden die in deutschen Wirtsgesteinsinformationen zu erwartenden Einwirkungen auf die Endlagergebinde durch die in anderen Konzepten berücksichtigten Einwirkungen mindestens abgedeckt, so sind sie vergleichbar. Werden sie nicht abgedeckt, so muss für eine Übertragung der Behälterkonzepte eine qualitative und/oder quantitative Abschätzung erfolgen, welchen Einfluss eine teilweise oder Nichtberücksichtigung der jeweiligen Einwirkungen auf die Erfüllung der Behälterfunktionen hat.

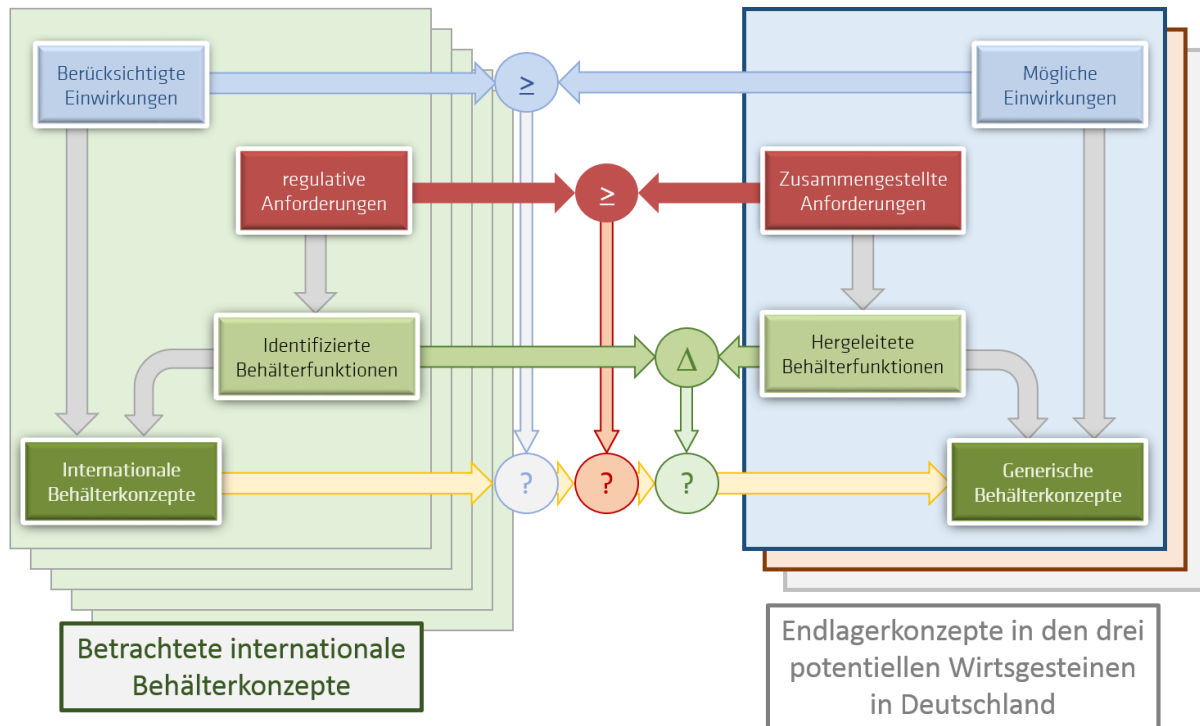


Abbildung 2: Graphische Darstellung der Methodik zum Vergleich von Behälterkonzepten und zur Untersuchung auf eine Übertragbarkeit

Als nächster Schritt werden die an die Behälterkonzepte gestellten Anforderungen gespiegelt. Sind die an ein betrachtetes Behälterkonzept gestellten Anforderungen niedriger als die nach Arbeitspaket 3 [4] zusammengestellten Anforderungen an Endlagergebinde in Deutschland, so ist auch hier eine qualitative und/oder quantitative Nachbetrachtung der Behälterfunktionen vonnöten. Sind die an das betrachtete Behälterkonzept gestellten Anforderungen hingegen höher als die nach [4] anzusetzenden, so kann ein auf die Erfüllung dieser Anforderungen ausgelegtes Behälterkonzept – eine Vergleichbarkeit der zugrunde gelegten Einwirkungen vorausgesetzt – direkt auf entsprechende deutsche Wirtsgesteinsinformationen übertragen werden.

Für die in Kapitel 5 erfolgende Herleitung generischer Behälterskizzen für die drei potenziellen Wirtsgesteine findet ebenfalls der im Arbeitspaket 3 erstellte top-down-Ansatz (Abbildung 2-1 in Kapitel 2 des zugehörigen Berichtes [4]) Anwendung. Dabei wird für die Erstellung von Behälterskizzen eine Methodik für die Zusammenstellung wissenschaftlich-technischer Lösungsansätze für die jeweiligen Behälterfunktionen verwendet. Aus den Behälterfunktionen zur Erfüllung der Anforderungen und aus in den verschiedenen Zeitphasen zu berücksichtigenden Einwirkungen lassen sich durch eine Kombination dieser Lösungsansätze generische Behälterkonzepte ableiten. Eine genauere Beschreibung erfolgt im entsprechenden Abschnitt 5.1.

2 Entwicklungslinien bestehender Behälterkonzepte

Als Ergebnis der umfangreichen Literaturrecherche im Arbeitspaket 1 wurden Informationen zu verschiedenen Behälterkonzepten sowie den jeweiligen Anforderungen an diese Behälterkonzepte zusammengetragen und ausgewertet [2]. Die dort detailliert beschriebenen Behälterkonzepte umfassen auch die für die Endlagerung im Steinsalz entwickelten deutschen Behälterkonzepte POLLUX® und die Brennstabkokille BSK-3. Zusätzlich wird auch die direkte Endlagerung von bereits zur Zwischenlagerung ausgedienter Brennelemente und von Abfällen aus der Wiederaufarbeitung eingesetzten Transport- und Lagerbehältern (TLB) des Typs CASTOR® betrachtet. Eine Auflistung der in diesem Arbeitspaket betrachteten Behälterkonzepte findet sich in Tabelle 1.

Ausgelegt für Wirtsgestein	Behälterkonzept	Beschreibung	Stand
Kristallin	KBS-3	Doppelhüllenbehälter (Gusseisenbehälter mit massiver Kupferhülle) für Brennelemente	weit fortgeschritten (Fertigung, Beladung, Verschluß, Transport, Einlagerung)
	UOS	Doppelhüllenbehälter aus verschiedenen Eisenlegierungen für Brennelemente	Konzeptstudie; vom KBS-3 abgeleitet („KBS-3 aus Stahl“)
	UFC II	Stahlbehälter mit Kupferbeschichtung für (CANDU-) Brennstabbündel	fortgeschrittenes Konzept (Material-, Fertigungs- und Behältertests)
Tonstein	belgischer Supercontainer	in Betonkörper eingeschlossener Stahlbehälter für Brennelemente oder Kokillen	Materialtests
	Andra-Konzept	unabgeschirmter Stahlbehälter für Kokillen oder Brennelemente	Material-, Fertigungs- und Behältertests
	Nagra-Referenzkonzept	robuster Stahlbehälter für Brennelemente oder Kokillen	generisches Design für die Endlagerung von BE und Kokillen in Tonstein
Steinsalz			von RWM als Referenzkonzept für das Wirtsgestein Salz in Betracht gezogen
	POLLUX®-10	für Transport und Handhabung abgeschirmter Behälter für gezogene Brennstäbe	fortgeschrittenes Konzept; Prototyp gefertigt und getestet; Erprobung der Einlagerungstechnik
	BSK-3	unabgeschirmte Kokille für die Bohrlochlagerung gezogener Brennstäbe	Entwurf in verschiedenen FuE-Berichten; Einlagerungstechnik an dummy getestet
--	Transport- und Lagerbehälter (z. B. Behälterfamilie des Typs CASTOR®)	für Transport und Handhabung abgeschirmter Transportbehälter für Brennelemente oder Kokillen mit Genehmigung für eine begrenzte Zwischenlagerung	Bestehende Behälter. Derzeit keine Zulassung für Endlagerung.

Tabelle 1: Im Arbeitspaket 1 identifizierte fortgeschrittene Behälterkonzepte (vergl. [2])

Im Folgenden werden die Entwicklungslinien der für die verschiedenen Wirtsgesteine konzipierten Behälterkonzepte kurz skizziert; eine detailliertere Darstellung findet sich im Kapitel 3.6 des Berichtes zum Arbeitspaket 1 [2].

2.1 Behälterkonzepte in kristallinen Wirtsgesteinen

Programme für die Errichtung eines Endlagerbergwerkes in kristallinen Wirtsgesteinen stellen weltweit die Mehrheit der dokumentierten Endlagerprogramme dar. Die globale Verfügbarkeit kristalliner Gesteinsformationen im Grund- oder Deckgebirge bildet die Grundlage dafür. Kristalline Wirtsgesteine zeichnen sich dadurch aus, dass sie allgemein durch vorhandene Risse und Klüfte wasserführend sind, was einerseits die Einschlussfunktion der geologischen Barriere begrenzt und andererseits die Endlagergebäude, an deren Einschlussfunktion entsprechend höhere Anforderungen gestellt werden, potenziell starker Korrosion aussetzt. Die grundsätzlich hohe Ähnlichkeit kristalliner Wirtsgesteine – große Härte, Wasserführung – führt zu einer großen qualitativen Ähnlichkeit der behälterrelevanten Einwirkungen. Die durch das Behälternahfeld – in allen gefundenen Konzepten ein *buffer* aus Bentonit oder bentonithaltigen Materialien – gegebene biologisch-chemische Umgebung ist ebenfalls vergleichbar; jedoch müssen auch hier in einem gewissen Rahmen die vom Standort und Endlagerkonzept abhängigen Randbedingungen und Einwirkungen betrachtet werden. So wird für den auf eine Lebensdauer von 100.000 Jahren im schwedischen bzw. finnischen Granit ausgelegten KBS-3-Behälter in der erwarteten Umgebung eines litauischen Endlagerbergwerkes eine Lebensdauer von bis zu 1,6 Millionen Jahren angenommen [6].

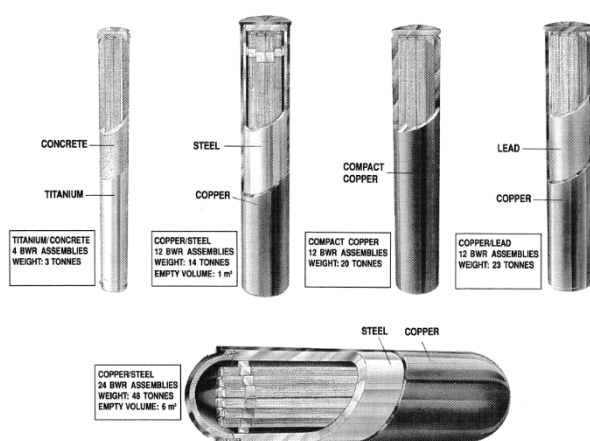


Abbildung 3:
Verschiedene im schwedischen KBS-Programm
untersuchte Behälterkonzepte [8]

Als international bedeutendstes Behälterkonzept für kristalline Wirtsgesteine muss, aufgrund des derzeitigen Standes des Behälterkonzeptes, aber auch aufgrund der umfassenden Dokumentation und der Verbreitung, das schwedisch-finnische KBS-3-Konzept angesehen werden. Für die ab 1978 betrachtete direkte Endlagerung ausgedienter Brennelemente im Granit wurden anfangs massive Kupferbehälter mit einer Wandstärke von 20 cm angenommen, in denen gezogene Brennstäbe eingelagert und anschließend mit Blei vergossen werden sollten [7]. Parallel dazu wurden weitere Behälterkonzepte für verschiedene Endlagerkonzepte entwickelt, darunter betonverfüllte Titanbehälter, kupfer-

ummantelte Stahlbehälter oder massive kupferne Behälter mit oder ohne Bleiverfüllung (siehe Abbildung 3). Eine systematische Gegenüberstellung der entwickelten Behälter- und Endlagerkonzepte führte schließlich 1991 zur Entscheidung für Stahlbehälter mit einer äußeren Kupferhülle, die in flachen vertikalen Bohrlöchern eingelagert werden sollten [8]. Mit dem Übergang von Stahl auf Gusseisen für die Innenbehälter wegen günstigerer Material- und Fertigungseigenschaften wurde 1994 das heutige KBS-3-Konzept vorgestellt [9]. Das Konzept wurde mit einer umfassenden Analyse des Behälters, der Fertigung und des Behälterzustandes nach Beladung und Verschluss 2010 [10, 11] bzw. in Finnland 2012 [12] abgeschlossen. Ein gusseiserner Innenbehälter dient hier der mechanischen Festigkeit der Behälter unter Endlagerbedingungen, während eine 50 mm starke Schicht aus (sauerstofffreiem, Phosphor-dotiertem) Kupfer den sicheren Einschluss über eine geforderte Lebensdauer von 100.000 Jahren – dem gesamten Nachweiszeitraum des KBS-3-Systems –

gewährleistet. Der Außendeckel wird nach der Beladung dicht verschweißt. Aufgrund der globalen Vergleichbarkeit der Einwirkungen und der bereits 1994 im Wesentlichen

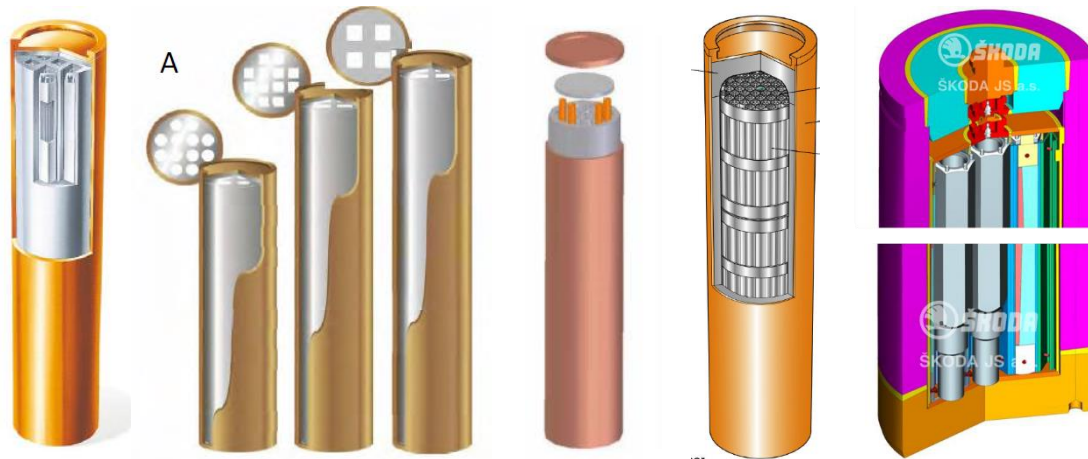


Abbildung 4: Behälterkonzepte in kristallinen Wirtsgesteinen, v.l.n.r. der schwedisch-finnische KBS-3-Behälter [10], drei KBS-3-Varianten für WWER-BE, SWR-BE und DWR-BE im finnischen Endlagerprogramm [12], der koreanische KDC-1-Behälter [16], der kanadische UFC-I-Behälter der OPG (betrachtet 2002-2015) [13] und ein tschechisches Behälterkonzept für WWER-BE [18].

abgeschlossenen Behälterentwicklung diente das schwedische KBS-3-Konzept anderen Ländern als Referenz für die Entwicklung eigener Endlagerkonzepte (siehe Abbildung 4).

Finnland beteiligte sich ab 1999 an der weiteren Entwicklung des nun gemeinsamen schwedisch-finnischen Konzeptes. Kanada begann 2002 mit der Entwicklung eines Endlagerkonzeptes, mit einem für CANDU-Brennstabbündel modifizierten KBS-3-Behälter (OPG-Behälter bzw. UFC, siehe Abbildung 4, 2. v. r.) [6, 13], der 2015 nach einer Neuevaluation der geotechnischen und technischen Barrieren zugunsten eines kleineren kupferbeschichteten Behälters aus Stahl (UFC II, siehe Abbildung 5) verworfen wurde [14]. Die Republik Korea begann 2007 mit der Entwicklung eines Endlagerkonzeptes, das einer direkten Übertragung des KBS-3-Konzeptes mit geringeren Anforderungen (insbesondere eine geforderte Lebensdauer von nur 1.000 Jahren entsprach und daher hier nicht weiter betrachtet wird [15, 16]. Jüngere Konzepte für die Endlagerung von Abfällen aus der Wiederaufarbeitung sehen Gusseisenbehälter mit einer dünnen Kupferbeschichtung analog dem neuen kanadischen Behälterkonzept vor [17]. Behälterkonzepte der Tschechischen Republik (seit 2012) orientieren sich ebenfalls am KBS-3-Konzept, sind aber in zwei verschiedene Entwicklungslinien aufgeteilt: Eine Linie mit begrenzter Korrosion (dünnwandiger Innenbehälter aus Edelstahl, dickwandiger Außenbehälter aus Stahl) und eine Linie mit Korrosionsschutz (dickwandiger innerer Stahlbehälter mit dünner Korrosionsschutzschicht aus Kupfer oder Titan) [18, 19].



Abbildung 5: Der seit 2015 betrachtete kanadische UFC-II-Behälter [14]

2.2 Behälterkonzepte im Wirtsgestein Tonstein

Im Gegensatz zu den vergleichbaren wesentlichen Eigenschaften kristalliner Gesteinsformationen (z. B. thermische Randbedingungen, vergl. Tabelle 5 und hydrochemisches Milieu, vergl. Tabelle 7) sind die Eigenschaften von Tonsteinformationen an verschiedenen Standorten teils sehr unterschiedlich. Allgemein sind Tongesteine wasserhaltig, weisen allerdings eine hohe Barriere- und Rückhaltungsfunktion für wässrige Lösungen auf. Ausnahme sind beispielsweise sehr harte, rissige Tone im ungarischen Endlagerprogramm, die dort zur Verwendung des KBS-3-Systems als Referenz führten [20].

In den detailliert betrachteten Endlagerkonzepten in Tonstein hingegen ist die Einschlussfunktion der geologischen Barriere wesentlicher Bestandteil des Endlagerkonzeptes. Im französischen und belgischen Endlagerkonzept bilden Abfallform und Wirtsgestein die wesentlichen Barrieren. Dies erlaubt die Verwendung weniger korrosionsresistenter Materialien.



Abbildung 6: Assemblierung eines belgischen Supercontainers aus dem vorgegossenen Betonkörper, dem Stahlbehälter und dem anschließenden Vergießen mit Beton [21]

Im belgischen Konzept (Abbildung 6) dient der die Stahlbehälter umgebende Supercontainer aus Beton der mechanischen Stabilisierung, der Begrenzung der Oberflächentemperatur und der Abschirmung des Strahlungsfeldes. Darüber hinaus begrenzt der Beton durch die Stabilisierung eines langfristig alkalischen Milieus im Behälternahefeld auch die Korrosion der Stahlbehälter [21].

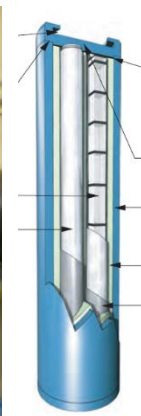
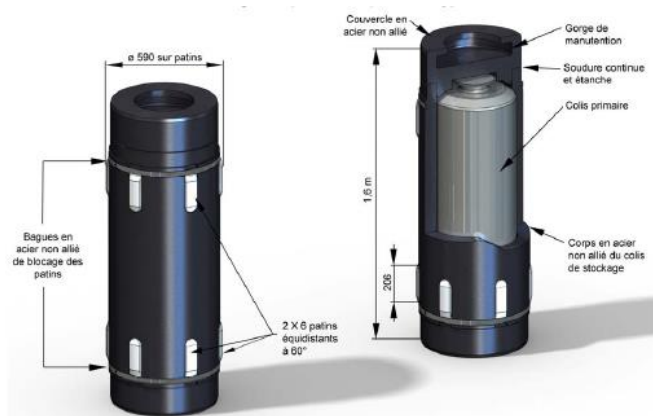


Abbildung 7: Französisches Behälterkonzept für Stahlbehälter für die Endlagerung von Kokillen mit verglasten Spaltproduktlösungen aus der Wiederaufarbeitung [144] (l.) sowie das Konzept für eine optionale direkte Endlagerung von Brennelementen [45] (Versuchskörper m., Schema r.).

Im französischen Endlagerkonzept dient der bis zu 65 mm starke Stahlbehälter (Abbildung 7) der mechanischen Festigkeit und dem sicheren Einschluss der Kokillen mit verglasten hochaktiven Spaltproduktlösungen und Klärschlämmen aus der Wiederaufarbeitung während der Einlagerung sowie im Falle einer späteren Rückholung [154]. Die Stahlbehälter werden in verrohrten Strecken eingelagert, nur die für eine optionale Einlagerung von Brennelementen konzipierten größeren BE-Behälter sollen zusätzlich mit einer Tonschicht umgeben werden [154]. Entsprechend der gegenüber den verglasten Abfällen aus der Wiederaufarbeitung geringeren chemischen Stabilität der Brennelemente ist auch die Behälterwand mit 11 cm etwa doppelt so stark [22].

Das Schweizer Referenzkonzept für die Endlagerung ausgedienter Brennelemente und von Abfällen aus der Wiederaufarbeitung wurde ursprünglich ebenfalls aus dem KBS-3-Konzept abgeleitet. Die Verwendung von Tonstein als Wirtsgestein erlaubte den Verzicht auf die äußere Kupferhülle. Der verbliebene verschweißte Behälter aus Gussstahl hat eine Wandstärke von 14 cm und dient sowohl dem sicheren Einschluss als auch der mechanischen Festigkeit [23]. Parallel zum Referenzkonzept werden auch weitere Überlegungen zu korrosionsresistenten Behälterkonzepten weitergeführt, die jedoch hier nicht weiter betrachtet werden [24, 25].

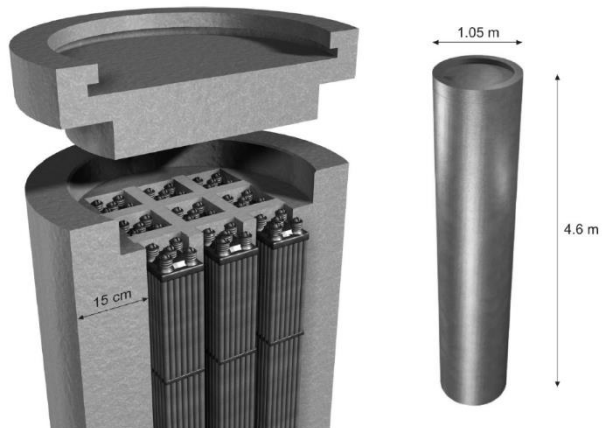


Abbildung 8: Das Schweizer Referenzkonzept der Nagra, ein massiver Stahlbehälter mit Varianten für die Endlagerung von Brennelementen [hier für 9 SWR-BE] oder Kokillen [65].

2.3 Behälterkonzepte im Wirtsgestein Steinsalz

Als einzige Behälterkonzepte für die Endlagerung Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle im Wirtsgestein Steinsalz wurden in Deutschland für die Streckenlagerung die abgeschirmten Endlagerbehälter vom Typ POLLUX® sowie für die vertikale Bohrlochlagerung das Konzept einer Brennstabkokille (BSK-3) entwickelt. Beide Behälter sind für die Einlagerung von

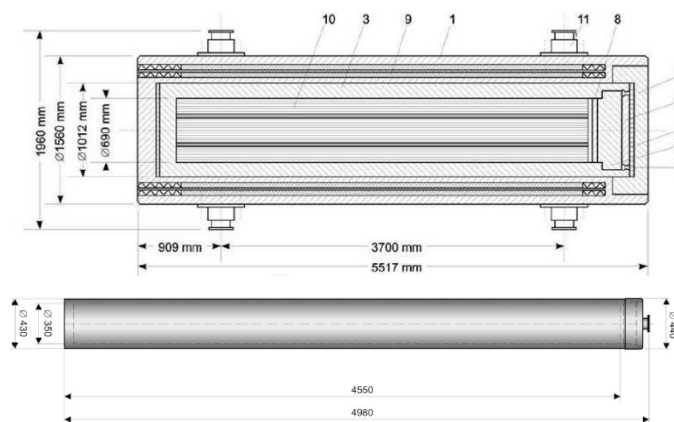


Abbildung 9: Die Behälterkonzepte für das Wirtsgestein Steinsalz: Der POLLUX® (o.) und die Brennstabkokille BSK-3 (liegend, u.) [95]

einem äußeren Abschirmbehälter, der die Ortsdosisleistung an der Behälteroberfläche weit genug begrenzt, um die Sicherheit des eingesetzten Personals zu gewährleisten. Die als Konzeptskizze vorliegende unabgeschirmte Brennstabkokille BSK-3 wurde für die die Einlagerung in vertikalen Bohrlöchern im Steinsalz entworfen [29] und in der VSG zum Entwurf einer rückholbaren Kokille (BSK-R) für die Einlagerung in verrohrten und mit Quarzsand verfüllten vertikalen Bohrlöchern weiterentwickelt [30].

2.4 Transport- und Lagerbehälter (TLB)

Die in Deutschland für den Transport von Wärme entwickelnden radioaktiven Abfällen entwickelten und mit einer Genehmigung für eine zeitlich begrenzte Zwischenlagerung dieser Abfälle versehenen Transport- und Lagerbehälter (TLB) wurden entsprechend ihrer primären Aufgabe nicht für die Einlagerung in einem Endlager konzipiert oder ausgelegt. Überlegungen, sie als Endlagerbehälter zu nutzen [30, 31, 32], führten zu einer Machbarkeitsstudie, in der mögliche Einlagerungstechnik entworfen und als realisierbar bewertet wurde [33].

In weiteren Forschungsarbeiten wurde untersucht, inwieweit eine Einlagerung der für das Wirtsgestein Steinsalz entwickelten Behälterkonzepte POLLUX® und BSK-3 bzw. der TLB auch in den Wirtsgesteinen Tonstein und Kristallin infrage kämen [32, 34, 35, 36]. Die im Vorfeld dieser FuE-Arbeiten angestellten Konzeptstudien für Endlagerkonzepte in den Wirtsgesteinen Tonstein und Kristallin bilden gleichzeitig den Ausgangspunkt für eine generische Charakterisierung dieser Wirtsgesteine in Deutschland sowie für die Ableitung von Randbedingungen und Anforderungen aus Betrieb und Endlagerkonzepten in den vorangegangenen Arbeitspaketen 2 [3] und 3 [4].

Bei der Betrachtung von TLB muss beachtet werden, dass es sich hier nicht um einen Behältertyp handelt, sondern um eine Gruppe unterschiedlicher Behältertypen und -konzepte mit diversitären Inventaren. Eine Auswahl in Deutschland vorhandener TLB findet sich in Abbildung 10. Neben den dort dargestellten Behältern für Transport und begrenzte Zwischenlagerung von Kokillen, SWR- und DWR-Brennelementen gibt es weitere Typen u. a. auch für WWER-Brennelemente und Brennelemente aus Versuchs-, Prototyp- und Forschungsreaktoren.

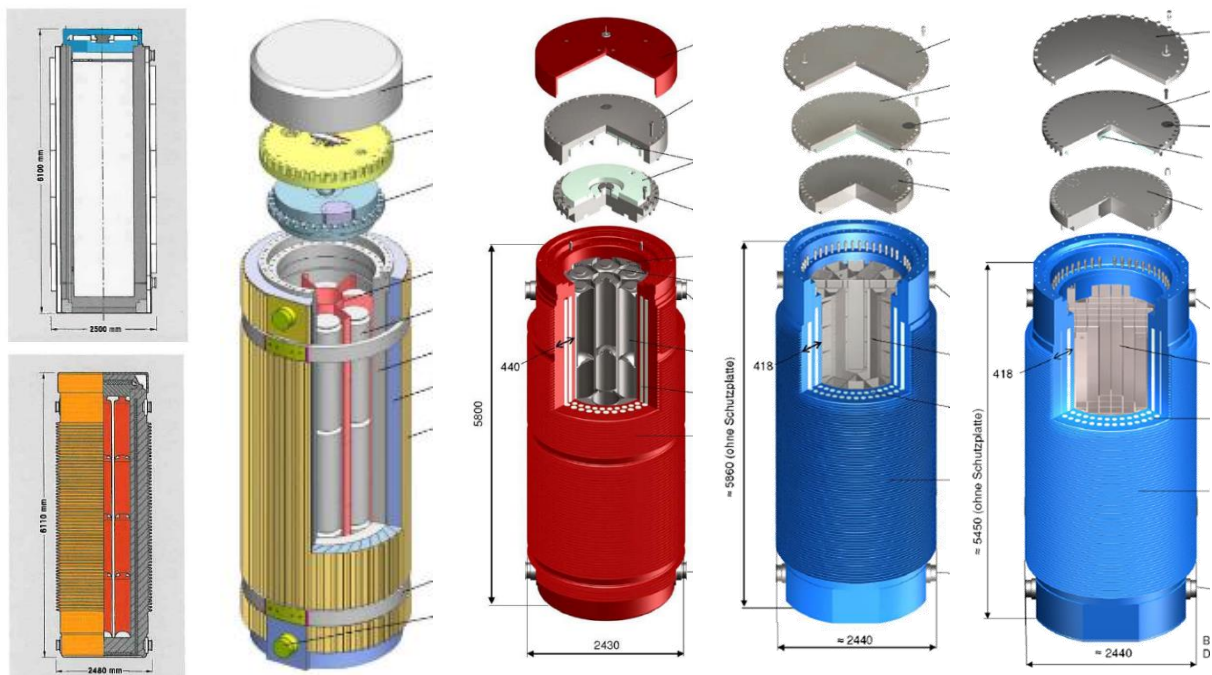


Abbildung 10: Auswahl verschiedener TLB-Typen [95]. Links TS 28 V (o.) und CASTOR® HAW 20/28 (u.), daneben v. l. n. r. TN 85, CASTOR® HAW 28M, CASTOR® V/19 und CASTOR® V/52. Die Abbildungen wurden den dazugehörigen Produktdatenblättern entnommen, die im Rahmen der Arbeiten zur VSG zusammengestellt worden sind.

2.5 Weitere Behälterkonzepte

Neben diesen Behälterkonzepten wurden noch weitere Behälterkonzepte betrachtet, die hier allerdings nur in begrenztem Umfang Berücksichtigung finden. Das Endlagerprogramm in Großbritannien sieht für die Endlagerung von ausgedienten Brennelementen und Abfällen aus der Wiederaufarbeitung in den derzeit generischen Wirtsgesteinen Steinsalz, Tonstein und Kristallingestein jeweils adaptierte Behälterkonzepte aus anderen Programmen vor (Abbildung 11): Ein modifiziertes Nagra-Referenzkonzept für die Einlagerung in Salz- und Tonformationen und ein modifiziertes KBS-3-Konzept in Kristallingestein [37]. Die Betrachtung der bereits genannten Behälterkonzepte deckt daher die britischen Studien inhaltlich mit ab. Konzeptionell findet der systematische britische Ansatz Eingang in der Erstellung generischer Behälterkonzepte in Kapitel 5.

In den Vereinigten Staaten von Amerika entwickelte Behälterkonzepte für ein Endlager im Yucca Mountain wurden im Arbeitspaket 1 ebenfalls betrachtet, werden jedoch hier nicht aufgeführt. Die Randbedingungen im Yucca-Mountain-Projekt – vor Allem wasserdurchlässiger Tuff als Wirtsgestein, eine Einlagerung im ungesättigten Bereich (oxidativ/über dem Grundwasserniveau), freistehende Behälter in unverfüllten Tunneln [38] und eine Oberflächentemperatur bis zu 200 °C [39] – begrenzen eine Vergleichbarkeit von Einwirkungen und Anforderungen von Beginn an.

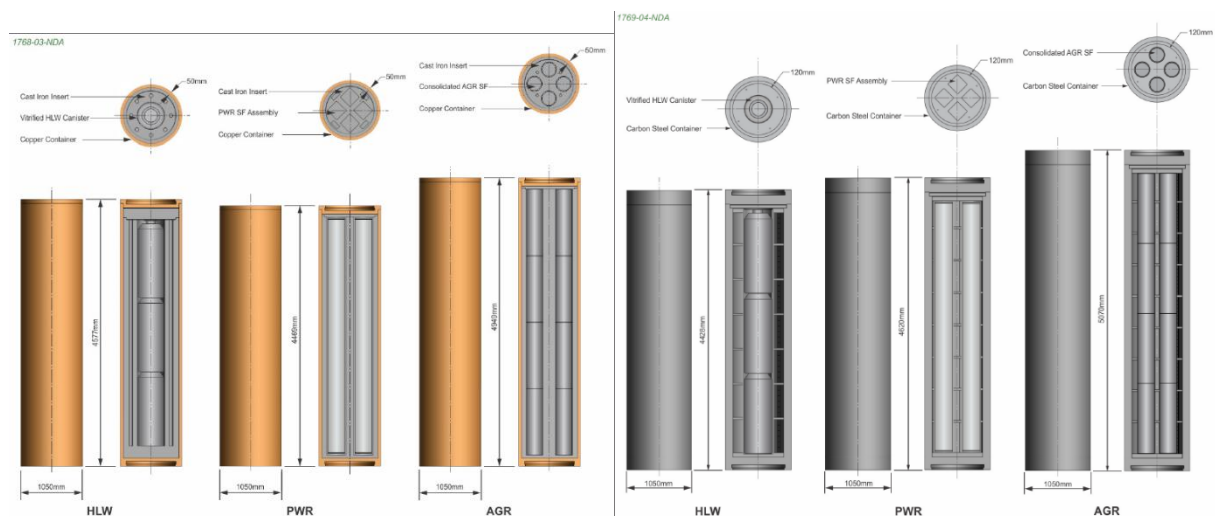


Abbildung 11: Generisches britisches Behälterkonzept für Endlagerkonzepte im Kristallingestein (analog KBS-3, 1. für HLW-Kokillen, 2. v. l. DWR-BE, 3. v. l. AGR-BE) und in Tonstein- und Steinsalzformationen (analog Nagra-Referenzkonzept, 4. v. l. HLW-Kokillen, 5. v. l. DWR-BE und r. AGR-BE) [37].

Keramische Behälterkonzepte wurden von verschiedenen Ländern betrachtet; in Schweden ab 1978 [7], in der Schweiz ab 1984 [40] und in Frankreich ab 2016 [41]. Frankreich ist derzeit das einzige Land, in dem die Erforschung eines keramischen Behälterkonzeptes weiterhin verfolgt wird. Neben den intrinsischen Vorteilen keramischer Werkstoffe – hohe Härte und weitgehende Unempfindlichkeit gegenüber Korrosion – ist die hohe Sprödigkeit von Keramiken ein Problem bei Auftreten dynamischer oder anisotroper Lasten. Wesentlicher Grund gegen die Verwendung von keramischen Behältern für Brennelemente ist die bislang noch technologisch begrenzte Fertigungsgröße für keramische Behälter. Das französische Konzept eines keramischen Behälters ist ausschließlich für die Aufnahme von CSD-Kokillen ausgelegt.

3 Vergleichbarkeit der Behälterkonzepte

Entsprechend der in Abschnitt 1.3 entwickelten Methodik (Abbildung 2) müssen für einen Vergleich verschiedener Behälterkonzepte die jeweils berücksichtigten Einwirkungen und die an die Behälterkonzepte gestellten Anforderungen in die Betrachtungen miteinbezogen werden. In den folgenden Abschnitten werden daher die wesentlichen in den verschiedenen betrachteten Endlagerprogrammen berücksichtigten Einwirkungen auf die Behälter (Abschnitt 3.1), die von den Endlagergebinden zu erfüllenden Anforderungen (Abschnitt 3.2) sowie eine ergänzende Auswahl wesentlicher in den Behälterkonzepten beschriebener Auslegungsgrößen (Abschnitt 3.3) zusammengestellt und verglichen.

3.1 Vergleichende Darstellung der Einwirkungen auf die Behälter

Die Einwirkungen auf die Endlagergebäude bilden die Grundlage für die Auslegung der Behälterfunktionen zur Erfüllung der an die Endlagergebäude gestellten Anforderungen. Eine umfassende Kategorisierung Darstellung der Einwirkungen auf verschiedene Endlagerkonzepte in den verschiedenen Zeitphasen findet sich in Kapitel 5 des Berichtes zum Arbeitspaket 3 [4].

Zur besseren Übersicht werden die in der im AP1 zusammengestellten Dokumentensammlung gefundenen Informationen zu wesentlichen Einwirkungen entsprechend der im AP3 hergeleiteten Systematik aufgeführt und tabellarisch dargestellt. Dabei werden die Einwirkungen vor allem nach Wirtsgestein kategorisiert.

3.1.1 Mechanische Einwirkungen

Die Schutzfunktion des sicheren Einschlusses der Abfälle in den Gebinden bedingt eine mechanische Integrität der Endlagergebäude auch gegenüber den bei Beladung, Transport und Handhabung sowie im Endlagersystem auftretenden mechanischen Lasten. Eine Zusammenstellung möglicher mechanischer Lasten – statischer sowie dynamischer mechanischer Lasten im Normalbetrieb sowie unter Störfall- bzw. Unfallbedingungen – ist im Kapitel 5 des Berichtes zum Arbeitspaket 3 gegeben [4]. Die hier zusammengetragenen Einwirkungen beschreiben, sofern nicht explizit anders benannt, Lasten im Normalbetrieb.

3.1.1.1 Statische mechanische Lasten

Die statischen mechanischen Lasten umfassen jene mechanischen Lasten – Drücke oder Spannungen –, denen die Endlagergebäude in der Regel nach der Einlagerung ausgesetzt sind. Während Transport, Handhabung und Beladung auftretende statische Lasten beschränken sich auf das Eigengewicht der Behälter und der darin konditionierten Abfälle. Anschlag- und Hebelasten können im Rahmen der Behälterauslegung ebenfalls in diese Kategorie fallen und bilden den Rahmen für die Auslegung von entsprechenden Hebe- und Anschlaghilfen und -punkten, wie z. B. Tragzapfen oder Kehlen. Die für die Endlagergebäude auslegungsrelevanten statischen Lasten betreffen die im Endlagersystem auftretenden Drücke und Spannungen. Dies sind in erster Linie der lithostatische Druck des aufliegenden Gebirgskörpers (falls hier ein Kraftschluss zum Gebinde vorliegt, vergleiche Tabelle 2), der hydrostatische Druck der Wassersäule im Gebirgskörper (falls Wasserkontakt zum Gebinde besteht, vergleiche Tabelle 3) und bei der Verwendung von Tonen als Wirtsgestein oder als *buffer* um das Endlagergebäude der Schwellendruck des umliegenden Tones bei der nach dem Versetzen der Endlagergebäude fortschreitenden Sättigung der Tonminerale mit eindringendem Wasser (siehe Tabelle 4).

Der lithostatische Druck ist abhängig von den mechanischen Eigenschaften des Wirtsgesteins und vom Auflagedruck des den Einlagerungsbereich überlagernden Gebirges.

Lithostatischer Druck					
Wirtsgestein	Land	Teufe [m]	Druck [MPa]	Bemerkungen	Quelle
Kristallin	Schweden	500	--	In harten Gesteinen wird angenommen, dass der lithostatische Druck nicht auf die Gebinde wirkt.	[11]
	Finnland	420	--		[12]
	Rep. Korea	500	--		[15]
	Tschechien		--		[42]
	Kanada		--		[43]
Sediment			--		
Tonstein	Belgien	240	4,5		[44]
	Frankreich	525	12		[45]
	Schweiz	450...850	15...22	anisotrope Spannungen	[23]
Steinsalz	Deutschland	870	18,8	Erkundungsbergwerk Gorleben	[30]

Tabelle 2: Lithostatischer Druck als Einwirkung in den verschiedenen Endlagerkonzepten

Hydrostatischer Druck					
Wirtsgestein	Land	Teufe [m]	Druck [MPa]	Bemerkungen	Quelle
Kristallin	Schweden	500	5	Berechnung einer Wassersäule mit 10 MPa/km	[46]
	Finnland	420	4,1		[12]
	Rep. Korea	500	5		[15]
	Tschechien				[42]
	Kanada		6		[43]
Sediment					
Ton	Belgien	223 ^H	2,2		[44]
	Schweiz	450...850	4,5...8,5		[23]
	Frankreich	525	--	hydrostatischer Druck wirkt (vorerst) auf die Verrohrung, nicht auf die Gebinde	[47]
Salz	Deutschland	870	--	keine durchgehende Wassersäule im Salz	[48]

Tabelle 3: Hydrostatischer Druck als Einwirkung in den verschiedenen Endlagerkonzepten.
H – Untergrundlabor HADES

Beim Schwelldruck des Bentonit-*buffers* in Endlagerkonzepten in kristallinen Wirtsgesteinen sowie für den Schwelldruck von Tonen liegen experimentelle Ergebnisse vor, die den zitierten Arbeiten als Grundlage dienen. Im **schwedischen** Endlagerprogramm werden so auch Anforderungen an einen Mindestschwelldruck des Bentonits gestellt, u. a. um die Behälter mechanisch abzustützen, ein „Versinken“ der Behälter im Bohrloch zu verhindern und das Wachstum von Mikroben an der Gebindeoberfläche zu hemmen (oberhalb 2 MPa) [49]. Der mit 10 MPa angenommene Schwelldruck für das (süd-)koreanische Referenzkonzept KRC-1 hingegen ist eine reine Konzeptannahme, die ebenfalls aus dem schwedisch-finnischen KBS-3-Konzept abgeleitet worden ist [15].

Schwelldruck von buffer oder Tonen					
Wirtsgestein	Land	Teufe [m]	Druck [MPa]	Bemerkungen	Quelle
Kristallin	Schweden	500	≤ 15	Annahme Substitution Na $\rightarrow$ Ca im Bentonit	[46]
	Finnland	420			[12]
	Rep. Korea	500	10	Annahme	[15]
	Tschechien		15	übernommen aus KBS-3-Konzept	[42]
	Kanada		$\leq 11,5$	maximaler Schwelldruck in der „buffer box“	[50]
Sediment					
Tonstein	Belgien	240	5...6	Schwelldruck des Boom-Tones	[44]
	Frankreich	525	--	Einlagerung der HLW-Behälter in verrohrten Strecken	[45]
			≤ 7	Schwelldruck des Bentonit-buffers im optionalen Konzept für die Endlagerung von BE	
	Schweiz	450...850	2...4	Bentonit-Schwelldruck nach >100 a	[23]

Tabelle 4: Der Schwelldruck von Bentonit-buffern und Tonen um Endlagerbehälter

Im einzigen vorliegenden Sicherheits- und Endlagerkonzept für die Endlagerung Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle in Steinsalz (VSG) wird kein tonbasierter *buffer* um die Endlagergebinde herum angenommen. Grund hierfür ist die Barrierewirksamkeit des Verfüllmaterials (Salzgrus), das zu Steinsalz kompaktiert und eine zusätzliche geotechnische Barriere gegen wässrige Lösungen unnötig macht [30].

3.1.1.2 Vergletscherung

Die betrachteten Zeitskalen für die zu erbringenden Sicherheitsnachweise umfassen je nach Land zwischen 10.000 und 1.000.000 Jahre. Gerade in höheren Breitengraden wird daher auch eine Vergletscherung während künftiger Eiszeiten mit in die Betrachtungen einbezogen. Dabei wird aus einer zu unterstellenden Mächtigkeit der den Endlagerstandort überlaufenden Gletscher ein Auflagedruck abgeleitet, der als weitere statische mechanische Last auf den lithostatischen Druck (Auflagedruck, bei Tonsteinformationen und Steinsalz) bzw. auf den hydrostatischen Druck (Druck des einfließenden Schmelzwassers, bei Kristallingestein) aufgeschlagen wird. Die Gletscherlast ist dabei als zusätzliche Wassersäule über dem Endlagersystem angenommen, also mit einer Last von 10 MPa/km Gletscherdicke. Dieser Druckaufschlag ist im Sinne des Arbeitspaketes keine (direkt messbare bzw. verifizierbare) Einwirkung, sondern eine Annahme für die Auslegung des Endlagersystems und der Behälterkonzepte. Dennoch soll diese Auslegungsgröße als *potenzielle Einwirkung* hier mit aufgeführt werden, da sie zu den in der Summe zu unterstellenden mechanischen Einwirkungen auf die Behälter zählt.

In Finnland wird eine mögliche zusätzliche Gletscherlast von 25 MPa angenommen [12]. In **Schweden** wurde im Rahmen der Sicherheitsstudien für die beiden möglichen Standorte Forsmark und Laxemar jeweils mit 26 MPa bzw. 22 MPa gerechnet; in den Berechnungen für das Endlager in Forsmark findet sich später die Angabe von 30 MPa für den hydrostatischen Druck unter Gletscherlast, also implizit ebenfalls 25 MPa [46, 51]. In **Kanada** werden 30 MPa als zusätzliche Gletscherlast angenommen [13]. In der **Schweiz** wird von einem zusätzlichen Druck von 5 MPa ausgegangen (angenommene maximale Gletscherdicke 500 m) [23]. Für die VSG wurde in **Norddeutschland** von einer Mächtigkeit auftretender Gletscher von 1.500 m ausgegangen, entsprechend einem anzunehmenden zusätzlichen Auflagedruck von 15 MPa [52].

3.1.1.3 Anisotrope Lasten

Im schwedisch-finnischen KBS-3-Konzept wurden frühzeitig die Auswirkungen anisotroper Lasten untersucht, insbesondere Scherlasten aufgrund von durch den Einlagerungsbereich verlaufenden Frakturen im Wirtsgesteinskörper und anisotropen Schwellens des Bentonit-*buffers*.

Für Scherbewegungen von bis zu 5 cm in sämtliche Richtungen (Geschwindigkeit bis 1 m/s) und in Temperaturbereichen zwischen der angenommenen Systemtemperatur und 0°C wurde befunden, dass die Kupferhülle unbeschadet und der Gusseisenkörper des Behälters funktionell intakt bleiben und weiterhin ihre Aufgaben – Korrosionsschutz bzw. mechanische Stabilität – erfüllen können [10, 49].

Ungleichmäßiges Schwellen des Bentonit-*buffers*, z. B. durch eine Verlagerung des versetzten Endlagergebindes im *buffer* oder durch ungleichmäßigen Wasserzutritt, kann unter Annahme mehrerer simultaner Defekte mit einer Biegespannung von bis zu 111,5 MPa abgeschätzt werden. Ein Versagen der Behälter durch solche Biegemomente wird ausgeschlossen [10].

3.1.1.4 Dynamische mechanische Lasten

Dynamische Lasten – also Beschleunigungen oder Stöße bzw. Vibrationen an den Endlagergebinden – treten betriebsbedingt sowohl durch die Abläufe bei Transport, Beladung und Handhabung als auch bei der Einlagerung auf. Die Betrachtung von Erschütterungen, Stößen und Stürzen der Endlagergebinde im Rahmen von Störfall- und Unfallanalysen ist Bestandteil des Sicherheitskonzeptes für den Betrieb. Da diese Lasten stark vom Endlagerkonzept abhängig sind, von der verwendeten Technik, der zugrundeliegenden Logistik etc., wird hier keine detaillierte Analyse dieser Einwirkungen vorgenommen. Es sei stattdessen auf die Betrachtungen zu dynamischen Betriebslasten im entsprechenden Kapitel 5 des Berichtes zum Arbeitspaket 2 [3] sowie in den Abschnitten zu Dynamischen Einwirkungen im Kapitel 5 des Arbeitspaketes 3 [4] verwiesen.

Nach der Einlagerung der Endlagergebinde können Vibrationen infolge der weiteren Arbeiten in der Betriebsphase – Einlagerungs- und Verfüllarbeiten in benachbarten Einlagerungsbereichen – und während der Stilllegungsarbeiten sowie bei einer möglichen Rückholung oder Bergung auftreten. Natürliche dynamische Lasten sind seismische Aktivitäten von Gebirgsbewegungen bis hin zu Erdbeben. Die Kriterien der Standortauswahl [5] sind darauf ausgelegt, einen Endlagerstandort in seismisch stabilen und ruhigen Regionen zu finden. Trotzdem sind Betrachtungen möglicher Auswirkungen von Erdbeben in verschiedenen Endlagerprogrammen durchgeführt worden, so in **Finnland** [53] und **Schweden** [46]. Im finnischen Sicherheitskonzept wurde darüber hinaus die Wahrscheinlichkeit eines direkten Meteoriteneinschlages auf das Endlager betrachtet; im Ergebnis wird für die Freilegung des Endlagersystems ein Meteorit von mindestens zehnfacher Größe des Tunguska-Impaktors vorausgesetzt, was einerseits als unwahrscheinlich genug gilt [53] und andererseits eine Freisetzungsbetrachtung irrelevant erscheinen ließe [54].

3.1.2 Thermische Einwirkungen

Das Temperaturfeld im Endlagersystem hat Auswirkungen auf eine Vielzahl von Prozessen und Eigenschaften, die für eine Sicherheitsbetrachtung sowohl über kurze als auch lange Zeiträume relevant sind. Sämtliche chemische Prozesse sind temperaturabhängig, darunter im Endlager insbesondere auch Korrosionsprozesse und die chemische (oder direkt thermische) Zersetzung organischer Materialien. Biologische Prozesse sind intrinsisch temperaturabhängig, da Stoffwechselprozesse in allen Lebewesen charakteristische Toleranzbereiche hinsichtlich des umgebenden (temperaturabhängigen) hydrochemischen Milieus als auch unmittelbar bezüglich der Temperatur haben. Bei Temperaturen unter- oder

oberhalb dieses Toleranzbereiches kommt die Stoffwechselaktivität zum Erliegen, der Organismus fällt in einen Ruhezustand oder stirbt. Sehr hohe oder sehr niedrigere Temperaturen können somit das Behälternahfeld sterilisieren oder zumindest mikrobielle Einflüsse hemmen. Andererseits können hohe Temperaturen korrosionsfördernd wirken. Bei der Verwendung von Tonen als *buffer*-Materialien oder Wirtsgestein sind thermochemische Umwandlungen der Tonminerale zu berücksichtigen, die negative Auswirkungen auf deren mechanische oder Barriereeigenschaften haben können. Druck und Volumen eingeschlossener Gasmengen sind temperaturabhängig, so dass hohe Temperaturen durch den steigenden Gasdruck zur Bildung von Wegsamkeiten führen können.

Zum Schutz der sicherheitsrelevanten Eigenschaften der geotechnischen und geologischen Barrieren wurden in den verschiedenen Endlagerprogrammen Anforderungen an die maximal zu erreichenden Temperaturen formuliert. Da die höchste Temperatur dieser Barrieren direkt an der Grenzfläche zwischen dem Endlagergebäude und den daran anschließenden Barrieren auftritt, wird sie allgemein auf die Gebäudeoberfläche bezogen.

Im Endlagersystem wird das Temperaturfeld durch zwei Wärmeströme bestimmt, die sich überlagern: Zum einen den Wärmestrom aus dem Erdmantel zur Oberfläche (Geogradient), der das lokale Temperaturfeld des (ungestörten) Wirtsgesteins (die Umgebungstemperatur des Endlagers, siehe Tabelle 5) bestimmt. Zum anderen die durch die Abführung der Wärmeleistung eingelagerter Endlagergebäude in das Wirtsgestein abgegebene Wärme. Im Endlager lässt sich das Temperaturfeld daher als Überlagerung des Temperaturfeldes der eingelagerten Endlagergebäude und des Wirtsgesteins betrachten. Um den Anforderungen an einzuhaltende Temperaturbereiche (siehe Tabelle 10 und Tabelle 11) zu genügen, kann durch die Begrenzung der Wärmeleistung der Endlagergebäude und durch die Anordnung der Endlagergebäude im Endlager das sich ergebende Temperaturfeld durch entsprechende Planungen eingestellt werden. Dementsprechend ergeben sich die in Tabelle 5 zusammengestellten Werte für die maximal zulässige Wärmeleistung des Inventars je Gebäude nicht als eine a-priori-Einwirkung, sondern als eine konzeptabhängige Auslegungsgröße für die Einhaltung der in Tabelle 10 und Tabelle 11 gegebenen Anforderungen unter den im jeweiligen Endlagerkonzept gegebenen Bedingungen.

Während viele dieser Temperaturen in situ gemessen worden sind, in Untergrundlaboren oder im Zuge der Erkundungsarbeiten, ist beispielsweise die Wirtsgesteinstemperatur für das koreanische Referenzkonzept KRS-1 auf eine solche Art extrapoliert worden; hier wurden eine konstante Oberflächentemperatur von 20°C und ein Gradient von 30K/km angenommen [15]. In der deutschen FuE-Studie KONEKD wird unter ähnlichen Annahmen eine Temperatur von 26,5°C in 600 m Tiefe veranschlagt [3, 32]. Ein Vergleich mit den in Skandinavien und Kanada gemessenen bzw. abgeschätzten Werten legt nahe, dass dies, auch unter Berücksichtigung der großen Entfernung zwischen den jeweiligen potenziellen Wirtsgesteinsformationen, nur eine Näherung darstellt, die mit Fortschreiten des Programmes aktualisiert werden wird.

Thermische Einwirkungen					
Wirtsgestein	Land	Teufe [m]	Temperatur [°C]	Wärmeleistung [W]	Quelle
			ungestörtes Wirtsgestein	je Gebinde	
Kristallin	Schweden	500	10,5	< 1.700	[55, 11, 56]
	Finnland	420	10...12	≤ 1.370 (WWER)	[12, 57]
				≤ 1.700 (SWR)	
				≤ 1.830 (DWR)	
	Rep. Korea	500	35	≤ 760 (CANDU)	[58, 15]
				≤ 1.540 (DWR)	
	Tschechien		10	<i>ausstehend</i>	[42]
Sediment	Kanada		11	≤ 169 (CANDU)	[50]
Tonstein	Belgien	240		≤ 615	[59]
		223	16		[44]
	Frankreich	525	23	≤ 540 (Annahme CSD-V)	[45, 47]
				≤ 38,8 (Annahme CSD-C)	
	Schweiz	450...850	30...45	≤ 1.500	[23]
		650	38		
Steinsalz	Deutschland	840 ^G	37,97 ^G	< 7.900 ^G	[30]
Steinsalz/ Tonstein/ Kristallin		<i>ausstehend</i>	<i>ausstehend</i>	<i>ausstehend</i>	[5]
verschiedene	Großbritannien	<i>ausstehend</i>	<i>ausstehend</i>	≤ 860 (AGR)	[60]
				≤ 1.000 (HLW)	
				≤ 1.160 (DWR)	

Tabelle 5: Thermische Einwirkungen in den verschiedenen Behälter- bzw. Endlagerkonzepten.
G – Werte aus der Vorläufigen Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben
(Temperaturkriterium im Salz vor 2013: 200°C).

Auch für Deutschland liegen Daten zu den Wirtsgesteinstemperaturen in einer Referenzteufe von 1.000 m vor (siehe Abbildung 12). Diese zeigen, dass die Temperatur in den potenziellen Wirtsgesteinsformationen regional stark variieren kann; die Referenzwerte reichen von 20°C bis über 80°C. In Nord- und Süddeutschland dominieren Temperaturbereiche zwischen 40°C und 60°C, mit Maxima um 80°C im Oberrheingraben. Zwischen Eifel und Erzgebirge, und um den Bayerischen Wald liegen die Referenztemperaturen unterhalb 40°C [61].

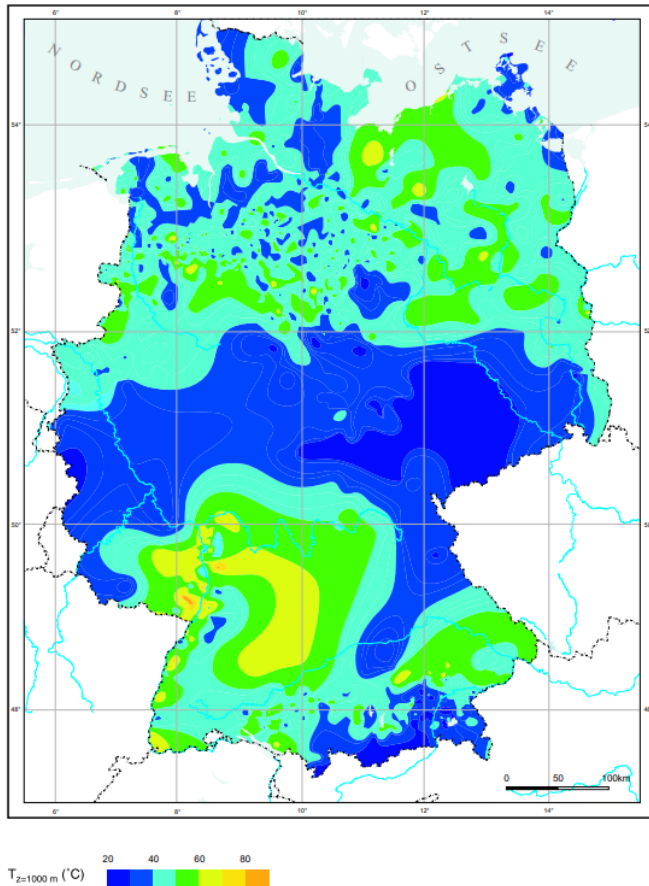


Abbildung 12:
Gesteinstemperatur in einer Tiefe von 1.000 m in Deutschland [61].

Allgemein wird daher eine niedrige Temperatur des Wirtsgesteins als vorteilhaft erachtet [36].

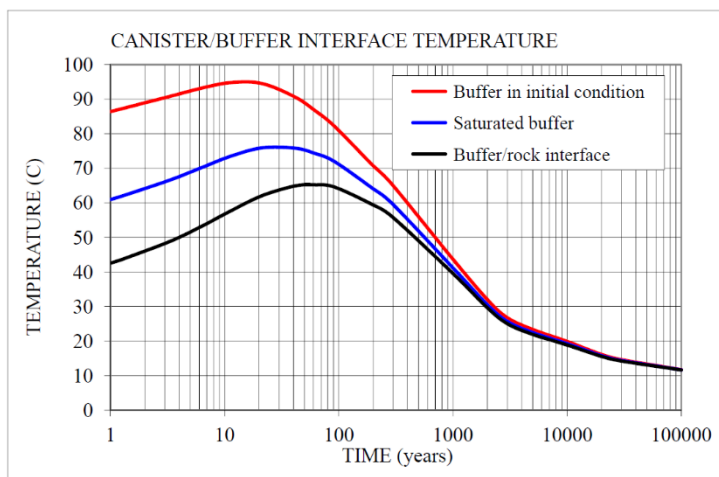


Abbildung 13:
Berechnete Temperaturentwicklung an einem finnischen KBS-3-Behälter [12]. Gezeigt sind die Entwicklung für einen ungesättigten buffer (rot), einen gesättigten buffer (blau) und die Grenze zwischen buffer und Wirtsgestein (schwarz). Im Laufe der Sättigung des buffers wird die Entwicklung nach ≈ 100 a von der roten auf die blaue Kurve übergehen.

thermophysikalischen Eigenschaften des Behälternaufbaues. Das Eindringen von Wasser z. B.

Die Bandbreite dieser Temperaturbereiche zeigt, dass Berechnungen mit konstanten Temperaturgradienten nur regional erfolgen können. Darüber hinaus können sie aufgrund der starken Abhängigkeit des Gradienten von den Gesteinseigenschaften – die Wärmeleitfähigkeit wird u. a. von Dichte, Zusammensetzung und Wassergehalt des Gesteins bestimmt – auch nur in bestimmten Teufenlagen als konstant angesehen werden. Eine Bestimmung bei der Erkundung vor Ort ist daher notwendig.

Zwar können die thermischen Einwirkungen auf das Endlagersystem durch das Endlagerkonzept und die geotechnischen und technischen Barrieren mitbeeinflusst werden, sie bilden aber aufgrund der Anforderungen an zum Schutz der technischen, geotechnischen und geologischen Barrieren einzuhalten Anforderungen (siehe Tabelle 10 und Tabelle 11) aber auch einen begrenzenden Rahmen für die Wärmeleistung der Endlagergebäude und damit für die Behälterauslegung.

Bei der Betrachtung der thermischen Einwirkungen im Behälternaufbau und der entsprechenden Auslegung der Behälter ist zu beachten, dass die maximale Temperatur an der Gebindeoberfläche nicht zum Zeitpunkt der Einlagerung vorliegt, sondern sich mit der Einstellung eines thermischen Gleichgewichtes mit der Behälterumgebung innerhalb einer längeren Zeit, meist mehrere Jahre oder Jahrzehnte, bildet, ehe sie dann mit der stetig abklingenden Wärmeleistung der Gebinde wieder sinkt. Die Dauer dieser Thermalisierungsphase ist abhängig von den in Tabelle 5 gegebenen Faktoren, aber insbesondere auch von den

durch die Saturierung von eingebrachten geotechnischen Barrieren mit wässrigen Lösungen, kann diese Eigenschaften verändern (vergleiche Abbildung 13).

3.1.3 Radiologische Einwirkungen

Radiologische Einwirkungen resultieren aus dem Strahlungsfeld des Inventars und umfassen insbesondere mögliche radiolytische Prozesse im Gebinde oder im Behälternahfeld. Sie lassen sich durch die Aktivität des Inventars und die Abschirmwirkung der Endlagergebinde beschreiben. Wesentlicher Parameter ist die Dosis, die beschreibt wie viel Energie durch Strahlung in Materie deponiert wurde. Diese Energie kann durch Radiolyse zur Gasproduktion und zur Zersetzung organischer Stoffe beitragen oder chemische Gleichgewichte verändern und so korrosionsfördernd oder -initiiierend wirken. Die Ortsdosisleistung an der Gebindeoberfläche zum Zeitpunkt der Einlagerung ist für die hier betrachteten Behälterkonzepte in Tabelle 6 zusammengestellt. Aus dieser Darstellung wird ersichtlich, dass unter den hier betrachteten Behälterkonzepten lediglich der für die Endlagerung im Wirtsgestein Steinsalz in Deutschland entwickelte POLLUX®-Behälter als „abgeschirmt“ gelten kann, da er explizit auch für den innerbetrieblichen Transport entwickelt und optimiert worden ist [62].

Gleichermaßen auf den sicheren und bestimmungsgemäßen Transport ausgelegt sind die in dieser Zusammenstellung von Konzepten für Endlagerbehälter nicht aufgeführten Transport- und Lagerbehälter (TLB), die somit ebenfalls als (für den Transport ausreichend) abgeschirmte Behälterkonzepte gelten.

Radiologische Einwirkungen – ODL an der Gebindeoberfläche					
Land	Behälterwand (innen→außen)	Inventar [t _{SM}]	ODL [Gy/h]	Bemerkungen	Quelle
Schweden	Gusseisen 50 mm Kupfer 50 mm	2,1 (SWR) 1,86 (DWR)	≤ 0,055	berechnet	[11, 55]
Finnland	Gusseisen 16,2 mm (WWER) Gusseisen 30 mm (SWR) Gusseisen 100 mm (DWR) Kupfer 50 mm (alle)	1,4 (WWER) 2,1 (DWR) 2,2 (SWR)	≤ 0,22	abdeckender Fall SWR-BE, berechnet (MCNP5)	[12]
Rep. Korea	Gusseisen 50 mm Kupfer 50 mm	1,84 (Ø)	0,01...0,1	berechnet (MCNP4)	[15]
Kanada	Stahl 46,2 mm (Mantel) Stahl 30 mm (Endstücke) Kupfer 3 mm (alle) Bentonit 218...425 mm (buffer box)	0,924 (CANDU)	≤ 0,135*	Abstand 20 cm; 10 a Abklingzeit	[50, 63]
			≤ 0,062*	Abstand 20 cm; 30 a Abklingzeit	
			≤ 4*	Behälter o. Box; Oberfläche; Abklingzeit 10 a	
			≤ 0,5*	Behälter o. Box; Oberfläche; Abklingzeit 30 a	
Belgien	50 mm Edelstahl 660 mm Beton		< 25	Abdeckender Fall einer VHLW-Kokille	[44, 64]
Frankreich	55...65 mm Stahl	1 Kokille	< 30	gemessen 2007	[47]
			290	CSD-V nach Spezifikation 300 AQ 16 (C1)	
			560	CSD-V nach Spezifikation 300 AQ 60 (C5)	
	110 mm Stahl	4 BE	0,74	UOX-BE	
Schweiz	140 mm Stahl	2 Kokillen 4 DWR-BE 9 SWR-BE	< 0,035	berechnet	[23, 65]
Deutschland	160 mm Stahl 274 mm Gusseisen	≤ 5,42	< 0,01	für Transport ausgelegt	[66]
	40 mm Stahl (BSK-3)	≈1,63	≤ 100	berechnet	

Tabelle 6: Radiologische Einwirkungen auf die Endlagerbehälter und deren Umgebung.

* - Berechnungen mit MCNP; die Werte wurden automatisch in Sv/h konvertiert und dementsprechend angegeben; dominanter Anteil ist das γ-Feld [63].

3.1.4 Chemische Einwirkungen

Die Gebinde unterliegen im Endlagersystem chemischen Einwirkungen durch das sie umgebende hydrochemische Milieu und darin vorhandene Mikroorganismen. Diese chemischen Einwirkungen sind daher vor allem durch die gelöst vorliegenden Ionen und – als chemisch-biologische Einwirkungen – darin lebensfähige Mikroben und deren aktive Stoffwechselprozesse charakterisiert. Beide Einwirkungen sind vom lokalen hydrochemischen Milieu und der Temperatur im Behälternahefeld abhängig und müssen im Rahmen der Erkundung des Endlagerstandortes erfasst werden. In Tabelle 7 ist das hydrochemische Milieu verschiedener Erkundungsstandorte exemplarisch wiedergegeben.

Land		Schweden	Kanada	Schweiz	Deutschland		
Gestein		Granit		Opalinuston	Steinsalz (<i>generisch</i>)		
Ort		Forsmark	<i>generisch</i>	Benken	<i>synth. quinäre Lösung</i>	Gorleben	
Teufe		400 m	500 m	650 m		840 m	
Quelle		[67]	[50]	[68]	<i>berechnet nach Angaben in [69]</i>		
θ[°C] [Referenz]		15	11	25	≥70	25	22
pH		7,67	7,1	7,24	5,5	5,7	5,9
Eh [V]		-0,224	-0,194	-0,167			
logpCO ₂				-2,2			
c [mol/l]	CO ₃ (tot)	1,1·10 ⁻³		2,7·10 ⁻³			
	HCO ₃		8,20·10 ⁻⁴				
	Na	1,25·10 ⁻¹	8,26·10 ⁻²	1,69·10 ⁻¹	3,14·10 ⁻¹	8,28·10 ⁻²	5,33
	K	2,6·10 ⁻³	3,85·10 ⁻⁴	5,65·10 ⁻³	8,05·10 ⁻¹	2,22·10 ⁻²	3,25·10 ⁻²
	Mg	1,4·10 ⁻²	2,47·10 ⁻³	7,48·10 ⁻³	3,72	5,40	1,62·10 ⁻²
	Ca	8,3·10 ⁻³	5,54·10 ⁻²	1,05·10 ⁻²		3,16·10 ⁻¹	1,86·10 ⁻²
	Sr		2,85·10 ⁻⁴	3,04·10 ⁻⁴			
	S(VI)	7,1·10 ⁻³	1,29·10 ⁻²	2,40·10 ⁻²	1,48·10 ⁻¹	5,56·10 ⁻⁴	5,11·10 ⁻²
	S ²⁻	7·10 ⁻⁶		1,41·10 ⁻¹¹			
	F		1,05·10 ⁻⁴	1,67·10 ⁻⁴			
	Cl	1,54·10 ⁻¹	1,72·10 ⁻¹	1,60·10 ⁻¹	8,27	11,54	5,33
	Br			2,40·10 ⁻⁴			
	Fe ²⁺			4,33·10 ⁻⁵			
	Fe (tot)	4·10 ⁻⁷	1,43·10 ⁻⁴				
	Mn			2,42·10 ⁻⁵			
	NO ₃ ²⁻		1,61·10 ⁻⁵				
	PO ₄ ³⁻		1,05·10 ⁻⁵				
	Si	2·10 ⁻⁴	1,79·10 ⁻⁴	1,78·10 ⁻⁴			

Tabelle 7: Hydrochemisches Milieu in verschiedenen Wirtsgesteinen

Es zeigt sich, dass das zu erwartende hydrochemische Milieu in kristallinen Wirtsgesteinen und im Wirtsgestein Tonstein einander recht ähnlich sind. Hierbei muss jedoch beachtet werden, dass aufgrund der Wasserdurchlässigkeit kristalliner Gesteine deren hydrochemisches Milieu über geologische Zeiträume nicht stabil bleiben muss; tatsächlich werden in den Betrachtungen zum hydrochemischen Milieu der Wirtsgesteine in Schweden und Finnland mehrere Reservoirs angenommen – z. B. alte Schmelzwasservorkommen, Meerwasser oder Niederschlagswässer – die sich im Bereich des Endlagers mischen, wobei sich die Zusammensetzung und die Mischverhältnisse aufgrund z. B. klimatischer Veränderungen (Warmphasen, Eiszeiten) verändern können [67, 53]. Im Steinsalz ist davon auszugehen, dass die Lösungen in vorhandenen Laugenkammern aufgrund des sie umgebenden löslichen Materials gesättigte Lösungen sind, deren Ionenkonzentrationen sich aus den in der geologischen Umgebung vorhandenen Stoffen und den temperaturabhängigen Löslichkeitsgrenzen ergeben.

3.1.4.1 Korrosionsraten

Wesentliche Folge chemischer und biologisch-chemischer Prozesse im Behälternahfeld ist die Korrosion des Behältermaterials bis zur eventuell möglichen vollständigen chemischen Umwandlung der im Endlagersystem vorhandenen metallischen Komponenten. Limitierende Faktoren können hier vorhandene korrosions- oder stoffwechselrelevante Stoffe wie z. B. Sauerstoff oder Sulfate sein, oder auch die zur Aufrechterhaltung dieser Prozesse notwendige Temperatur. Ein möglicher Integritätsverlust durch Korrosionsprozesse führt direkt zum Behälterversagen hinsichtlich der Behälterfunktion des sicheren Einschlusses. Unter der Berücksichtigung der Entwicklung des hydrochemischen Milieus im Behälternahfeld über lange Zeiträume hinweg müssen die Endlagergebinde daher dergestalt konzipiert werden, dass die an sie gestellten Anforderungen hinsichtlich einer Mindestdauer eines sicheren Einschlusses des Inventars (Mindeststandzeit bzw. Lebensdauer, siehe Tabelle 9) erfüllt werden.

3.2 Vergleichende Darstellung der Anforderungen an die Behälterkonzepte

Die Anforderungen an die Endlagergebinde bestimmen den Umfang und die quantitative Auslegung der Behälterfunktionen. Sie stellen die zu erreichenden Kriterien für das Verhalten der Endlagergebinde als Teil des Endlagersystems dar, an dem die Behälter in Sicherheitsnachweisen gemessen werden. Die für die Endlagerung Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle in Deutschland relevanten generischen Behälteranforderungen sind in Kapitel 2 des Berichtes zum Arbeitspaket 3 [4] umfassend zusammengestellt. Eine Aufstellung wesentlicher schutzzielrelevanter Anforderungen für internationale Konzepte findet sich in Kapitel 3.5 des Berichtes zum Arbeitspaket 1 [2].

Entsprechend den im Arbeitspaket 3 hergeleiteten grundlegenden Behälteranforderungen werden hier folgende Anforderungen an die verschiedenen Endlagergebinde und Behälterkonzepte miteinander verglichen:

- Kritikalitätsausschluss. Die für den Ausschluss von selbsterhaltenden nuklearen Kettenreaktionen im Endlagergebinde und im Endlagergebinde zu erfüllenden Anforderungen, quantifiziert durch den effektiven Neutronenmultiplikationsfaktor.
- Sicherer Einschluss. Der sichere Einschluss des radioaktiven Inventars, quantifiziert durch die Behälterlebensdauer, jenen Zeitraum, über den die jeweiligen Endlagergebinde diesen sicheren Einschluss unter Berücksichtigung der zu erwartenden Einwirkungen gewährleisten müssen.
- Temperaturbegrenzung. Quantifiziert durch die zum Schutz der technischen, geotechnischen und/oder geologischen Barrieren einzuhaltenden Grenztemperaturen in der Abfallmatrix und an der Gebindeoberfläche.
- Radiologische Anforderungen (zum Schutz des Barrierensystems). Quantifiziert durch die zum Schutz der geotechnischen oder geologischen Barrieren definierten maximal zulässigen Ortsdosisleistungen an der Gebindeoberfläche.
- Anforderungen an die Transportierbarkeit der Gebinde. Quantifiziert durch die zum Schutz des eingesetzten Personals für den Transport definierten Grenzwerte für Temperatur und Ortsdosisleistung an der Gebindeoberfläche.
- Anforderungen an die Handhabbarkeit. Quantifiziert durch die zum Schutz des eingesetzten Personals bei der Handhabung der Gebinde definierten Grenzwerte für Temperatur und Ortsdosisleistung an der Gebindeoberfläche.

- Anforderungen an Rückholbarkeit und Bergbarkeit. Anforderungen an die Gewährleistung einer möglichen späteren Rückholbarkeit und/oder Bergbarkeit der Gebinde aus dem Endlager.

Ein Vergleich dieser Anforderungen unter Berücksichtigung der zu erwartenden Einwirkungen ermöglicht im Rahmen dieses Arbeitspaketes dann die Gegenüberstellung der betrachteten Behälterkonzepte.

3.2.1 Anforderungen an Unterkritikalität

Eine zentrale Anforderung an das Endlagersystem und an die Endlagergebinde ist der Ausschluss einer kritischen Anordnung, die selbsterhaltende nukleare Kettenreaktionen ermöglichen kann. Eine solche Kritikalität würde zu einem starken Anstieg der Wärmeleistung und der Ortsdosisleistung im Endlagerbereich führen, was zu einer Schädigung oder beschleunigten Degradation der Barrieren des Endlagersystems führen kann.

Als wesentlicher Kennwert für die Möglichkeit einer kritischen Anordnung wird der effektive Neutronenmultiplikationsfaktor k_{eff} eines Systems verwendet. Für eine Unterkritikalität des Systems muss $k_{\text{eff}} < 1$ gewährleistet sein. Zum sicheren Nachweis des Kritikalitätsausschlusses wird daher eine Sicherheitsmarge unterhalb des Grenzwertes $k_{\text{eff}} + \Delta k = 1$ als Kriterium angesetzt, wobei Δk die Summe aller (z. B. systematischen oder probabilistischen) Unsicherheiten in der Bestimmung von k_{eff} beschreibt. Diese Sicherheitsmarge beträgt üblich 5 % inklusive aller Unsicherheiten (also $k_{\text{eff}} + \Delta k < 0,95$). Das Kriterium für den Nachweis einer dauerhaften Unterkritikalität ist für die verschiedenen betrachteten Behälterkonzepte in Tabelle 8 zusammengetragen.

In Deutschland gilt die Sicherheitsmarge von 5 % bis zu 500 Jahre nach dem geplanten Verschluss des Endlagers. Nach diesem Zeitraum, der den Zeitraum für die Gewährleistung einer möglichen Bergbarkeit der Endlagergebinde umfasst, wird eine geringere Sicherheitsmarge von 2 % angesetzt [70].

Verschiedene Faktoren, wie Menge und Konzentration spaltbarer Isotope, Vorhandensein moderierender (v. a. Wasserstoff, Kohlenstoff) oder reflektierender Materialien und die geometrische Anordnung dieser Stoffe sowie die Temperatur des Systems beeinflussen das Kritikalitätsverhalten eines Systems. Für die Gewährleistung einer Unterkritikalität in den Endlagergebinden bzw. im Endlagersystem muss daher eine Analyse des Neutronenmultiplikationsfaktors unter ausreichend konservativen Annahmen durchgeführt werden, die sämtliche relevanten Faktoren einbezieht. Insbesondere kann ein Behälterversagen zu einer Freisetzung spaltbarer Nuklide in das Behälternahfeld führen, wo vor dem Hintergrund des geochemischen Milieus mögliche Anreicherungsprozesse untersucht werden müssen.

Das Kriterium für den Nachweis der Unterkritikalität ist international angeglichen. Dabei sind einige Ausnahmen, in denen für bestimmte Annahmen ein höherer Wert von $k_{\text{eff}} < 0,98$ ausreicht, durch den Nachweis von $k_{\text{eff}} < 0,95$ abgedeckt. Für Kanada wurde aufgrund der Verwendung von unangereichertem CANDU-Brennstoff mit (natürlich nur in vernachlässigbaren Konzentrationen auftretendem) schwerem Wasser als Moderator eine inhärente Unterkritikalität des Endlagersystems unter allen getroffenen Annahmen festgestellt; in sämtlichen Fällen lag $k_{\text{eff}} < 0,70$ [71].

Für die Langzeitsicherheit muss unterschieden werden zwischen Unterkritikalität im Behälter und Unterkritikalität im Endlagersystem. Während die Gewährleistung der Unterkritikalität eine zentrale Anforderung an die Endlagergebinde darstellt, schließt die Gewährleistung der Unterkritikalität im Endlagersystem auch jene Zeiträume ein, in denen eine Barrierefunktion des Behälters möglicherweise nicht mehr gegeben ist. Eine exemplarische Darstellung für das Kritikalitätsverhalten von Brennelementen *im Behälter* für bis zu 100.000 Jahre ist in Abbildung 14 gegeben. Der Kurvenverlauf erklärt sich aus dem Zerfall von Pu-241 (spaltbar) zu Am-241 (Neutronenabsorber) in den ersten 100 Jahren (negativer Verlauf) und dem anschließend dominierenden Zerfall von Neutronenabsorbern wie Pu-238, Pu-240, Am-241 und Am-243. Ab ca. 25.000 Jahren wird das System durch den fortschreitenden Zerfall von Pu-239 wieder zunehmend unterkritisch [72].

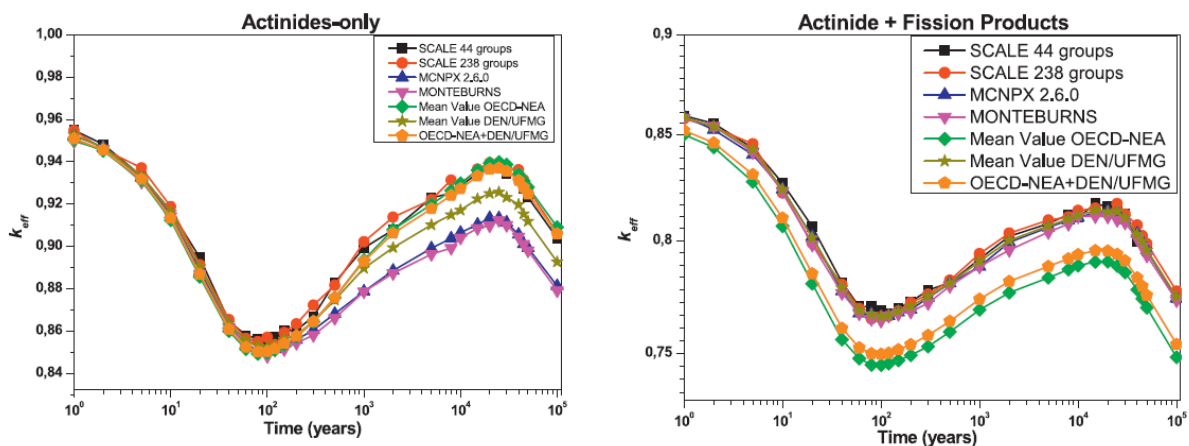


Abbildung 14: Benchmark-Berechnungen des Kritikalitätsverhaltens exemplarischer bestrahlter Kernbrennstoffe im Behälter über 100.000 Jahre [146]. Auffällig sind das Minimum ca. 100 Jahre nach Entladung und ein weiteres Maximum nach ca. 20.000 Jahren, das abhängig von den betrachteten Brennstoffen den Anfangswert überschreiten kann [147].

Hinsichtlich einer möglichen Aufkonzentration spaltbarer Isotope nach einem Behälterversagen wird für die generischen britischen Behälterkonzepte prognostiziert, dass in kristallinen Wirtsgesteinen vor Allem eingelagerte HEU-Abfälle, also, auf das deutsche Inventar übertragen, entsprechende Brennstäbe oder Brennelemente aus Forschungsreaktoren, zu betrachten sind. In Tonformationen kann es aufgrund des früheren Behälterversagens zu einer höheren Diffusion von Uranisotopen in die Behälterumgebung kommen, wo es zu Aufkonzentrationen kommen könnte. In als trocken angenommenen Salzformationen wird mangels wässriger Lösungen keine wesentliche Auflösung der Gebinde und kein diffusives Austreten spaltbarer Isotope angenommen; die Kritikalitätssicherheit ist hier durch die Auslegung der Gebinde auch langfristig gegeben [73].

Anforderung nach Unterkritikalität: <i>„Um eine sich selbst tragende Kettenreaktion auszuschließen zu können, muss der berechnete Neutronenmultiplikationsfaktor kleiner sein als (1) 0,95 im Zeitraum von 500 Jahren nach dem geplanten Verschluss des Endlagers und (2) 0,98 während des übrigen Bewertungszeitraumes.“</i> § 8 Abs. 2 EndlSiAnfV [70]				
Land	Behälter	Anforderung	Bemerkung	Quelle
Schweden	KBS-3	$k_{eff} + \sum \Delta k < 0,95$	„Reaktivste glaubhafte Anordnung“ [12]. Annahme einer Flutung des Behälters mit Wasser, optimale Moderation/ Reflektion.	[55, 10, 74]
Finnland			Realisierung durch Anordnung und Mindestabbrand der Brennelemente, und die Materialauslegung des Innenbehälters.	[12, 75]
Rep. Korea	alle			[15]
Tschechien	UOS		$k_{eff} < 0,98$ bei optimaler Neutronenmoderation [76]. In der aktuellen Gesetzgebung wird stattdessen ein „Kritikalitätssicherheitsindex“ angegeben, der sich aus den Massenanteilen spaltbarer Isotope berechnen lässt.	[77]
Kanada	UFC II		durch CANDU-Brennstoff (nicht angereichert) in jedem Fall gegeben.	[78]
Belgien	Supercontainer			[44, 64]
Frankreich	alle		Begrenzung der Massen verschiedener Isotope in den Gebinden	[47]
Schweiz	alle			[23]
Deutschland	alle		Annahme reaktivster Anordnung. $k_{eff} < 0,98$ ab 500 a nach dem Verschluss des Endlagers	[70]
Großbritannien	alle		Begrenzung der Massen von Spaltstoff-Isotopen	[60]
Vereinigte Staaten von Amerika	alle		Annahme unter Unfallbedingungen; für normale Entwicklungen werden unbeschädigte Gebinde angenommen (wasserfrei).	[79]

Tabelle 8: Vergleich der Anforderung nach Unterkritikalität in den Endlagerprogrammen

3.2.2 Anforderungen an den sicheren Einschluss

Der sichere Einschluss des radioaktiven Inventars ist eine primäre Funktion der Endlagergebinde. Charakterisiert wird diese Einschlussfunktion durch den Grad des zu gewährleistenden Einschlusses, qualitativ oder quantitativ durch eine Dichtheitskategorie oder eine zulässige Freisetzungsrateschreibbar. Für den Fall eines sicheren Einschlusses zur Vermeidung einer unzulässigen Freisetzung von Aktivität kann eine vom Endlagerkonzept abhängige Anforderung an den Mindestzeitraum formuliert werden, über den die Einschlussfunktion gewährleistet werden muss. Diese Lebensdauer ist für die verschiedenen betrachteten Behälterkonzepte in Tabelle 9 zusammengestellt.

Bei Behälterkonzepten in kristallinen Wirtsgestein – speziell in **Schweden, Finnland und Kanada**, umfasst die Behälterlebensdauer den gesamten Nachweiszeitraum für das Endlagersystem. Die begrenzte Rückhaltefunktion des für wässrige Lösungen durchlässigen Wirtsgesteines beschränkt die Einschluss- und Rückhaltefunktion in diesen Fällen auf die technischen (Gebinde) und geotechnischen (*buffer*) Barrieren. Für die in Litauen zu erwartenden Bedingungen im Endlagersystem wurde für den dort ebenfalls betrachteten KBS-3-Behälter eine Lebensdauer von 1,6 Millionen Jahren berechnet [6].

Da für Endlagerkonzepte in Tonformationen im Allgemeinen eine einschlusswirksame geologische Barriere vorliegt, wird hier die Freisetzung von Aktivität in die Biosphäre maßgeblich durch die geologische Barriere verhindert, teilweise unter Berücksichtigung einer verzögerten oder verminderten Freisetzung aus der Abfallmatrix. Daher werden in **Belgien, Frankreich** und der **Schweiz** niedrigere Lebensdauern im Bereich weniger Jahrtausende angesetzt.

In **Deutschland** gibt es keine festgesetzte Behälterlebensdauer. Die Endlagergebinde müssen den Einschluss über eine konzeptabhängige Zeitdauer gewährleisten, bis die geologische Barriere (einschlusswirksamer Gebirgsbereich, ewG) die Einschlussfunktion vollumfänglich übernehmen kann. Eine Mindestanforderung ergibt sich aus der Anforderung an eine Bergbarkeit der Endlagergebinde bis zu 500 Jahre nach dem Verschluss des Endlagers; zu diesem Zeitpunkt müssen die Gebinde noch handhabbar sein und eine Freisetzung von Aerosolen verhindern. Ist kein ewG vorhanden, so muss der sichere Einschluss über den gesamten Nachweiszeitraum durch geeignete geotechnische und technische Barrieren gewährleistet werden, also gegebenenfalls durch die Endlagergebinde allein [70].

3.2.2.1 Verschlussstechniken

Für Behälterkonzepte gibt es verschiedene Verschlussstechniken – so werden die in Deutschland verwendeten TLB verschraubt, wie auch der Sekundärdeckel des POLLUX®-Behälters [66]. In sämtlichen betrachteten Behälterkonzepten für die Endlagerung Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle ist als Verschlussstechnik das dichte Verschweißen des Behälterdeckels vorgesehen (beim POLLUX® betrifft dies den Deckel des inneren Stahlbehälters). Diese Verschlussstechnik gewährleistet einen langfristigen sicheren Einschluss des Inventars. Für Schweißtechnik und Schweißnähte sind jeweils gesonderte Anforderungen formuliert (z. B. in [10, 12, 80, 81]).

3.2.3 Thermische Anforderungen

Thermische Anforderungen an die Endlagergebinde ergeben sich aus dem Schutz der weiteren technischen, geotechnischen und geologischen Barrieren des Endlagersystems. Der Schutz dieses Multibarrierensystems, die Vermeidung von die Sicherheitsfunktionen der weiteren Barrieren negativ beeinflussenden Effekten oder auch explizit die Verträglichkeit der Barrieren miteinander sind in allen betrachteten Endlagerprogrammen Schutzziele oder zumindest Optimierungsziele. Für Endlagerbehälter in **Deutschland** ist dieses Ziel als Anforderung an die wesentlichen technischen Barrieren in § 6 Abs. 2 Nr. 3 EndlSiAnfV [70] festgehalten (s. Tabelle 10).

Die maximal zulässigen Temperaturen in der Abfallmatrix sind international überwiegend einheitlich festgelegt, mit Werten um 400 °C für Brennelemente (Minimum: 350 °C für DWR-BE in Belgien, Maximum: 450 °C – basierend auf den Festlegungen für HLW-Gläser – für eine optional denkbare Endlagerung von DWR-BE in Frankreich, siehe Tabelle 10) und um 500 °C für Kokillen mit verglasten Spaltproduktlösungen (mit einer zusätzlichen Sicherheitsmarge von 50 K in Frankreich und 100 K in Belgien, siehe Tabelle 10).

Für die maximal zulässige Temperatur an der Gebindeoberfläche gilt in **Deutschland** nach § 27 Abs. 4 StandAG [5], vorbehaltlich neuen Erkenntnissen, die eine entsprechende Anpassung ermöglichen, eine allgemeine Grenztemperatur von 100 °C. Dieser Wert ist – abgesehen von einer zusätzlichen Sicherheitsmarge von 5 K in der Tschechischen Republik – international abdeckend (siehe Tabelle 11).

3.2.4 Radiologische Anforderungen

Das Strahlungsfeld der Endlagergebinde – ionisierende Strahlung und Neutronen – kann in den die Gebinde umgebenden geotechnischen oder geologischen Barrieren Materialveränderungen verursachen. Strahlenschäden und radiolytische Prozesse im Behälternaufbau können die Barrierefunktionen des Behälternaufbaues beeinträchtigen. Zum Schutz der die Endlagergebinde umgebenden weiteren Barrieren sind in den betrachteten Endlagerprogrammen daher auch Anforderungen an eine Begrenzung der Auswirkungen des Strahlungsfeldes formuliert, die in Tabelle 12 zusammengestellt sind.

Für **Behälterkonzepte mit einer Bentonit-Barriere** liegt der maximal zulässige Wert für die Ortsdosisleistung an der Gebindeoberfläche üblicherweise um 1 Gy/h. Ausnahmen hiervon sind das französische, belgische und kanadische Konzept. Im **französischen Konzept** werden die Gebinde in verrohrten Strecken im Tonstein eingelagert und die geologische Barriere wird als ausreichend massiv angesehen. Die **kanadischen Behälter** werden in einem Supercontainer aus hochkompaktiertem Bentonit verpackt, der das Strahlungsfeld für den Schutz des Verfüllmaterials – ebenfalls Bentonit – weiter abschirmt. Im **belgischen Endlagerkonzept** wurden die Ortsdosisleistungen an der Oberfläche der Supercontainer für exemplarische Beladungen berechnet; im Extremfall einer Beladung mit Kokillen besonders hoher Aktivität (VHLW – *very high-level waste*) wurden Ortsdosisleistungen bis zu 25 Gy/h errechnet (siehe Abschnitt 3.1.3). Auch hier wird die geologische Barriere als ausreichend massiv angesehen.

Für den tschechischen **UOS** konnten im Rahmen der Recherche keine quantifizierten Anforderungen an den Schutz der geotechnischen Barrieren vor den Auswirkungen des Strahlungsfeldes der Gebinde gefunden werden; da es sich hier um eine Adaptation des schwedisch-finnischen Alternativkonzeptes KBS-3H handelt, und die Behälter dementsprechend in Bentonit-Supercontainern eingelagert werden sollen, kann ein dem schwedisch-finnischen Konzept entnommener Grenzwert von 1 Gy/h als wahrscheinlich angesehen werden.

Für **kristalline Wirtsgesteine und Tonstein in Deutschland** gibt es bisher keine festgelegten Grenzwerte für die Strahlungsdosis bzw. für die Ortsdosisleistung an der Gebindeoberfläche. Der nach § 6 Abs. 2 Nr. 1 EndlSiAnfV zu führende Nachweis, „*dass die Sicherheitsfunktionen der wesentlichen technischen und geotechnischen Barrieren [...] nicht erheblich beeinträchtigt werden*“ [70] (siehe auch Tabelle 12) kann zur Festlegung eines solchen Grenzwertes führen. In bisherigen deutschen Studien zu möglichen Endlagerkonzepten in kristallinem oder Tongestein findet sich keine Annahme, die über den aus international vorhandenen Endlagerprogrammen entlehnten Grenzwert von 1 Gy/h hinausgeht. So wird für Kristallingesteine „*unterstellt, dass sich analog zum schwedisch/finnischen Konzept die Oberflächendosisleistung < 1 Gy/h einhalten lässt, so dass die Aussagen bzgl. der Begrenzung der Radiolyse und der Beeinträchtigung des Buffers übernommen werden können*“ [35]. In den verschiedenen deutschen Studien für die Endlagerung Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle in Tonstein [29, 82, 36, 34] gibt es außerhalb des betrieblichen Strahlenschutzes und der Auflagen aus dem Transportrecht keine Aussagen zu einer Begrenzung der Ortsdosisleistung zum Schutz der Barrieren. Dabei ist zu beachten, dass in mehreren dieser Studien eine Variante des für Handhabung und Transport ausreichend abgeschirmten POLLUX®-10-Behälters mit reduziertem Inventar als Endlagerbehälter angenommen wird, an dessen Oberfläche auslegungsbedingt eine Ortsdosisleistung weit unter 1 Gy/h angenommen werden kann.

Für die seit den 1970er-Jahren untersuchte Endlagerung im **Steinsalz in Deutschland** gibt es keinen validierten Grenzwert für die Ortsdosisleistung an der Gebindeoberfläche. Basierend auf einer RSK-Stellungnahme zu Strahlenschäden im Steinsalz, in der eine *Abschätzung von zu explosiver Energiefreisetzung im Steinsalz führenden Strahlungsdosen von „einigen MGy“* gegeben wurde [83], ist im FuE-Vorhaben ISIBEL der Vorschlag eines Grenzwertes von 10.000 Sv/h formuliert worden [66], was bereits 1,68 MGy pro Woche entspräche. Kein vorhandenes Endlagergebäude erreicht an seiner Oberfläche diese Ortsdosisleistung (vergleiche Tabelle 6). Es ist hierbei zu beachten, dass die RSK-Stellungnahme ausdrücklich darauf Bezug nimmt, dass die für diese Abschätzung getroffenen Annahmen nicht den Bedingungen eines Endlagers entsprechen und weitere Forschung notwendig ist, um eine qualifizierte Aussage zu treffen. Weiterhin ist zu beachten, dass beide Quellen mehrere Jahre *vor der Formulierung der Anforderung nach einer Rückholbarkeit bzw. Bergbarkeit der Gebinde* verfasst worden sind, und die RSK-Stellungnahme wie auch der Bericht zum Vorhaben ISIBEL unter Verweis auf die Massivität der geologischen Barriere explizit eine Schädigung des die Gebinde unmittelbar umgebenden Wirtsgesteins (mehrere Dezimeter) in Kauf nehmen [83, 66].

Die Frage nach einem Grenzwert für die Strahlungsdosis und Ortsdosisleistung im Steinsalz ist daher offen. Inwieweit eine Einlagerung von Endlagergebänden mit Ortsdosisleistungen von wesentlich weniger als 10.000 Sv/h an ihrer Oberfläche die geologische Barriere beeinträchtigen kann, muss ebenfalls noch geklärt werden.

Anforderung nach Integrität der Behälter:

- ❖ „Die einzulagernden radioaktiven Abfälle sind im Endlagersystem mit dem Ziel zu konzentrieren und sicher einzuschließen, die darin enthaltenen Radionuklide mindestens im Bewertungszeitraum von der Biosphäre fernzuhalten.“ § 4 Abs. 1 EndlSiAnfV [70]
- ❖ „Der sichere Einschluss muss innerhalb der wesentlichen Barrieren [...] so erfolgen, dass die Radionuklide aus den radioaktiven Abfällen weitestgehend am Ort ihrer ursprünglichen Einlagerung verbleiben.“ § 4 Abs. 4 EndlSiAnfV [70]
- ❖ „Hinsichtlich der Integrität des Systems der wesentlichen technischen und geotechnischen Barrieren ist zu prüfen und darzustellen, dass die Sicherheitsfunktionen der wesentlichen technischen und geotechnischen Barrieren nicht erheblich beeinträchtigt werden durch [...] die im Einlagerungsbereich möglicherweise ablaufenden hydraulischen, chemischen und physikalischen Prozesse, insbesondere Korrosion und Erosion [...]“ § 6 Abs. 2 Nr. 2 EndlSiAnfV [70]
- ❖ „Es sind ausreichende Vorkehrungen dafür zu treffen, dass eine Bergung der eingelagerten Endlagergebinde während der Stilllegung und für einen Zeitraum von 500 Jahren nach dem vorgesehenen Verschluss des Endlagers möglich ist.“ § 14 Abs. 1 EndlSiAnfV [70] „Die Vorkehrungen sind ausreichend, wenn [...] für die zu erwartenden Entwicklungen des Endlagersystems die eingelagerten Endlagergebinde für einen Zeitraum von 500 Jahren nach dem vorgesehenen Verschluss des Endlagers [...] mechanisch so stabil sind, dass eine Handhabung ganzer Endlagergebinde möglich ist, und [...] bei ihrer Handhabung keine Freisetzung von radioaktiven Aerosolen erwarten lassen“ § 14 Abs. 2 Nr. 1 EndlSiAnfV [70]

Geologie	Land	Behälter	Lebensdauer	Bemerkung	Quelle
Kristallin	Schweden	KBS-3	≥ 100.000 a	Gesamter Nachweiszeitraum; mögliche Defekte einzelner Behälter nach 10.000 a werden berücksichtigt.	[9]
	Finnland				[12]
	Rep. Korea	alle	≥ 1.000 a		[17, 16]
	Tschechien	UOS	≥ 10.000 a		[19]
Sediment	Kanada	UFC II	≥ 100.000 a	Zufälliges Versagen von 10 Behältern in 1 Mio. Jahren angenommen	[43, 50]
Tonstein	Belgien	Supercontainer	≥ 1.000 a		[84]
	Frankreich	für Kokillen	≥ 4.000 a	Rückholbarkeit für ≤ 300 a	[45]
		für BE	≥ 10.000 a		
	Schweiz	alle	≥ 1.000 a	Anforderung des ENSI	[24, 80]
			≥ 10.000 a	Zielvorgabe der Nagra	
Kristallin	Deutschland	alle	nicht festgelegt; konzeptabhängig zu bestimmen.	Mindestanforderung an mechanische Integrität für Handhabung und Aerosoldichtheit im Falle einer Bergung ≤ 500 a nach Verschluss des Endlagers	[70]
Tonstein					
Steinsalz			500 a		
Kristallin	Großbritannien	alle	≥ 10.000 a	generische Bedingung	[37]
Tonstein					
Steinsalz					
Tuff	Vereinigte Staaten von Amerika	alle	≥ 1.000 a	Anforderung für Gebinde im Yucca-Mountain-Projekt	[38]

Tabelle 9: Vergleich der Anforderungen nach sicherem Einschluss

Thermische Anforderung an die Behälter –

Begrenzung der Temperatur in der Abfallmatrix:

„Zum Nachweis der Integrität des Systems der wesentlichen technischen [...] Barrieren ist insbesondere zu prüfen und darzustellen, dass die Sicherheitsfunktionen der wesentlichen technischen und geotechnischen Barrieren nicht erheblich beeinträchtigt werden durch [...] die Temperaturentwicklung.“ § 6 Abs. 2 Nr. 3 EndlSiAnfV [70]

Land	Abfallform	Anforderung	Bemerkung	Quelle
Schweden	DWR-BE	k. A.	Die Temperatur an der Behälteroberfläche ist bestimmende Anforderung; Berechnungen ergaben Temperaturen unterhalb kritischer Werte (vgl. Finnland)	[85]
	SWR-BE			
Finnland	DWR-BE	k. A.	Berechnungen ergaben bei den maximalen Wärmeleistungen für die Einhaltung des Temperaturkriteriums an der Gebindeoberfläche eine Maximaltemperatur von $\vartheta \leq 233^{\circ}\text{C}$ [86].	[53]
	SWR-BE			
	WWER-BE			
Rep. Korea	DWR-BE	$\vartheta < 400^{\circ}\text{C}$	$\vartheta < 200^{\circ}\text{C}$ an Luft (vor Versatz); $\vartheta < 380^{\circ}\text{C}$ unter Normalbedingungen; $\vartheta < 570^{\circ}\text{C}$ unter Störfallbedingungen	[87, 88, 15]
	SWR-BE			
	CANDU-BSB		$\vartheta \leq 159^{\circ}\text{C}$ für Zwischenlagerung an Luft	[89]
Tschechien	WWER-BE	k. A.	$\vartheta \leq 330^{\circ}\text{C}$ für die Lagerung russischer WWER-BE in Helium angegeben	[89]
Kanada	CANDU-BSB	k. A.	Berechnungen ergaben $\vartheta \leq 125^{\circ}\text{C}$ im versetzten Behälter.	[89, 90]
Belgien	DWR-BE	$\vartheta \leq 350^{\circ}\text{C}$	Ausschluss von Gasdruckaufbau	[91]
	CSD-V	$\vartheta \leq 400^{\circ}\text{C}$	Schutz der Glasmatrix (Marge 100 K)	
Frankreich	CSD-V	$\vartheta \leq 450^{\circ}\text{C}$	Übergangstemperatur in der Glasphase; Temperaturkriterium für den Normalbetrieb	[47]
		$\vartheta \leq 500^{\circ}\text{C}$	Temperaturkriterium unter Stör- und Unfallbedingungen	
		$\vartheta \leq 50^{\circ}\text{C}$	Temperaturkriterium bei Kontakt der Glasmatrix mit Wasser (nach Versagen des Behälters und der Kokille)	
	DWR-BE	wie CSD-V	Die Endlagerung von Brennelementen wird lediglich als Option betrachtet.	
Schweiz	DWR-BE	$\vartheta < 400^{\circ}\text{C}$		[23]
	SWR-BE			
Deutschland	DWR-BE	$\vartheta < 390^{\circ}\text{C}$	Auslegungstemperaturgrenzwerte. $\vartheta \leq 370^{\circ}\text{C}$ für Zwischenlagerung in Helium	[62, 89]
	SWR-BE	$\vartheta < 410^{\circ}\text{C}$		
	CSD-V/B	$\vartheta < 500^{\circ}\text{C}$		
Großbritannien	AGR-BE		ausgelegt für Betriebstemperaturen um 800°C in einer CO_2 -Atmosphäre	[92]
	DWR-BE	$\vartheta \leq 400^{\circ}\text{C}$		
	HLW-Kokillen	$\vartheta < 500^{\circ}\text{C}$		
Vereinigte Staaten von Amerika	DWR-BE	$\vartheta < 400^{\circ}\text{C}$	$\vartheta < 570^{\circ}\text{C}$ unter Störfall- bzw. Unfallbedingungen	[89, 93]
	SWR-BE			
	HLW-Kokillen		$\vartheta \leq 380^{\circ}\text{C}$ für Zwischenlagerung in Helium	

Tabelle 10: Temperaturgrenzwerte für die Abfallmatrix im Behälter

Thermische Anforderung an die Behälter –

Begrenzung der Temperatur an der Gebindeoberfläche:

„Solange die maximalen physikalisch möglichen Temperaturen in den jeweiligen Wirtsgesteinen aufgrund ausstehender Forschungsarbeiten noch nicht festgelegt worden sind, wird aus Vorsorgegründen von einer Grenztemperatur von 100 Grad Celsius an der Außenfläche der Behälter ausgegangen.“ § 27 Abs. 4 StandAG [5]

Land		Behälter	Anforderung	Bemerkung	Quelle
Kristallin	Schweden	KBS-3	< 100°C	Grenztemperatur zum Schutz des Bentonit- <i>buffers</i>	[11, 55]
	Finnland				[12]
	Kanada	UFC II			[94]
	Rep. Korea	<i>alle</i>			[15, 17, 58]
	Tschechien	UOS	< 95°C		[42, 19]
Tonstein	Belgien	Supercontainer	< 100°C	Grenztemperatur an der Oberfläche des Supercontainers (Grenze zum Bentonit)	[91, 44, 59]
	Frankreich	<i>alle</i>		Grenztemperatur für Einlagerung und thermische Phase	[45]
			< 70°C	Grenztemperatur nach 1.000 Jahren	
	Schweiz	Referenzkonzept	≤ 160°C	Grenztemperatur für massive Bentonitschicht	[23]
Kristallin/Tonstein/Steinsalz	Deutschland	<i>alle</i>	≤ 100°C	vorläufige Grenztemperatur, Begrenzung vorbehaltlich neuerer Erkenntnisse, die eine Erweiterung zulassen	[5]
Steinsalz		POLLUX® (2012)	≤ 200°C	Grenztemperatur zur Zeit der Erstellung der Behälter- und Endlagerkonzepte (vor 2013)	[95]
		BSK-3 (2012)			
Kristallin/Tonstein/Steinsalz	Großbritannien	generisch KBS-3 (Kristallin)	< 100°C	Grenztemperatur für Behälterkonzepte in „hartem“ Gestein (Kristallin und Sediment)	[37]
		generisch Nagra (Ton)	< 125°C	Grenztemperatur für Behälterkonzepte in „weichem“ Gestein (Tonformationen)	
		generisch Nagra (Salz)	< 200°C	Grenztemperatur für Behälterkonzepte in Evaporiten (Steinsalz)	
Tuff	Vereinigte Staaten von Amerika	<i>YMP-Behälter</i>	≤ 200°C	Oberflächentemperatur der Behälter in unverfüllten Strecken	[39]

Tabelle 11: Grenzwerte für die Temperatur an der Gebindeoberfläche

Radiologische Anforderungen an die Behälter zum Schutz des Barrierensystems: <i>„Zum Nachweis der Integrität des Systems der wesentlichen technischen [...] Barrieren ist insbesondere zu prüfen und darzustellen, dass die Sicherheitsfunktionen der wesentlichen technischen und geotechnischen Barrieren nicht erheblich beeinträchtigt werden durch [...] die im Einlagerungsbereich möglicherweise ablaufenden [...] physikalischen Prozesse [...]“ § 6 Abs. 2 Nr. 1 EndlSiAnfV [70]</i>					
Land		anschließende Barriere	ODL [Gy/h]	Bemerkung	Quelle
Kristallin	Schweden	Bentonit- <i>buffer</i>	≤ 1	Schutz des Bentonit- <i>buffer</i> s	[96]
	Finnland				[12]
	Rep. Korea		$< 0,5$		[15]
	Kanada	Bentonit- <i>„buffer box“</i>	≤ 15	Behälter in Supercontainer („ <i>buffer box</i> “)	[13]
Tonstein	Belgien	Supercontainer	≤ 25	Beton-Supercontainer	[44]
	Frankreich	Stahlverrohrung	< 20	Behälter in verrohrter Strecke	[81]
	Schweiz	Bentonit-verfüllung	≤ 1	Schutz des Bentonites	[80]
Steinsalz	Deutschland	Salz/Salzgrus	--	<i>kein validierter Grenzwert vorhanden</i>	
Verschiedene Wirtsgesteine	Großbritannien	Bentonit- <i>buffer</i>	$\leq 0,01$	Begrenzung der ODL an der Gebindeoberfläche aufgrund der Anforderungen an Transportfähigkeit (siehe Abschnitt 3.2.5)	[37]
		Bentonit-Verfüllung			
		Steinsalz			
Tuff	Vereinigte Staaten von Amerika	<i>keine</i>	--	Die Behälter werden in unverfüllten Strecken eingelagert, eine direkt angrenzende Barriere existiert im YMP-Konzept nicht. Eine Begrenzung der Ortsdosisleistung an der Behälteroberfläche ergibt sich aus den Anforderungen an Transport und Handhabbarkeit (Tabelle 13).	[97]

Tabelle 12: Grenzwerte für die Ortsdosisleistung an der Gebindeoberfläche zum Schutz des Barrierensystems

3.2.5 Anforderungen an Transportfähigkeit

Bei der Betrachtung von Anforderungen an die Transportfähigkeit der Endlagerbehälter ist grundsätzlich zu unterscheiden zwischen einer Auslegung der Endlagergebinde für den Transport nur innerhalb des Endlagergeländes (Konditionierung am Endlagerstandort) und einer Auslegung für den Transport auf öffentlichen Verkehrswegen (Konditionierung nicht am Endlagerstandort).

Eine Auslegung für den ausschließlich standortinternen Transport der Endlagergebinde erfordert die Einhaltung der zum Schutz des eingesetzten Personals geltenden Begrenzung von Temperatur und Strahlungsdosis an den zugänglichen Oberflächen des Gebindes (siehe Abschnitt 3.2.6 zu Anforderungen an die Handhabbarkeit).

Für die Transportfähigkeit von Behältern und Gebinden auf öffentlichen Verkehrswegen (Straße und Schiene) ist im Anwendungsbereich des *Europäischen Übereinkommens über die*

internationale Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße (ADR, bzw. RID für die *Beförderung auf der Schiene*) das entsprechende Regelwerk zu beachten (siehe auch Kapitel 2.2 im Bericht zum Arbeitspaket 3 [4]). Die einzigen diesem Übereinkommen nicht beigetretenen Länder in den hier aufgeführten Tabellen sind Kanada, die Republik Korea und die Vereinigten Staaten von Amerika. Neben Einschluss und Unterkritikalität werden die Kontrolle des äußeren Strahlungsfeldes und die Verhinderungen von Schäden durch Hitze als Ziele formuliert (1.7.1.2 ADR). Für die Handhabbarkeit der Behälter gilt die Anforderung, dass die Ortsdosisleistung an keinem Punkt der äußeren Oberfläche 2 mSv/h (bei „*ausschließlicher Verwendung*“ 10 mSv/h) und in einem Abstand von 2 m 0,1 mSv/h überschreiten darf [98]. In **Deutschland** und **Großbritannien** wurde das zweite Kriterium noch verschärft; hier ist entsprechend der Auslegung der Endlagergebinde der Grenzwert von 0,1 mSv/h in 1 m Abstand einzuhalten [99, 62].

Nach dem gleichen Regelwerk soll für die Handhabung der Gebinde (Klassifizierung als B(U)-Versandstück) eine Temperatur an berührbaren Oberflächen 50 °C nicht überschritten werden; als Maximaltemperatur wird 85 °C angegeben [100]. Hinsichtlich dieser Anforderung gibt es ein Konzept, für das in der Literatur keine expliziten Grenzwerte formuliert worden sind, da die berechneten Werte deutlich unter den vergleichbaren Grenzwerten liegen. Für den kanadischen UFC-II-Behälter wurden an Luft maximale Temperaturen von 23 °C an der Behälteroberfläche berechnet, bei einer maximalen Aufheizung im Behälterinneren auf 69 °C. Für einen Behälter in seiner *buffer box* wurden an der Behälteroberfläche 37 °C berechnet; die Temperatur an der Oberfläche der zu handhabenden Supercontainer lag nicht wesentlich über der mit 20 °C angenommenen Temperatur der Umgebungsluft [90].

Für die generischen Anforderungen an britische Endlagergebinde wurde herausgestellt, dass sich aus den Anforderungen an den sicheren Transport eine maximal zulässige Wärmeleistung des Inventars von ca. 2.000 W/Gebinde ergeben. Dies liegt über den errechneten maximal zulässigen Wärmeleistungen für Endlagergebinde in kristallinen Wirtsgesteinen (≤ 1.600 W) und Tonstein (≤ 1.940 W), stellt aber eine begrenzende Anforderungen für Endlagergebinde in Evaporiten wie Steinsalz dar (errechnet ≤ 3.160 W) [37]. Dabei ist hier zu beachten, dass die für diese Berechnungen angesetzten Anforderungen an die Randbedingungen (Grenztemperatur an der Gebindeoberfläche, siehe Tabelle 11) für die Wirtsgesteine Tonstein und Steinsalz nicht mit den derzeit in Deutschland geltenden Anforderungen vergleichbar sind.

3.2.5.1 Maximale Dimensionen der Endlagergebinde

Grundsätzlich müssen die Endlagergebinde dergestalt konzipiert und gefertigt werden, dass ein Transport technisch und logistisch möglich ist. Für den Transport auf Straße, Schiene oder Wasser können sich daher maximale Abmessungen und Massen für die Gebinde ergeben. Am Standort ergeben sich aus dem Transport nach unter Tage, dem Transport unter Tage und der Notwendigkeit, die Gebinde auch bei einer möglichen späteren Rückholung oder Bergung transportieren zu müssen, ebenfalls Beschränkungen der Gebindedimensionen, etwa durch die verwendete Transport- und Einlagerungstechnik und die vorhandenen Streckendurchmesser.

In der generischen Auslegung der britischen Endlagerbehälter werden die maximalen Gebindedimensionen aufgrund der Anforderung an die Transportfähigkeit aus den maximalen Abmessungen transportabler Frachtcontainer nach ISO668 abgeleitet. Daraus ergeben sich maximale äußere Abmessungen von $6,058 \times 2,438 \times 2,591$ m³. Für den Transport auf der Schiene ergeben sich eine maximale Breite von 2,67 m bei einer Höhe von maximal 2,40 m, mit maximalen Gebindelängen von ca. 6 m. Als unter Tage transportable Gebindemasse

werden 80 Mg angenommen; aufgrund der Notwendigkeit für eine Transport-Umverpackung wird eine maximale Gebindemasse von 65 Mg gefordert [37].

Eine Darstellung der Dimensionen der hier betrachteten Endlagerbehälter in Tabelle 14 und der Beispiele für die ebenfalls betrachteten Transport- und Lagerbehälter in Tabelle 19 zeigt eine mögliche Gruppierung der Gebinde in leichte (≤ 10 Mg), mittlere (≤ 35 Mg), schwere (≤ 70 Mg) und überschwere (≥ 100 Mg) Gebinde. Es ist deutlich, dass das POLLUX®-Behälterkonzept (Gebindemasse ≈ 65 Mg), der belgische Supercontainer (Gebindemasse ≈ 70 Mg) und die großen TLB (Leermasse ≤ 110 Mg) hinsichtlich ihrer Masse alle anderen Gebinde abdecken. Als maximale Abmessungen der betrachteten Endlagerbehälterkonzepte werden ein Gebindedurchmesser von 2,1 m (Supercontainer) und eine Gebindelänge von 5,52 m (POLLUX®) festgestellt. Für die mit Ausnahme des POLLUX® nicht ausreichend abgeschirmten Gebinde muss eine entsprechende Transport-Umverpackung (Transfer- oder Abschirmbehälter) berücksichtigt werden. Als Maßgabe für die insgesamt einzuhaltenden Abmessungen können die für den Transport zugelassenen TLB genutzt werden: Die maximalen Abmessungen der hier aufgeführten TLB-Konzepte sind 2,48 m Gebindedurchmesser bei 6,12 m Gebindelänge für den CASTOR® HAW28M [101].

Da für die Einlagerung der sowohl hinsichtlich Gebindemasse als auch hinsichtlich Gebindemaßen abdeckenden sehr schweren TLB eine Machbarkeitsstudie [33] vorliegt, in der die technische Realisierbarkeit der notwendigen Einlagerungstechnik (Konzept einer Schachtförderanlage für Gebinde mit Massen von bis zu 160 Mg) positiv bewertet worden ist, kann davon ausgegangen werden, dass sämtliche hier betrachteten Endlagergebinde zumindest prinzipiell eingelagert werden können. Weitergehende Aussagen zu einer Rückholbarkeit oder Bergbarkeit sowie zu einer Erfüllung der Behälteranforderungen können daraus jedoch nicht hergeleitet werden.

3.2.6 Anforderungen an Handhabbarkeit

Zur Gewährleistung der Handhabbarkeit der Endlagergebinde müssen mehrere Anforderungen gleichzeitig erfüllt sein: Der sichere Einschluss des Inventars zum Schutz des eingesetzten Personals vor einer Kontamination mit (sowie vor einer Inhalation oder Ingestion von) Radionukliden, die mechanische Stabilität des Gebindes gegen die Handhabungslasten, das Vorhandensein von Handhabungshilfen bzw. Lastanschlagpunkten sowie eine Begrenzung der Temperaturen an den zugänglichen Oberflächen der Gebinde, ebenfalls zum Schutz des Personals. Mechanische Integrität – sicherer Einschluss und Stabilität – der Gebinde wurde bereits in den Abschnitten 3.1.1 (Einwirkungen, denen zu widerstehen die Behälterkonzepte ausgelegt worden sind) und 3.2.2 (Lebensdauer) behandelt; die Begrenzung der Oberflächentemperatur ist mit den Anforderungen aus der Transportierbarkeit im Abschnitt 3.2.5 abgedeckt. Die Berücksichtigung von Lastanschlagpunkten und Schaffung von Handhabungshilfen ist implizit Teil der Konzepterstellung und ist im Zusammenhang mit dem Einlagerungs- sowie gegebenenfalls mit einem Rückholungs- und/oder Bergungskonzept zu erarbeiten.

Anforderungen an die Abschirmung des vom Inventar ausgehenden Strahlungsfeldes ergeben sich grundsätzlich auch aus den Anforderungen an Handhabbarkeit und Transportierbarkeit der Gebinde. Darüber hinaus ergeben sich aus den einzuhaltenden regulatorischen Grenzwerten für maximal zulässige Strahlungsdosen aber auch weitere Einschränkungen für die Ortsdosisleistung im Umfeld der Gebinde. Wo sie von den aus den Anforderungen nach Transportfähigkeit resultierenden Grenzwerten (siehe Abschnitt 3.2.5) abweichen, sind diese Werte, zusammen mit den Werten für eine Begrenzung der Oberflächentemperatur, in Tabelle 13 gegeben.

In **Frankreich** und **Kanada** wurde die pro Kalenderjahr maximal zulässige Personendosis wesentlich weiter begrenzt, auf jeweils 5 mSv bzw. 2 mSv [47, 13]. In Schweden und Finnland gelten mindestens die Grenzwerte der ADR; zur Begrenzung von Temperatur und Ortsdosisleistung an der Gebindeoberfläche werden Spezialfahrzeuge sowie Transfer- und Abschirmbehälter verwendet [102]. Da das Endlagerkonzept für ausgediente Brennelemente in der Republik Korea eine direkte Übertragung des KBS-3-Konzeptes darstellt, und auch äußerlich identische Spezialfahrzeuge für Transport und Einlagerung der Gebinde vorgesehen sind [58], kann eine Übertragbarkeit der anzusetzenden Grenzwerte angenommen werden.

Anforderung an die Behälter hinsichtlich Handhabbarkeit:					
„Der Grenzwert der effektiven Dosis beträgt für beruflich exponierte Personen 20 Millisievert im Kalenderjahr. Die zuständige Behörde kann im Einzelfall für ein einzelnes Jahr eine effektive Dosis von 50 Millisievert zulassen, wobei in fünf aufeinander folgenden Jahren insgesamt 100 Millisievert nicht überschritten werden dürfen.“ § 78 Abs. 1 StrSchG [103]					
Land	Behälter	OFT [°C]	DL	Bemerkung	Quelle
Tschechien	UOS	nach ADR (≤ 50 °C, maximal 85 °C)	≤100 µSv/h	Grenzwert für Handhabung	[104]
			≤10 µSv/h	Grenzwert für Handhabung, Abstand 1 m	
Kanada	UFC II	--	2 mSv/a	Jahresdosis für Personal	[13]
Belgien	Supercontainer		≤ 25 µSv/h	ODL in 1 m Abstand	[44]
Frankreich	alle	< 60 °C	≤ 3 µSv/h	ODL in 30 cm Abstand; für alle Arbeitsbereiche	[47]
			≤ 15 µSv/h	ODL in 30 cm Abstand; für Bereiche mit begrenztem Aufenthalt	
			5 mSv/a	Jahresdosis für Personal	
			20 mSv/a	...bei Störfallereignissen	
Schweiz	alle	nach ADR (≤ 50 °C, maximal 85 °C)	20 mSv/a	Jahresdosis für beruflich exponiertes Personal	[105]
			50 mSv/a	maximal zulässige Jahresdosis	
Deutschland	alle		20 mSv/a	Jahresdosis für beruflich exponiertes Personal	[103]
			50 mSv/a	maximal zulässige Jahresdosis	
Großbritannien	alle			20 mSv/a	Jahresdosis für Personal

Tabelle 13: Temperatur- und Dosisleistungsgrenzwerte für die Gebindeoberfläche zum Schutz des eingesetzten Personals. In vielen Ländern werden die Grenztemperaturen nach ADR auch für als Grenztemperaturen für eine Handhabung angesetzt.

3.2.7 Anforderungen an Rückholbarkeit und Bergbarkeit

Für **Deutschland** sind die Anforderungen an eine Rückholbarkeit der Endlagergebäude (§ 13 EndlSiAnfV) und an die Gewährleistung einer Bergbarkeit der Gebinde (§ 14 EndlSiAnfV) in den Sicherheitsanforderungen definiert. Für die Rückholbarkeit – von der Einlagerung bis zum Beginn der Stilllegungsarbeiten – wird dabei angenommen, dass die Sicherheitsanforderungen an die Endlagergebäude gegenüber dem Stand vor der Einlagerung unverändert gelten. Die Ermöglichung einer Bergung der eingelagerten Endlagergebäude – vom Beginn der Stilllegungsarbeiten bis zu einem Zeitpunkt 500 Jahre nach dem geplanten Verschluss des Endlagers – gilt als gewährleistet, wenn ausreichende Vorkehrungen getroffen worden sind, explizit eine individuelle Auffindbarkeit und Identifizierbarkeit der Gebinde, eine ihre Handhabbarkeit gewährleistende mechanische Stabilität und die Verhinderung einer

Freisetzung radioaktiver Aerosole während der Handhabungsvorgänge [70]. Eine Betrachtung der für eine mögliche Bergung anzusetzenden Anforderungen befindet sich im Kapitel 7 des Berichtes zum Arbeitspaket 3 [4].

In **Frankreich** gibt es keine Anforderung an eine spätere Bergbarkeit, aber die Gewährleistung einer Rückholbarkeit der Endlagergebinde ist als Teil des „Prinzips der Umkehrbarkeit“ Bestandteil des Endlagerkonzeptes. Dieses Prinzip soll garantieren, dass bereits getroffene Entscheidungen die Entscheidungsfreiheit späterer Generationen möglichst lang möglichst wenig einschränken. Die Einlagerung beginnt erst nach einem mehrjährigen Pilotbetrieb ohne radioaktive Abfälle. Nach dem Abschluss der Einlagerung im Pilotbereich werden die bis dahin gesammelten Erfahrungen und Erkenntnisse ausgewertet und veröffentlicht. Erst dann erfolgt der Ausbau und schließlich die Einlagerung im Hauptlager. Nach dem Ende des Einlagerungsbetriebs wird das Endlager verschlossen [107]. Der Gesamtzeitraum einer möglichen Rückholung der Gebinde vor dem Verschluss der Gesamtanlage soll bis zu 100 Jahre betragen [108]. Für die Identifizierung der Gebinde werden alle Gebinde mit Kennzeichnungen versehen, die auf den für die Einlagerung und mögliche Rückholung der Gebinde verwendeten Keramik-Gleitkufen an den Gebinden aufgeprägt sind [81].

In der **Schweiz** wird ebenfalls ein „umkehrbares“ Endlagerkonzept verfolgt. Ein Teil des Endlagers wird als Pilotlager betrieben, in dem das Verhalten des Endlagersystems *in situ* und parallel zum Endlagerbetrieb im räumlich getrennten Hauptlager erforscht und überwacht werden soll [109]. Explizit sollen hier auch Rückholverfahren getestet werden können [23]. Nach dem Abschluss der Einlagerung schließt sich eine Beobachtungsphase von 10 Jahren für das Hauptlager bzw. 50 Jahren für das Pilotlager an, bevor das Endlager verschlossen wird. Mit dem Ende der Beobachtungsphase des Pilotlagers 50 Jahre nach dem Abschluss des Einlagerungsbetriebes endet eine mögliche Rückholung der Gebinde [110].

Im **schwedischen** und **finnischen** Konzept ist eine Rückholbarkeit der Endlagergebinde während der Betriebsphase „prinzipiell vorgesehen“ [12, 96]. Dabei ist zu unterscheiden, dass es in Finnland eine regulatorische Anforderung an eine Betrachtung einer „Wieder-Öffnung“ des Endlagers mit einer Kostenabschätzung sowie Gefahrenabschätzung für die Bevölkerung gibt, die mit der Bereitstellung der dafür notwendigen Technologie einhergeht [111]. In Schweden wird die Anforderung nach der Demonstration einer Rückholbarkeit weder gefordert noch verworfen; die Betrachtung wird von der Betreibergesellschaft geführt [112]. Die Rückholung ist als Herausholen bereits versetzter Behälter aus einem mit Bentonit verfüllten Bohrloch demonstriert worden. Dabei war der den Behälter umgebende *buffer* vollständig mit Wasser gesättigt, der den Behälter überdeckende *buffer* noch nicht. Eine Freilegung der Einlagerungsstrecken war nicht Teil des Demonstrationsversuches. Die durch möglicherweise kontaminierte oder aktivierte Bentonit- und Wassermengen sowie die Einhaltung der Grenzwerte für die Ortsdosisleistung an der Gebindeoberfläche während der Rückholung des unzureichend abgeschirmten Behälters wurden ebenfalls nicht adressiert [113]. Eine Bergung der Gebinde nach dem Verschluss des Endlagers ist nicht vorgesehen [114]. In **Kanada** wird eine Rückholung bis zum Verschluss des Endlagers gefordert [63]. Im **britischen** Endlagerprogramm sind derzeit nur generische Studien und Anforderungen formuliert; die Möglichkeit einer Umkehrbarkeit von Maßnahmen sowie einer Rückholbarkeit der Abfälle, abhängig von zu implementierenden Überwachungsmaßnahmen auch nach dem Verschluss der Einlagerungsbereiche, wird betrachtet [115].

3.2.8 Weitere Anforderungen an die Behälterkonzepte

Weitere Anforderungen an die Behälterkonzepte ergeben sich aus der Notwendigkeit, die Behälter in großtechnischem Maßstab zu fertigen, zu prüfen und zu beladen. Der schwedisch-finnische KBS-3-Behälter beispielsweise ist für eine Fertigung von 200 Behältern jährlich

vorgesehen; dementsprechend müssen die Fertigungs- und Prüfinfrastruktur einschließlich der Verfügbarkeit von Material, Logistik und qualifizierten Unterauftragnehmern geschaffen werden [116, 117]. Auch der Übergang von Stahl zu Gusseisen diente neben der Erhöhung der mechanischen Festigkeit auch der Vereinfachung der Fertigungsprozesse [9]. Neben den Tests an Probebehältern wurde auch die Fertigung der Behälter getestet und erprobt [118]. Auch für das Nagra-Referenzkonzept wurden Anforderungen an Inspektionen und Tests, an eine Produktions- und Beladungsrate von 1 bis 2 Behältern täglich, an Materialverfügbarkeit, Herstellungsverfahren und Normenverträglichkeit sowie für eine mögliche Rekonditionierung beschädigter Gebinde formuliert [80].

3.3 Vergleichende Darstellung der Randbedingungen und Auslegungsgrößen der Behälterkonzepte

Anschließend sollen einige wesentliche der in den Behälterkonzepten angenommenen Auslegungsgrößen und Randbedingungen kurz dargestellt und qualitativ diskutiert werden. Eine umfassende Zusammenstellung der Randbedingungen aus Geologie und Betrieb für in Deutschland betrachtete Endlagerkonzepte in den drei potenziellen Wirtsgesteinen findet sich im Bericht zum Arbeitspaket 2 [3]. Weiterführende Informationen zu den Auslegungsgrößen verschiedener Behälterkonzepte finden sich im Kapitel 3.6 des Berichtes zum Arbeitspaket 1 [2].

3.3.1 Maße, Masse und Materialien

Die Massen und Maße der betrachteten Endlagerbehälterkonzepte sind in Tabelle 14 zusammengetragen. Eine Zusammenstellung für einige große Transport- und Lagerbehälter befindet sich an entsprechender Stelle in Tabelle 19 im Abschnitt 4.5.2. Die Gebinde lassen sich nach ihrer Masse grob in leichte Gebinde < 10 Mg (Andra-Konzept für Kokillen, UFC-II und BSK-3), schwere Gebinde ≤ 30 Mg (KBS-3, analog UOS und das Nagra-Referenzkonzept) und überschwere Gebinde (belgischer Supercontainer und POLLUX®) einteilen. Die in Tabelle 19 zusammengestellten TLB-Beispiele sind hier ebenfalls schwere oder überschwere Gebinde. Die maximalen Gebindeabmessungen betragen 5,52 m Länge (POLLUX®) und 2,10 m Durchmesser (belgischer Supercontainer) für Endlagergebilde bzw. 6,12 m Länge und 2,48 m Durchmesser beim TLB CASTOR® HAW28M. Die überschweren TLB der CASTOR®-Familie sind daher hinsichtlich Gebindemasse und Abmessungen abdeckend für alle anderen hier betrachteten Gebinde, wobei hinsichtlich der äußeren Gebindeabmessungen, zu berücksichtigende Umverpackungen, wie z. B. der Supercontainer des UOS, hier nicht aufgeführt sind. Es wird daher angenommen, dass die Ergebnisse des Vorhabens DIREGT [33] abdeckend für alle betrachteten Gebinde sind.

Behälter		Abmessungen [m]		Masse [Mg]		Materialien	Quellen
		Höhe	Durchmesser	leer	beladen		
KBS-3		≤ 5,223	1,05	≤ 27,6		Gusseisen Kupfer	[11, 12]
UFC-II		2,506	0,562		2,7	Stahl Kupfer	[14, 50]
UOS	WWER-440	3,67	≤ 1,05			Stahl/Edelstahl mglw. Kupfer o. Titan	[18, 119]
	WWER-1000	5,05					
Supercontainer		≤ 7	2,1		≤ 70	Stahl Beton	[21, 59, 120]
Andra	HLW	≤ 2,227	≤ 0,635 regulär 0,570		≤ 3,164	Stahl	[107]
	BE	≤ 5,225	≤ 1,165		≤ 35	Gusseisen Stahl	[22]
Nagra	HLW	3,07	0,72	6,276		Gussstahl	[65]
	SWR	5,00	1,05	18,042			
	DWR	5,19	1,05	19,380			
POLLUX®		5,517	1,56 (mit Tragzapfen 1,96)	≈ 57,560	≈ 65	Gusseisen Edelstahl PE Graphit	[66]
BSK-3		4,980	≤ 0,44	≈ 2,866	≈ 5,3	Stahl Edelstahl PE oder Graphit	

Tabelle 14: Massen, Maße und Materialien der verschiedenen betrachteten Behälterkonzepte. Die Zahlenangaben sind entsprechen den in den Quellen gegebenen Genauigkeiten angegeben.

3.3.2 Inventare

Die Endlagerung Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle umfasst drei verschiedenartige Abfallströme, deren Charakteristika sich unterscheiden:

- Die für die Endlagerung vorgesehenen Brennelemente aus Leistungsreaktoren (bzw. die gezogenen Brennstäbe derselben) sind zwischen den verschiedenen betrachteten Ländern mit Ausnahme der CANDU-Reaktoren sämtlich vergleichbar. Für die Endlagerung britischer AGR-Brennelemente ergibt sich neben den kleineren Abmessungen noch das Vorhandensein von Graphit in den Brennelementen, was in Freisetzungs- bzw. Kritikalitätsberechnungen beachtet werden muss. Da die generischen britischen Behältermodelle gleiche Behälter mit verschiedenen Inneneinbauten für die Endlagerung von AGR-Brennelementen, DWR-Brennelementen und HLW-Kokillen vorsehen [37], somit also die in Deutschland anfallenden Abfälle von diesen Studien abgedeckt sind, ist eine Untersuchung abweichender Behälterfunktionen hier nicht notwendig. CANDU-Brennstabbündel haben deutlich kleinere Abmessungen als die in Deutschland anfallenden DWR- und SWR-Brennelemente, und durch den verwendeten Brennstoff – unangereichertes Natururan – niedrigere Abbrandwerte, eine niedrigere Aktivität und eine niedrigere

Zerfallswärmeleistung [13, 121]. Eine genauere Darstellung findet sich in Abschnitt 3.2 des Berichtes zum Arbeitspaket 1 [2].

- Brennelemente und Brennstäbe aus Forschungs-, Versuchs- und Prototypreaktoren unterscheiden sich von den Brennelementen aus Leistungsreaktoren – hier DWR, WWR und SWR – allgemein durch ihre Abmessungen, teilweise ihre chemische Zusammensetzung (z. B. Graphit, Thorium, Aluminium- oder Molybdänverbindungen) und ihre teilweise deutlich höhere Anreicherung. Für das deutsche Inventar an solchen Sonderbrennelementen wurde eine vergleichsweise geringere Wärmeleistung ermittelt. Primär auf der Grundlage geometrischer Anforderungen wurde eine Konzeptstudie für eine mögliche Endlagerung in TLB oder Brennstabkokillen durchgeführt. Allerdings stehen Nachweise zur Gewährleistung der Unterkritikalität in solchen Behälterkonzepten noch aus [31].
- In der Endlagerung von Abfällen aus der Wiederaufarbeitung (AWA) besteht ein Unterschied zwischen den Endlagerprogrammen Deutschlands und der übrigen Länder. Während in Ländern wie Belgien, Frankreich, Großbritannien, der Schweiz und den Vereinigten Staaten von Amerika lediglich die verglasten hochaktiven Spaltproduktlösungen (im Englischen *high-level waste*, HLW, seltener *high-activity waste*, HAW; in Deutschland auch als HAW oder unter der französischen Gebindebezeichnung CSD-V aufgeführt) als Wärme entwickelnde (und, je nach Einteilung der Abfallströme, langlebige bzw. hochaktive) Abfälle endgelagert werden sollen, werden in Deutschland auch die nicht oder vernachlässigbar Wärme entwickelnden Abfälle aus der Wiederaufarbeitung – also verglaste Prozesslösungen (Typ CSD-B) und verpresste Metallstrukturteile (Typ CSD-C) – zusammen mit den Wärme entwickelnden radioaktiven Abfällen endgelagert. Da sich diese Gebinde untereinander nur in Aktivität und Wärmeleistung unterscheiden, sind die verglasten hochaktiven Spaltproduktlösungen hier als abdeckend anzusehen, was für HLW ausgelegte Endlagerbehälter auch auf andere AWA übertragbar macht.

Es zeigt sich, dass es bezüglich der in allen Ländern getrennt zu untersuchenden Abfälle aus Forschungs-, Versuchs- und Prototypreaktoren auch in Deutschland noch weiteren Forschungsbedarf gibt. Unter den weiteren Abfällen aus Leistungsreaktoren sind die CANDU-Brennstabbündel aufgrund ihrer abweichenden Charakteristika wie niedrig abgebrannte Brennstoffe zu behandeln, weisen darüber hinaus aber auch erheblich andere Dimensionen auf.

Für eine Untersuchung der Übertragbarkeit des **UFC-II-Behälters** ist daher davon auszugehen, dass hier das *Konzept eines dünnwandigen Stahlbehälters mit Kupferbeschichtung in einem Bentonit-Supercontainer* und nicht der maßstäbliche UFC-II-Behälter betrachtet wird. Mit der Notwendigkeit, das Konzept für ein verändertes Inventar zu betrachten, ergeben sich allerdings mehrere neu zu bewertende Aspekte:

- Die Kritikalitätssicherheit des Konzeptes – auch bei gesättigtem Bentonit in der *buffer box* – muss neu geprüft werden, da Brennstoffe mit angereichertem Uranoxid (und/oder Mischoxid) nicht – wie CANDU-Brennstoff – inhärent unterkritisch sind.
- Die höhere Aktivität des Inventars bedingt eine Neuevaluation der Ortsdosisleistung an den Oberflächen der Gebinde bzw. der Supercontainer. Davon betroffen sind mögliche Aussagen zur Erfüllung der radiologischen Anforderungen und der Handhabbarkeit bzw. Transportfähigkeit. Eine möglicherweise notwendige Vergrößerung des Supercontainers muss vor dem Hintergrund maximaler Gebindedimensionen für Handhabbarkeit und Einlagerung, und damit auch Rückholbarkeit und Bergbarkeit, betrachtet werden.

- Die höhere Wärmeleistung erfordert eine Neuevaluation der Temperaturen im und am Gebinde bzw. Supercontainer. Eine mögliche Vergrößerung des Supercontainers muss hier analog zu den obigen Überlegungen zu radiologischen Anforderungen hinsichtlich maximalen Gebindedimensionen geprüft werden. Betroffen sind hier neben den thermischen Anforderungen ebenfalls Handhabbarkeit bzw. Transportfähigkeit und, in diesem Zusammenhang, Rückholbarkeit und Bergbarkeit.

Diese Punkte werden in die Untersuchung auf Übertragbarkeit der Behälterkonzepte in Kapitel 4 einbezogen.

3.3.3 Mechanische Auslegung

Die mechanische Auslegung der Endlagergebinde muss die in den jeweiligen Endlagerkonzepten vorherrschenden gebirgsmechanischen Lasten sowie die während Transport, Beladung und Handhabung auftretenden Lasten abdecken.

Für die Behälter in kristallinen Wirtsgesteinen wurde der Auslegungsdruck direkt aus den möglichen Kombinationen von hydrostatischem Druck, *buffer*-Schwelldruck und möglichem Auflagedruck bei Vergletscherung übernommen; dementsprechend ist der **KBS-3-Behälter** auf 45 MPa ausgelegt [96]. Da die Summe der zu erwartenden Lasten im finnischen Endlager nur 44 MPa beträgt, wird dies als abdeckend angesehen [12]. Tests an Probekörpern ergaben kein Behälterversagen (allerdings plastische Deformationen) bis zu 139 MPa mantelseitig [122]. Auch der kanadische **UFC-II** ist, wie schon der Vorgänger (UFC, siehe Abbildung 4, 2. v. r.), auf 45 MPa ausgelegt [14]. Für den aus der Variante für horizontale Lagerung KBS-3H abgeleiteten tschechischen **UOS** liegen aus dem Arbeitspaket 1 keine Auslegungswerte für die mechanische Stabilität vor. Aufgrund der Dimensionierung der Behälter als Kombination massiver Stahlhüllen mit ≥ 120 mm (äußere Hülle, Konzeptlinie mit Korrosionsakzeptanz [18]) bzw. 63 bis 120 mm (innere und äußere Hülle, korrosionsresistente Konzeptlinie [18]) ist davon auszugehen, dass sie *mindestens* in der Größenordnung des KBS-3 (innere Gusseisenhülle nominell 50 mm [10]) liegen.

Aus der Betrachtung von Störfall- und Unfallszenarien in Handhabung und Transport ergeben sich dabei gesonderte Lastfälle, denen die Behälter genügen müssen. Ein Beispiel hierfür ist der deutsche **POLLUX®-Behälter**, dem verkehrsrechtlichen Regelwerk für eine statische Last von 20 MPa (200 m Wassersäule; kein Integritätsverlust nach 8 Stunden) ausgelegt worden ist. Dabei wurde eine Belastung nur des inneren Behälters angenommen. Aus weiteren Lastfällen ergibt sich eine rechnerische Auslegung des äußeren Abschirmbehälters auf 30 MPa tangential bzw. 34 MPa axial (Handhabung) mit maximalen Auslegungswerten bis 171 MPa (ungestörter Bereich; 1-m-Fall auf einen Metaldorn). Der den sicheren Einschluss gewährleistende innere Behälter ist rechnerisch auf maximal auftretende thermische Spannungen von bis zu 77 MPa ausgelegt [62]. Eine detaillierte Beschreibung findet sich in der Darstellung der Entwicklung des POLLUX®-Konzeptes in Kapitel 3.6.4 des AP1-Berichtes [2] sowie zu Unfall- und Störfalllasten im Kapitel 5 des AP2-Berichtes [3].

Die für eine Lagerung in verrohrten Strecken konzipierten **französischen Kategorie-C-Endlagerbehälter** sind bei intakter Verrohrung keiner mechanischen Last ausgesetzt; ein Aufschumpfen der Verrohrung würde eine Rückholung der Gebinde erschweren und muss daher vom Konzept ausgeschlossen werden. Die Gebinde selbst sind auf eine statische Last von 12 MPa ausgelegt [45].

Bei der Konzeptstudie der **Brennstabkokille BSK-3** nimmt ebenfalls die äußere Verrohrung die mechanische Last auf. Trotz einer Referenz für eine Wanddicke der ursprünglichen BSK-3 (für die Einlagerung in nicht verrohrten Bohrlöchern) von 40 mm [66] gibt es keine Informationen zur mechanischen Auslegung des Gebindes. Hinzu kommt, dass bei der

Weiterentwicklung zur rückholbaren Kokille BSK-R die Wandstärke verändert wurde (bodennah 19,5 mm und deckelnah 44,5 mm); die Verrohrung hat nach VSG eine Wandstärke von 5 cm [30].

Für die **belgischen Supercontainer** liegen Informationen über eine Auslegung auf statische mechanische Lasten von 10 MPa vor [91, 123], die die zusammengestellte statische mechanische Last im Endlagersystem von $\leq 12,7$ MPa zuzüglich Gletscherlast nicht notwendigerweise abdecken. Da das Konzept des Supercontainers mehrfach angepasst worden ist (vergleiche Kapitel 3.6.3.1 im AP1-Bericht [2]), wird hier eine ausreichende mechanische Auslegung auf statische mechanische Lasten ≤ 13 MPa angenommen.

Für die **Transport- und Lagerbehälter** gilt, analog zum POLLUX®, die aus dem verkehrsrechtlichen Regelwerk resultierende Auslegung für eine isotropen mechanische Last von 20 MPa über 8 Stunden ohne Dichtheitsverlust (200 m - Tauchversuch). Inwieweit die Integrität über lange Zeiträume, zumindest über den durch eine mögliche Bergung der Gebinde bestimmten Zeitraum bis zu 500 Jahre nach dem Verschluss des Endlagers, gegeben ist, muss noch untersucht werden.

4 Anwendbarkeit und Übertragbarkeit der Behälterkonzepte

Nach der vergleichenden Darstellung der den betrachteten Behälterkonzepten zugrundeliegenden erwarteten Einwirkungen und der an die Endlagergebinde gestellten Anforderungen sollen im Folgenden die Behälterkonzepte, soweit möglich, auf eine Übertragbarkeit und Umsetzbarkeit für die in Deutschland betrachteten potenziellen Wirtsgesteine Steinsalz, Tonstein und Kristallingestein untersucht werden.

Es wird davon ausgegangen, dass die betrachteten Behälterkonzepte die an sie gestellten Anforderungen unter Berücksichtigung der zugrunde gelegten Einwirkungen erfüllen. Daher werden die an die Behälterkonzepte gestellten Anforderungen mit den im Arbeitspaket 3 [4] für Endlagergebinde in Deutschland zusammengestellten Anforderungen verglichen. Dies erfolgt für charakteristische Endlagersysteme in den drei potenziellen Wirtsgesteinen, die entsprechend der Anforderungen an den Schutz der weiteren Barrieren und repräsentativer Einwirkungen beschrieben werden.

Dazu werden zunächst für die drei potenziellen Wirtsgesteine jeweils anhand der in Abschnitt 3.1 zusammengestellten Einwirkungen repräsentative Systemeintrwirkungen (mechanische Last, Wirtsgesteinstemperatur, qualitativ chemisch-biologische Einwirkungen) in einem generischen Endlagersystem zusammengestellt. Seitens der Endlagergebinde kommen die gebindeseitigen Einwirkungen (Wärme- und Strahlungsquelle) hinzu. Diese Einwirkungen werden mit den für jedes Behälterkonzept zugrunde gelegten Einwirkungen verglichen und mögliche Differenzen diskutiert.

Die Anforderungen an die Endlagergebinde werden dabei wie folgt bezeichnet und beschrieben:

- Unterkritikalität (UK): Der Kritikalitätsausschluss muss im Endlagersystem für den gesamten Nachweiszeitraum gewährleistet sein (siehe Tabelle 8). Für die Endlagergebinde kann eine solche Anforderung nur bis zum Verlust der Einschlussfunktion formuliert werden, da die in Behälter und Abfallmatrix eingeschlossenen Radioisotope danach aus dem Gebinde entweichen können. Daher wird hier der Kritikalitätsausschluss während der Behälterstandzeit (Tabelle 9) betrachtet; für die Langzeitentwicklung der Neutronenbilanz im Endlagersystem müssen, abhängig vom Endlagerkonzept, weitere Betrachtungen für die verschiedenen Abfallformen durchgeführt werden [73].
- Sicherer Einschluss (SE): Der sichere Einschluss ergibt sich aus der endlagerkonzeptabhängig zu quantifizierenden Einschlussfunktion der Endlagergebinde. Wesentlich für die Integrität der Endlagergebinde ist deren mechanische Stabilität (siehe Abschnitt 3.3.3) unter den mechanischen Lasten im Endlagersystem (siehe Abschnitt 3.1.1) und die Erhaltung dieser mechanischen Stabilität unter den im Endlagersystem vorherrschenden chemisch-biologischen Einwirkungen (siehe Abschnitt 3.1.4). Zur Charakterisierung dienen hier entsprechend die mechanische Auslegung der Behälterkonzepte (siehe Abschnitt 3.3.3), die anzunehmenden mechanischen Lasten im Endlagersystem (siehe Abschnitt 3.1.1) und die Behälterstandzeiten (siehe Tabelle 9).
- Thermische Anforderungen (TH): Die Anforderungen nach der Begrenzung der Temperaturen an der Gebindeoberfläche und in der Abfallmatrix dienen dem Schutz der weiteren Barrieren des Endlagersystems. Sie sind durch das Temperaturfeld im Endlagersystem charakterisiert. Die durch Wärmeleitung von den Gebinden an das Endlagersystem abgegebene Wärme wirkt sich in einer von der Wärmeleistung und der räumlichen Verteilung der Endlagergebinde abhängigen Temperaturdifferenz aus.

Dementsprechend werden zum Vergleich der thermischen Anforderungen hier die Temperaturdifferenzen zwischen den maximal zulässigen Temperaturen an der Gebindeoberfläche (siehe Tabelle 11) und der Temperatur des ungestörten Wirtsgesteins (siehe Tabelle 5) herangezogen.

- Radiologische Anforderungen (RA): Der Vergleich der radiologischen Anforderungen ergibt sich unmittelbar aus dem Vergleich der jeweiligen Grenzwerte für die Behälterkonzepte in unterschiedlichen Wirtsgesteinen (siehe Tabelle 12) und gegebenenfalls der Betrachtung berechneter oder gemessener Werte (siehe Tabelle 6).
- Handhabbarkeit (HA): Die Anforderung nach Handbarkeit umfasst neben entsprechend vorhandenen Handhabungshilfen und vorhandener Technik für Transport und Einlagerung der Gebinde auch die Einhaltung maximaler Abmessungen und Gebindemassen (siehe Tabelle 14 und Tabelle 19) sowie die Erfüllung der Anforderungen nach sicherem Einschluss, Begrenzung der Temperatur und des Strahlungsfeldes (siehe Tabelle 13), letztere ggf. unter Verwendung technischer Hilfsmittel wie Transfer- oder Abschirmbehältern. Hinsichtlich vorhandener Handhabungshilfen und Technologie wird davon ausgegangen, dass dies in den jeweiligen Konzepten mitentwickelt worden ist.
- Rückholbarkeit (RÜ): Die Anforderung nach Rückholbarkeit umfasst den sicheren Einschluss sowie die Handhabbarkeit während der Betriebsphase (s. o.). Zudem müssen die Endlagergebäude aus den Einlagerungsbereichen wieder herausgeholt werden können, was entsprechende Anforderungen an die Begrenzung der Temperatur und der Ortsdosisleistung an der Gebindeoberfläche nach sich zieht (siehe Tabelle 13). In Konzepten, in denen eine Rückholbarkeit vorgesehen ist (siehe Abschnitt 3.2.7), wird diese als für entsprechend anwendbare Endlagerkonzepte gegeben angesehen.
- Bergbarkeit (BE): Für die Bergbarkeit sind ein sicherer Einschluss, eine zur Handhabbarkeit ausreichende mechanische Integrität und eine eindeutige Identifizierbarkeit der Endlagergebäude gefordert (siehe Abschnitt 3.2.7). Dementsprechend werden zur Charakterisierung der Bergbarkeit der sichere Einschluss (s. o.) und – qualitativ, basierend auf der jeweiligen Behälterlebensdauer – eine mögliche Handhabbarkeit für einen Zeitraum von bis zu 500 Jahren nach Verschluss des Endlagersystems herangezogen.

4.1 Wirtsgesteinsübergreifende Betrachtungen

Mehrere der hier aufgeführten Anforderungen, anhand derer im Folgenden eine mögliche Übertragbarkeit der betrachteten Behälterkonzepte untersucht werden soll, sind nur geringfügig vom Wirtsgestein abhängig. Diese Anforderungen werden hier als wirtsgesteinsübergreifend beschrieben; mögliche abweichende oder ergänzende Betrachtungen werden in den anschließenden Abschnitten weiter ausgeführt.

4.1.1 Unterkritikalität

Die Forderung nach Unterkritikalität *vor einem Behälterversagen* ist in allen Behälterkonzepten vorgesehen und nachgewiesen. Auszunehmen ist hier das kanadische **UFC-II-Konzept** für Abfälle (CANDU-Brennstabbindel), die mit in Deutschland endzulagernden Wärme entwickelnden radioaktiven Abfällen nicht allgemein vergleichbar sind. Unterschiede in den Wirtsgesteinen beschränken sich auf die moderierenden und reflektierenden Eigenschaften der Materialien im Endlagerbereich. Bei Behälterkonzepten mit einem das Gebinde umgebenden Bentonit-*buffer* sowie bei Behälterkonzepten ohne solchen *buffer* in den Wirtsgesteinen Tonstein und Kristallin ist dies hauptsächlich das Vorhandensein von Wasser

im Behälternahfeld. Für die Brennstabkokille **BSK-3** und den **POLLUX®-10**-Behälter wurde das Kritikalitätsverhalten nach dem Versatz im Steinsalz im Falle eines Laugenzutrittes und einer Korrosion der Gebinde untersucht [124]; für die aus der BSK-3 weiterentwickelte **rückholbare Brennstabkokille** steht ein Nachweis der Unterkritikalität noch aus.

Eine Adaptierung des kanadischen **UFC-II-Behälters** für deutsche Inventare bedarf entsprechend den Ausführungen in Abschnitt 3.3.2 zwingend einer Neuevaluation der Kritikalität der Endlagergebäude.

4.1.2 Thermische Anforderungen

Die thermischen Anforderungen sind, bezogen auf die maximal zulässige Temperatur an der Gebindeoberfläche, derzeit für alle drei potenziellen Wirtsgesteine in Deutschland gleich, d.h. es gilt nach § 27 Abs. 4 StandAG eine vorläufige (vorbehaltlich neuer Forschungsergebnisse, die eine andere Festlegung erlauben) Grenztemperatur von 100 °C [5]. Unterschiede bestehen in der Wärmeleitfähigkeit der Wirtsgesteine, was zu Anpassungen in der Endlagerauslegung (Abstände zwischen den Gebinden) und der Auslegung der Behälterkonzepte (maximal zulässige Wärmeleistung des Inventars) führen kann.

Da das Temperaturfeld im Einlagerungsbereich aus der Überlagerung der ungestörten Wirtsgesteinstemperatur und einer Temperaturerhöhung aufgrund der (räumlich verteilten und mit der Zeit allmählich abnehmenden) Wärmeleistung der Endlagergebäude resultiert, erscheint es zweckmäßig, die Betrachtung einer Erfüllung der thermischen Anforderungen, bezogen auf die maximal zulässige Temperatur an der Gebindeoberfläche, über diese Temperaturerhöhung zu führen. Dies ist umso offensichtlicher, da der Wärmetransport im Endlagersystem primär durch Wärmeleitung stattfindet (vergleichsweise schnell fließende Medien, die zusätzlich Wärme durch Stofftransport übertragen könnten, sind vom Endlagerkonzept auszuschließen), womit die Temperaturerhöhung durch die eingebrachten Gebinde direkt proportional zu deren Wärmeleistung ist. Dabei können Überlegungen zu einer Übertragbarkeit der Temperaturerhöhung selbst lediglich als Abschätzung gelten, da die Temperaturerhöhung einerseits abhängig von den thermischen Eigenschaften in den Barrieren – Gebinde, gegebenenfalls *buffer*, Verfüll- bzw. Verschlussmaterial und Wirtsgestein – ist. Andererseits ist bei einer konzeptabhängigen räumlichen Verteilung der Endlagergebäude auch davon auszugehen, dass jedes Gebinde aufgrund seiner Beladung und Abklingzeit eine individuelle Wärmeleistung haben kann.

In den folgenden Betrachtungen werden beide Aspekte dadurch angenähert, dass als erste Annahme zumindest das *Einlagerungskonzept als konstant angenommen* werden soll. Also wird implizit davon ausgegangen, dass beispielsweise die Kategorie-C-Abfallgebäude der Andra nicht nur in geeignetem oder generischem Tonstein, sondern im Rahmen dieser Überlegungen auch in generischem Kristallingestein oder Steinsalz in verrohrten langen Strecken eingelagert werden würde. Eine anderes, mögliches oder vielleicht sogar konzeptabhängig vorteilhafteres Einlagerungskonzept, z. B. eine flache oder tiefe Bohrlochlagerung oder die Lagerung in Kavernen, kann in dieser Betrachtung nicht berücksichtigt werden. Die Auswahl und Entwicklung des Einlagerungskonzeptes für die verschiedenen Wirtsgesteine kann und soll im Rahmen dieses Vorhabens nicht erfolgen. Als zweite Annahme wird davon ausgegangen, dass die Wärmeleistung der Gebinde gleich groß ist wie jene Wärmeleistung, die sie in den zugrundeliegenden betrachteten Endlagerkonzepten haben (also z. B. die maximal zulässige Wärmeleistung, siehe Tabelle 5).

Unter diesen allgemeinen Annahmen kann man die maximal anzunehmende Temperaturerhöhung für die verschiedenen Endlagergebäude aus den jeweiligen zugrunde gelegten Wirtsgesteinstemperaturen (siehe Tabelle 5) und den für die jeweiligen

Behälterkonzepte geltenden Anforderungen an eine maximal zulässige Temperatur an den Gebindeoberflächen (siehe Tabelle 11) berechnen. Es ergeben sich als maximale anzunehmende Temperaturerhöhungen für das **Andra-Konzept** 77 K, für den **belgischen Supercontainer** 84 K, für den **UOS** 85 K, für das **KBS-3-Konzept** 88...90 K, für das **UFC-II-Konzept** (mit kanadischem Inventar) 89 K, für das **Nagra-Referenzkonzept** 115...130 K und für den **POLLUX®-Behälter** und die **BSK-3** 162 K. Bei den drei letztgenannten Konzepten ist zu beachten, dass die der Entwicklung zugrunde gelegte maximal zulässige Temperatur an der Gebindeoberfläche höher liegt als in den anderen Konzepten (siehe Tabelle 11). Als Kriterium für die Einschätzung einer möglichen Übertragbarkeit sollte diese Temperaturerhöhung nicht deutlich über der maximal zulässigen Temperatur des generisch angenommenen Wirtsgesteinstyps liegen.

Für eine über den Umfang der hier geführten allgemeinen methodischen Überlegungen hinausgehende quantitative Analyse des Temperaturfeldes müssen anhand validierter Modelle von Endlagersystemen detaillierte 4-dimensionale Berechnungen durchgeführt werden, um genauere Aussagen zu treffen. Eine solche Bewertung ist im Rahmen der für das Vorhaben „KoBrA“ hergeleiteten Methodik an dieser Stelle nicht vorgesehen.

4.1.3 Handhabbarkeit

Eine Handhabbarkeit der Behälter ist für alle betrachteten Behälterkonzepte zumindest möglich. Es wird davon ausgegangen, dass die für die verschiedenen Behälterkonzepte im Rahmen der betrachteten nationalen Endlagerprogramme entwickelte Handhabungs- und Transporttechnik zum Einsatz kommt. Für unabgeschirmte Behälter liegen – konzeptionell, als Demonstrator oder als Prototyp – Transfer- und Abschirmbehälter sowie Spezialfahrzeuge vor. Eine Begrenzung der Handhabbarkeit durch die Gebindemasse kann als unwahrscheinlich gelten, da positiv bewertete konzeptionelle Machbarkeitsstudien für die Handhabung und Einlagerung der überschweren (verfüllten) TLB-Gebinde vorliegen [33], die hinsichtlich der Gebindemasse alle hier betrachteten Behälterkonzepte abdecken (siehe Abschnitt 3.2.5).

Für den abgeschirmten **POLLUX®-Behälter** wurde die Handhabbarkeit in Demonstrationsversuchen nachgewiesen. Für alle weiteren – nicht ausreichend abgeschirmten – Behälterkonzepte ist die Verwendung technischer Hilfsmittel in der Form von Transfer- und Abschirmbehältern bzw. von damit ausgerüsteten Spezialfahrzeugen notwendig und in den jeweiligen Endlagerprogrammen angelegt worden. Für den unabgeschirmten **KBS-3-Behälter** wurden ebenfalls Demonstrationsversuche einschließlich Einlagerungsversuchen erfolgreich durchgeführt. Für die weiteren unabgeschirmten Behälterkonzepte wurde Handhabungstechnik entwickelt und konzipiert, die unter den anzunehmenden Bedingungen eines Endlagers in hartem Kristallingestein durchführbar erscheinen; Nachweise stehen hier noch aus. Auch für die **Brennstabkokille BSK-3** wurde Handhabungs-, Transport- und Einlagerungstechnik konzipiert und in Demonstrationsversuchen an einem Probebehälter („dummy“) getestet; da es sich allerdings bei der BSK um einen unabgeschirmten Behälter handelt, steht der abschließende Nachweis einer Einhaltung der relevanten Dosis- und Temperaturgrenzwerte noch aus. Für das kanadische **UFC-II-Konzept** muss im Falle einer Adaptation für deutsche Inventare überprüft werden, ob die Einhaltung der zulässigen Grenzwerte für Temperaturen und Ortsdosisleistung an den Gebindeoberflächen gewährleistet werden kann (siehe Abschnitt 3.3.2). Eine Einhaltung der Grenzwerte ohne Veränderung der Abmessungen von Behälterwanddicke und Supercontainer erscheint unwahrscheinlich.

4.1.4 Rückholbarkeit

Die Rückholbarkeit der Behälter ist in den **schwedischen** und **finnischen** Endlagerprogrammen prinzipiell gefordert und in den **kanadischen**, **französischen**, **schweizerischen** und **deutschen** Konzepten explizit gefordert. Für die entsprechenden Konzepte muss eine Rückholbarkeit daher gezeigt (Schweden, Finnland) oder umfassend nachgewiesen werden. Allgemein wird bei einer Rückholung davon ausgegangen, dass die Anforderungen an die Handhabbarkeit aus der Einlagerung fortbestehen, wobei einschränkende Annahmen z. B. für die Nutzbarkeit verschiedener Lastanschlagpunkte gemacht werden müssen.

Die Einlagerungsbereiche werden in den betrachteten Endlagerkonzepten nach dem Versatz der Endlagergebinde zügig wieder verschlossen (für Deutschland siehe §18 Abs. 2 EndlSiAnfV [70]). Ausnahme ist das amerikanische Yucca-Mountain-Projekt, das die Streckenlagerung in unverfüllten Strecken vorsieht [125]. Generell ist für die Rückholung von Gebinden aus bereits verfüllten Einlagerungsbereichen mit einer Freilegung dieser Bereiche verbunden. Damit können sich die Verfüllmaterialien entsprechend den Einwirkungen, denen sie ausgesetzt sind, verändern (z. B. können tonbasierte Verfüllmaterialien sich mit wässrigen Lösungen sättigen und quellen; Salzgrus kann zunehmend kompaktieren). In den folgenden Betrachtungen wird, ohne technische oder konzeptionelle Lösungen vorauszusetzen, davon ausgegangen, dass solche Arbeiten grundsätzlich möglich sind.

Für den **KBS-3-Behälter** und die **Behälter der Andra** wurde die Rückholung eingelagerter Behälter in Demonstrationsversuchen erprobt. Das Wiederanheben des **POLLUX®-Behälters** und der **BSK** wurde als Umkehrung der Einlagerung an Demonstratoren erprobt, allerdings steht der Nachweis einer Rückholung bereits versetzter Behälter aus verfüllten Bohrlochverrohrungen aus, analog zu den Betrachtungen über eine Handhabbarkeit. Für den auf dem schwedisch-finnischen KBS-3H-Konzept aufbauenden **UOS** und den **belgischen Supercontainer** ist aufgrund der in Abschnitt 3.2.7 geführten Überlegungen eine Rückholbarkeit mindestens wahrscheinlich. Eine Rückholbarkeit eines mit deutschem Inventar beladenen Behälters nach Vorbild des **UFC-II** muss vor der Prüfung auf eine Rückholbarkeit auf seine Handhabbarkeit und Transportfähigkeit hin überprüft werden; eine Rückholbarkeit der entsprechenden, mit einem dünnen Stahlmantel umgebenen Supercontainer („buffer box“) erscheint, die Einhaltung der Grenzwerte für Ortsdosisleistung und Temperatur an der Gebindeoberfläche vorausgesetzt, grundsätzlich möglich. Allerdings ist die Einhaltung ebendieser Grenzwerte ohne entsprechende Anpassungen des Behälterkonzeptes unwahrscheinlich.

Aufgrund der für eine Rückholung notwendigen Handhabungsmaßnahmen sind abgeschirmte Behälter gegenüber unabgeschirmten bzw. für die Handhabung nicht ausreichend abgeschirmten Behältern von Vorteil, da eine Rückholung ohne eine Umladung des Endlagergebundes aus dem Einlagerungsbereich in einen Transfer- oder Abschirmbehälter erfolgen kann. Im Referenzkonzept der **Nagra** ist die Rückholung durch Entfernen des noch ungesättigten Verfüllmaterials (Bentonitgranulat) technisch vorgesehen [80]; eine Demonstration steht noch aus. Im schwedisch-finnischen **KBS-3**-System wurde die technische Möglichkeit demonstriert, den *buffer* um den Behälter zu entfernen und eine Verwendung der Einlagerungstechnik für eine Rückholung erscheint möglich. Die Einhaltung der zum Schutz des Personals geltenden Grenzwerte für die Ortsdosisleistung an der Gebindeoberfläche während der Rückholung wurde jedoch nicht demonstriert [113].

4.1.5 Bergbarkeit

Die Möglichkeit, eingelagerte Gebinde bis zu 500 Jahre nach dem Verschluss des Endlagers wieder zu bergen, wird in dieser Form nur in Deutschland gefordert. Die dafür definierten Anforderungen bestehen in einer ausreichenden mechanischen Stabilität für die Handhabung der Gebinde, einem ausreichend dichten Einschluss des Inventars (Vermeidung einer Freisetzung von Aerosolen) und einer individuellen Auffindbarkeit und Identifizierbarkeit der Gebinde (§ 14 Abs. 2 [70]). Die ausreichende mechanische Stabilität und der sichere Einschluss werden in den folgenden Betrachtungen über die allgemeine Erfüllung des sicheren Einschlusses über eine den Bergbarkeitszeitraum ausreichend übersteigende Behälterlebensdauer bewertet; für die Auffindbarkeit und Identifizierbarkeit werden in den folgenden Absätzen generelle Annahmen getroffen.



Abbildung 15:
Probegravur auf der Gleitkufe eines
französischen Kategorie-C-Behälters
(vergl. Abbildung 7 links) [81].

Als Erweiterung der für eine Betrachtung der Rückholbarkeit gemachten Aussagen zum Zustand der Verfüllmaterialien ist der Zustand der Einlagerungsbereiche bis zum Ende der Bergbarkeitsphase zu betrachten. Da im Rahmen der Bergung der Gebinde als abdeckende Betrachtung ein neues Bergwerk aufgefahren werden muss, sind die Verschlussbauwerke für eine Betrachtung der Bergbarkeit nicht relevant. Die Einlagerungsbereiche selbst jedoch können eine Bergung der Gebinde dahingehend erschweren, dass ein Herausholen der Gebinde aus den Einlagerungsbereichen mit zu lösenden Problemen verbunden sein kann. Dies gilt insbesondere für Gebinde, die in Verrohrungen in

weichem bzw. kriechfähigem Gestein eingelagert werden. Eine durch Bewegungen, Kriechen oder Kompression in den Einlagerungsbereichen verursachte Verformung (z. B. Verbiegen oder Aufschumpfen) der Verrohrung wird in den folgenden Überlegungen daher als ein Hindernis für eine mögliche Bergung benannt werden, ohne dass technische Implikationen weiter erkundet werden.

Eine eindeutige Identifizierung der Gebinde ist für die **französischen Kategorie-C-Behälter** (siehe Abbildung 7, links) durch in die Gleitkufen der Stahlbehälter eingravierte Kennnummern gegeben (Abbildung 15). Die Gleitkufen dienen primär der besseren Einlagerung in die und Rückholbarkeit aus den Stahlverrohrungen in den Einlagerungsbereichen. Ein Ablesen der Information von der radiologisch, chemisch und thermisch inerten Oberfläche ist optisch möglich. Im **schwedisch-finnischen KBS-3-Konzept** ist eine codierte Identifikationsnummer am Behälter vorgesehen, wobei mehrere Möglichkeiten untersucht werden. Als ein sicheres System wird die Codierung mittels speziell geformter Abkantungen im Behälterdeckel, innerhalb der dicht verschweißten Kupferhülle (siehe Abbildung 16), betrachtet. Eine Reihung solcher Abkantungen kann durch Ultraschallmessungen ausgelesen werden [126]. Im **schweizerischen Nagra-Referenzkonzept** ist eine Methode zur physischen Markierung der Behälter anzuwenden, die einen korrosionsbedingten Wandstärkenverlust von mehreren Millimetern übersteht, um eine Identifizierung der Gebinde während einer möglichen Rückholung zu gewährleisten [80]. Für die **generischen britischen Endlagerbehälter** ist eine eindeutige Identifizierbarkeit der Gebinde bis zum Ende der Betriebsphase gefordert [37].

Unter dem Gesichtspunkt einer Anbringung einer als Material codierten Identifikationsnummer erscheint das **belgische Supercontainer-Konzept** inhärent benachteiligt durch die dicke Betonhülle, die den Metallbehälter umgibt. Während eine fertigungstechnisch mögliche Markierung am Metallbehälter infolge der dicken Betonhülle hohe Anforderungen an ein

mögliches Auslesen der codierten Informationen mit sich bringt, müssen für das Anbringen von Markierungen in oder an der Betonhülle Nachweise über deren Zustand bis zu 500 Jahre nach dem Verschluss des Endlagers erbracht werden. Auch für die anderen hier betrachteten Behältertypen sind Überlegungen nach einer (auslesbaren) Identifizierung noch zu führen. Zumindest für die korrosionsresistenten Behälterkonzepte UOS bzw. UFC-II erscheint der Ansatz mechanischer Markierungen innerhalb der Korrosionsbarriere als möglich.

Unter dem Gesichtspunkt der mechanischen Stabilität und des dichten Einschlusses erscheint eine Bergung des **POLLUX®-Behälters** unter der Voraussetzung zu erbringender Nachweise möglich; da für die Lebensdauer dieser Behälter (Innenbehälter aus Stahl, Wandstärke 160 mm [29]) eine *Arbeitshypothese* von 500 Jahren unter Annahme einer *aggressivsten denkbaren* Salzlösung [62] besteht, ist die notwendige Mindeststandzeit gegeben, sofern der *Nachweis* dieser Lebensdauer und der notwendigen mechanischen Stabilität erbracht wird. Aufgrund der Lebensdauerauslegung der **KBS-3-Behälter**, der **UOS** und der **Nagra-Referenzbehälter** auf deutlich mehr als 500 Jahre erscheint eine Bergbarkeit hinsichtlich Stabilität und sicherem Einschluss ebenfalls als wahrscheinlich. Hier ist die Freilegung der Behälter aus ihren Einlagerungspositionen und das Herausholen der *unabgeschirmten*

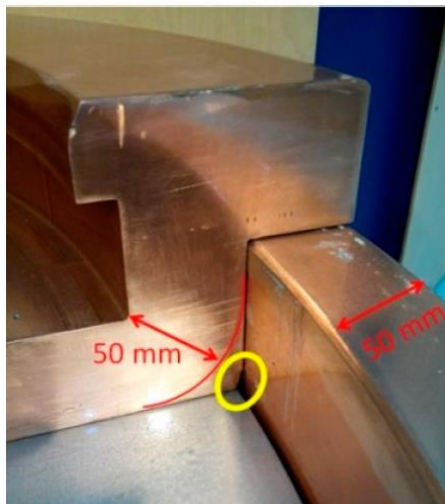


Abbildung 16:
Abkantung auf der Innenseite des Kupferdeckels eines KBS-3-Behälters [126]. Mit solchen Abkantungen kann im KBS-3-Konzept eine Identifikationskennnummer für das Gebinde codiert werden.

Behälter zu prüfen. Der ebenfalls unabgeschirmte **belgische Supercontainer** ist ebenfalls auf eine mögliche Handhabbarkeit in der Bergbarkeitsphase zu prüfen, allerdings kann zum Zustand des Beton-Supercontainers nach bis zu 500 Jahren keine Aussage getroffen werden. Für das französische **Andra-Konzept** von in verrohrten Strecken eingelagerten Stahlbehältern muss geprüft werden, inwieweit die Streckenverrohrungen nach 500 Jahren eine Bergung der unabgeschirmten Gebinde gestatten. Dies betrifft mehr die mit einer Beschädigung der Verrohrung möglicherweise einhergehenden mechanisch-technischen Problemstellungen als die geforderte mechanische Stabilität und Dichtheit der Gebinde; auch unter der Annahme eines Versagens der Stahlverrohrung sind die französischen Kategorie-C-Behälter auf eine Lebensdauer von deutlich mehr als 500 Jahren ausgelegt. Für die **BSK** ergibt sich die gleiche Fragestellung nach dem Zustand der Verrohrung [32], allerdings ist eine Aussage über die Lebensdauer der Brennstabkokillen anhand der für diese lediglich als

Konzeptstudie vorliegenden Behälter nicht unmittelbar möglich. Die Auslegungswandstärke beträgt hier 40 mm Stahl [66] bzw. $\geq 19,5$ mm Stahl für die rückholbare Kokille [30]. Bei geringerer Wandstärke oder einem weniger korrosionsresistenten Material müsste bei einem Versagen der Bohrlochverrohrung davon ausgegangen werden, dass auch die Brennstabkokillen die an eine Bergbarkeit gestellten Anforderungen nach ausreichender mechanischer Integrität nicht mehr erfüllen. Eine Bergung der kanadischen **UFC-II-Behälter** ist nach 500 Jahren mit ähnlichen Schwierigkeiten versehen wie der belgische Supercontainer, da die Integrität der 0,6 cm starken Stahlummantelung der „buffer box“ nicht mehr als gegeben betrachtet werden kann, und die unabgeschirmten Behälter aus den vollständig mit verdichtetem Bentonit verfüllten Einlagerungskammern entfernt werden müssten. Durch die verglichen mit den anderen Gebinden (außer BSK) sehr geringe Wandstärke ist eine für die Handhabung ausreichende Begrenzung von Temperatur und Ortsdosisleistung hierbei nicht anzunehmen. Eine aufgrund des sich von den kanadischen CANDU-Brennstabbündeln stark

unterscheidenden deutschen Inventars sind zudem Anpassungen in den Gebindeabmessungen (siehe Tabelle 14) notwendig. Die Betrachtung einer Bergbarkeit wurde aufgrund des derzeitigen Standes von Wissenschaft und Technik an dieser Stelle nicht vorgenommen.

4.2 Anwendbarkeit der Behälterkonzepte in kristallinen Wirtsgesteinen

Ohne weitere Informationen zu möglichen Kristallinformationen in Deutschland werden für den Vergleich der zu erwartenden mechanischen, thermischen und chemischen Einwirkungen auf die Endlagergebinde im Wesentlichen die Werte aus dem schwedisch-finnischen Endlagerkonzept übertragen (siehe hierzu die Abschnitte 3.1.1, 3.1.2 und 3.1.4 sowie Abschnitt 3.5 im Bericht zum AP1 [2]). Daraus ergibt sich ebenfalls eine Übertragung der Korrosionsraten, eine Umgebungstemperatur von ca. 10 bis 12 °C (88 bis 90 K unter der vorläufigen Grenztemperatur von 100 °C) sowie eine statische mechanische Last von ≤ 35 MPa, zusammengesetzt aus dem hydrostatischen Druck von 5 MPa, einem *buffer*-Schwelldruck von ≤ 15 MPa und einer aus der VSG übernommenen maximalen Gletscherlast von 15 MPa. Inwieweit die Temperatur des ungestörten Wirtsgesteines bei *Kristallingesteinen mit einem* (z. B. überlagernden) *einschlusswirksamen Gebirgsbereich* mit diesen Angaben vergleichbar ist (zusätzlicher Wärmewiderstand durch den ewG), ist zu untersuchen. Eine Übertragbarkeit der Korrosionsraten impliziert aufgrund des weitgehend ähnlichen hydrochemischen Milieus (siehe Tabelle 7), und unter der Annahme einer ähnlichen mikrobiellen Besiedelung auch die Übertragbarkeit oder zumindest Vergleichbarkeit der unter Berücksichtigung entsprechend ähnlicher Einwirkungen formulierten Anforderungen an die Behälterlebensdauer im Wirtsgestein Tonstein (Tabelle 9).

Hinsichtlich der Handhabung und der möglichen späteren Rückholung der Gebinde wird von den in der FuE-Studie KONEKD gemachten Annahmen ausgegangen, die im Kapitel 4 des Berichtes zum AP2 [3] sowie im Kapitel 4.3 des Berichtes zum AP3 [4] detailliert ausgeführt sind. Als Teil dieser Studie wurden Handhabungsvorgänge, Einlagerung und Rückholung sowie Vorkehrungen für eine spätere Bergung von Endlagergebinden der Typen **POLLUX®** und **BSK** sowie von **TLB** betrachtet [32].

Die Übertragbarkeit der betrachteten Behälterkonzepte wird aufgrund des Vergleiches der in Abschnitt 3.2 zusammengestellten Anforderungen unter Berücksichtigung der jeweils zugrunde gelegten Einwirkungen (zusammengestellt in Abschnitt 3.1) mit den im AP3 für eine Endlagerung in Deutschland abgeleiteten Anforderungen [4] unter Berücksichtigung der hier anzunehmenden Einwirkungen untersucht. Eine Zusammenstellung der Ergebnisse findet sich am Ende dieses Abschnittes in Tabelle 15 (für kristalline Wirtsgesteinsinformationen mit ewG) und Tabelle 16 (für kristalline Wirtsgesteinsinformationen ohne ewG). Die Unterscheidung dieser zwei möglichen Fälle folgt aus der hohen Durchlässigkeit kristalliner Gesteine für wässrige Lösungen und der damit nicht gegebenen Möglichkeit, kristalline Wirtsgesteine selbst als geologische Barriere zu nutzen. Diese Fallunterscheidung spiegelt damit auch unmittelbar die grundlegenden Betrachtungen des sicheren Einschlusses (hier: Einschlussfunktion des *Endlagersystems*) in den neu formulierten Sicherheitsanforderungen (§4 Abs. 3) [70].

4.2.1 Spiegelung der Behälterkonzepte an Anforderungen und Einwirkungen in kristallinen Wirtsgesteinen

4.2.1.1 Unterkritikalität

Die Unterkritikalität der Gebinde ist für alle Behälterkonzepte auslegungsbedingt nachzuweisen und muss aufgrund des anzupassenden Inventares nur für eine mögliche Übertragung des **UFC-II-Konzeptes** komplett neu evaluiert werden. Für die ursprünglich für

das Wirtsgestein Salz entwickelten Konzepte ist das wasserhaltige Behälternahfeld besonders zu berücksichtigen; im dickwandigen **POLLUX®**-Behälter ist ein Einfluss der Behälterumgebung vermutlich nur gering, für die **BSK** ist das Vorkommen wässriger Lösungen um die Verrohrung herum zu betrachten. Alle weiteren Behälterkonzepte erfüllen die Anforderung nach Unterkritikalität entsprechend ihrer Auslegung.

4.2.1.2 Sicherer Einschluss

Für den Vergleich der Anforderung nach einem sicheren Einschluss der radioaktiven Abfälle muss unterschieden werden zwischen einem Endlager in einer Wirtsgesteinsformation *mit nachgewiesenem ewG* und einem Endlager in einer Wirtsgesteinsformation *ohne ausgewiesenen ewG*.

- Für ein kristalline Wirtsgesteine mit ausgewiesenem ewG ist der sichere Einschluss zu gewährleisten, bis die wesentliche (geologische) Barriere, zusammen mit den Verschlussbauwerken, die Einschlussfunktion vollumfänglich übernehmen kann, mindestens aber bis zum Ende einer zu gewährleistenden Bergbarkeit 500 Jahre nach Verschluss des Endlagers. Sämtliche betrachtete **Behälterkonzepte für die Wirtsgesteine Tonstein und Kristallin** sind für Behälterlebensdauern von deutlich mehr als 500 Jahren ausgelegt. Unter der Annahme, dass die geologische Barriere den sicheren Einschluss nach ≤ 1.000 Jahren vollumfänglich gewährleisten kann [127], erfüllen sämtliche für die Endlagerung in diesen Wirtsgesteinen ausgelegten Behälterkonzepte diese Anforderung. Für die Behälterkonzepte **POLLUX®** und **BSK-3** gibt es keine nachgewiesene Lebensdauer; für den POLLUX®-8-DWR-Behälter, aus dem der POLLUX®-10-Behälter entwickelt worden ist, wurde unter konservativen Annahmen im Steinsalz eine Behälterlebensdauer von 500 Jahren als Arbeitshypothese angenommen [62]; dass der derzeitige POLLUX®-Behälter mit seinem veränderten Behälterwandkonzept dieser Hypothese genügt, noch dazu in weniger aggressivem Medium, wird als wahrscheinlich angenommen, bedarf allerdings noch eines Nachweises.
- Für kristalline Wirtsgesteine ohne ausgewiesenen ewG ist der sichere Einschluss des Inventars von den wesentlichen technischen und geotechnischen Barrieren zu erfüllen. Dies umfasst allgemein die Abfallmatrix, den Behälter, mögliche *buffer* sowie Verfüll- und Verschlussbauwerke. Ist als abdeckende Annahme der sichere Einschluss für den gesamten Nachweiszeitraum durch den Behälter zu gewährleisten (vergl. § 23 Abs. 1&4 StandAG [5], § 4 Abs. 3 Nr. 2 EndlSiAnfV [70]), so erfüllt keiner der betrachteten Behälter diese Anforderung. Für den **KBS-3**-Behälter wurde im litauischen Endlagerkonzept eine Lebensdauer von bis zu 1,6 Millionen Jahre berechnet, womit wenigstens ein Ansatz für einen möglichen Nachweis besteht. Der kanadische **UFC-II** ist zwar ebenfalls „nur“ für eine Behälterlebensdauer von 100.000 Jahren ausgelegt, allerdings wird angenommen, dass in den zu erwartenden Endlagersystemen vorherrschende Bedingungen zu einer Behälterlebensdauer von weit mehr als 1 Million Jahren führen [128]. Ein Nachweis steht noch aus, außerdem ist die Unversehrtheit der Korrosionsschutzschicht aus aufgespritztem Kupfer hier wesentlich. Für den tschechischen **UOS** ist unter Berücksichtigung der weiteren technischen und geotechnischen Barrieren zu prüfen, ob ein Behälterversagen zwischen der jeweiligen Auslegungslbensdauer und dem Ende des Nachweiszeitraumes zu einer erhöhten Freisetzung von Aktivität in die Biosphäre führt. Inwieweit dies den in [70] festgesetzten und an der Masse der eingelagerten Radionuklide ausgerichteten Grenzwert über- oder unterschreitet, lässt sich nicht ermitteln. Für die weiteren Behälterkonzepte ist ein ausreichend langer sicherer Einschluss auch unter Berücksichtigung der weiteren technischen und geotechnischen

Barrieren als unwahrscheinlich anzusehen. Als Ansatzpunkt können hier Modellberechnungen für das KBS-3-System dienen, in denen als Szenario das Versagen *eines Behälters* nach 10.000 Jahren angenommen wurde. Die Freisetzungsberechnungen an einem vollständigen KBS-3-Endlagersystem in 500 m Tiefe im Granit ergab eine Aktivität an der Oberfläche von einigen $\mu\text{Sv/a}$ (hauptsächlich Iod-129 und Kohlenstoff-14; je nach Fall zwischen $0,6 \mu\text{Sv/a}$ und $9 \mu\text{Sv/a}$) nach bereits kurzer Zeit [129]. Für ein Versagen mehrerer Behälter kann dies in erster Näherung als Freisetzung je Gebinde angenommen werden. Es ist deutlich, dass unter diesen Annahmen bereits ein Versagen von mehr als einem Behälter das in § 7 Abs. 2 EndlSiAnfV festgelegte Kriterium für maximal zulässige Dosiswerte für zu erwartende Entwicklungen des Endlagersystems überschreiten könnte [70]. Für langlebige Behälterkonzepte ist der sichere Einschluss über den gesamten Nachweiszeitraum daher zu überprüfen; für Behälterkonzepte mit einer Lebensdauer von wenigen Jahrtausenden ist der sichere Einschluss hier als unwahrscheinlich anzusehen.

Die für einen sicheren Einschluss ebenfalls notwendige mechanische Stabilität der Endlagergebäude ist im Falle der für kristalline Wirtsgesteine in **Schweden/Finnland, Kanada und Tschechien** entwickelten Behälterkonzepte auf die in einem Endlager in kristallinem Wirtsgestein in 500 m Tiefe einschließlich Schwelldruck eines Bentonit-*buffer*s und Auflagedruck möglicher Gletscher hin ausgelegt. Dagegen sind die **französischen** Kategorie-C-Behälter für Kokillen nur für einen isostatischen Druck von 12 MPa ausgelegt; die Einlagerung in stabil verrohrten Strecken unter Verzicht auf einen *buffer* muss im vorliegenden Fall erst betrachtet werden. Im Fall einer Übertragbarkeit des Einlagerungskonzeptes wäre bis zum Versagen der Verrohrung keine statische Last anzunehmen, ab dem Versagen der Verrohrung der hydrostatische Druck, dem die Gebinde standhalten würden. Die für eine optionale Endlagerung von Brennelementen in Frankreich konzipierten Behälter würden die zu unterstellende mechanische Last aushalten. Das **belgische** Supercontainer-Konzept ist ebenfalls für deutlich geringere mechanische Belastung ausgelegt und müsste auf seine mechanische Stabilität unter anzunehmenden äußeren Lasten hin überprüft werden. Auch das **schweizerische** Nagra-Referenzkonzept wurde für eine geringere mechanische Belastung ausgelegt. Allerdings erscheint eine Aufnahme anzunehmender mechanischer Lasten bei einer massiven Stahlwand von 14 cm Stärke hin zumindest möglich oder durch eine weitere Verstärkung der Wand erreichbar. Gleiches gilt für den dickwandigen **POLLUX®**-Behälter, der aufgrund seiner Wandstärke für ausreichend stabil angesehen wird, auch bei einem lastbedingten Versagen des Sekundärdeckels. Für die Brennstabkokille **BSK-3** gelten die gleichen Annahmen wie für das französische **Andra-Konzept** für Kokillen; entsprechend der auch im FuE-Vorhaben KONEKD angeführten Überlegungen müsste eine robuste Verrohrung hier die mechanische Stabilität gewährleisten [32].

4.2.1.3 Thermische Anforderungen

Die thermischen Anforderungen werden von unter den im Rahmen dieser Betrachtung ähnlichen oder identischen Bedingungen entwickelten **Behältern für kristalline Wirtsgesteine** a priori erfüllt. Auch die **belgischen** und **französischen** Behälter erfüllen die thermischen Anforderungen aufgrund der vergleichbaren Anforderungen und der ebenfalls abdeckenden Randbedingungen, insbesondere der niedriger anzusetzenden Temperatur des Wirtsgesteins. Trotz einer um bis zu 35 K niedrigeren Umgebungstemperatur überstiege das **Nagra-Referenzkonzept** der Schweiz das 100°C -Kriterium um $\leq 40 \text{ K}$. Eine Verstärkung der Behälterwand und ggfs. eine geringere maximal zulässige Wärmeleistung oder größere Abstände zwischen den Endlagergebäuden sind zu prüfen, um eine Erfüllung der thermischen Anforderungen zu ermöglichen. Gleiches gilt für den **POLLUX®**, auch hier wäre eine

Verringerung des Inventars, Verlängerung der Abklingzeit und/oder eine Anpassung des Endlagerkonzeptes¹ zu überprüfen, um eine Reduzierung der Oberflächentemperatur um ≥ 74 K zu erreichen. Für die **BSK** gelten die gleichen Annahmen und Schlüsse wie für den POLLUX®.

4.2.1.4 Radiologische Anforderungen

Die radiologischen Anforderungen zum Schutz der weiteren Barrieren – eine Begrenzung der Ortsdosisleistung an der Gebindeoberfläche auf ≤ 1 Gy/h – werden von den Behälterkonzepten **KBS-3**, **UOS** (im Supercontainer) und dem **Nagra-Referenzkonzept** erfüllt. Der **POLLUX®** als abgeschirmter Behälter erfüllt diese Anforderung ebenfalls. Der kanadische **UFC-II** ist bei einer Anpassung an die Beladung mit deutschem Inventar auf die Erfüllung der Anforderung auch an der Oberfläche der *buffer box* zu überprüfen. Bei den nicht abgeschirmten **französischen** und **belgischen** Behältern ist die Erfüllung dieser Anforderung zu prüfen; die französischen beladenen Behälter für die optionale Endlagerung von UOX-BE erfüllen das Kriterium einer ODL < 1 Gy/h. Die Erfüllung dieser Anforderung durch die **BSK-3** ist nicht gegeben.

4.2.1.5 Handhabbarkeit

Eine Handhabbarkeit der Endlagergebinde ist durch die jeweils für Transport, Beladung und Einlagerung entwickelte Technik – Transfer- und Abschirmbehälter sowie Spezialfahrzeuge – gewährleistet (siehe Abschnitt 4.1). Für das **UFC-II-Konzept** ist eine Handhabbarkeit zu überprüfen (vergleiche Abschnitt 3.3.2). Für alle weiteren Behälterkonzepte wird die Handhabbarkeit ebenfalls als wahrscheinlich angesehen.

4.2.1.6 Rückholbarkeit

Für die Rückholbarkeit gelten die Anforderungen an die Handhabbarkeit unter der Annahme bereits eingelagerter Behälter. In kristallinen Wirtsgesteinen sind keine eine Rückholung erschwerenden Veränderungen der Einlagerungsbereiche zu erwarten. Daher gelten hier die in Abschnitt 4.1 formulierten Überlegungen.

4.2.1.7 Bergbarkeit

Analog zur Rückholbarkeit gelten aufgrund der mechanischen Stabilität des Wirtsgesteines auch für die Bergbarkeit die Überlegungen aus Abschnitt 4.1.

Eine Zusammenfassung der Untersuchungen zur Übertragbarkeit der betrachteten Behälterkonzepte ist in Tabelle 15 für kristalline Wirtsgesteine mit ewG und in Tabelle 16 für kristalline Wirtsgesteine ohne ewG gegeben.

4.2.2 Schlussfolgerungen

Von den 56 untersuchten Fällen für die Endlagerung in kristallinem Wirtsgestein *mit ewG* (siehe nachfolgend Tabelle 15) ist eine Erfüllung der zusammengestellten Anforderungen unter den getroffenen Annahmen in 39 Fällen wahrscheinlich oder zumindest realistisch erreichbar. Weitere 11 Fälle sind umfassend zu überprüfen, in einem Fall wird eine Erfüllung der Anforderungen für unwahrscheinlich erachtet. Die notwendigen Anpassungen eines UFC-II-artigen Behälters an das deutsche Abfallinventar verhindert eine Beurteilung in 5 Fällen. Für eine Endlagerung in kristallinem Wirtsgestein *ohne ewG* (siehe nachfolgend Tabelle 16) verändert sich dieses Ergebnis zu 33 unter den getroffenen Annahmen wahrscheinlich

¹ Zwei dieser Maßnahmen; eine Verringerung des Inventars pro Gebinde und eine Anpassung des Endlagerkonzeptes (hier: „der *Einlagerungsgeometrie*“) werden im Vorhaben KONEKD beschrieben [32].

erfüllbaren, 12 fraglichen bzw. unter erheblichem Aufwand zu überprüfenden und 6 wahrscheinlich nicht erfüllbaren Fällen, sowie den 5 aufgrund notwendiger grundlegender Anpassungen des UFC-II-Konzeptes an dieser Stelle nicht beurteilbaren Fällen.

Übertragbarkeit auf Konzepte in Kristallingestein – mit ewG							
Behälterkonzept	UK Unterkritikalität	SE Sicherer Einschluss	TH Thermische Anforderungen	RA Radiologische Anforderungen	HA Handhabbarkeit	RÜ Rückholbarkeit	BE Bergbarkeit
KBS-3							
UFC-II							
UOS							
Andra-Konzept							
Supercontainer							
Nagra-Konzept							
POLLUX®							
BSK-3							

Farblegende	Die Erfüllung der Anforderungen durch die Behälterkonzepte erscheint unter den gegenwärtig bekannten Randbedingungen...		
	...wahrscheinlich möglich.	...fraglich bzw. mit erheblichem Aufwand verbunden.	...unwahrscheinlich.
		... aufgrund notwendiger Anpassungen des Konzeptes hier nicht eindeutig bewertbar (UFC-II).	

Tabelle 15: Übertragbarkeit der betrachteten Behälterkonzepte für Endlagerkonzepte in kristallinem Wirtsgestein mit ewG.

Übertragbarkeit auf Konzepte in Kristallingestein – ohne ewG							
Behälterkonzept	UK Unterkritikalität	SE Sicherer Einschluss	TH Thermische Anforderungen	RA Radiologische Anforderungen	HA Handhabbarkeit	RÜ Rückholbarkeit	BE Bergbarkeit
KBS-3							
UFC-II							
UOS							
Andra-Konzept							
Supercontainer							
Nagra-Konzept							
POLLUX®							
BSK-3							

Farblegende	Die Erfüllung der Anforderungen durch die Behälterkonzepte erscheint unter den gegenwärtig bekannten Randbedingungen...		
	...wahrscheinlich möglich.	...fraglich bzw. mit erheblichem Aufwand verbunden.	...unwahrscheinlich.
		... aufgrund notwendiger Anpassungen des Konzeptes hier nicht eindeutig bewertbar (UFC-II).	

Tabelle 16: Übertragbarkeit der betrachteten Behälterkonzepte für Endlagerkonzepte in kristallinen Wirtsgesteinen ohne ewG.

Im Rahmen der Untersuchung der betrachteten Behälterkonzepte auf eine Erfüllung der zusammengestellten Behälteranforderungen für Endlagerbehälter in kristallinen Wirtsgesteinen zeigt sich, dass bei der Endlagerung in *Wirtsgesteinen mit einem einschlusswirksamen Gebirgsbereich* viele Behälterkonzepte (fast) alle Anforderungen erfüllen oder mit entsprechenden Nachbesserungen wahrscheinlich erfüllen. Hervorzuheben sind hier das **KBS-3**-Konzept und der **UOS**. Für den **POLLUX®**-Behälter sowie für die Konzepte der **Nagra** und der **Andra** scheint eine Übertragbarkeit mit entsprechenden zu erbringenden weiteren Nachweisen ebenfalls möglich. Bei (kristallinen) *Wirtsgesteinen ohne einen nachgewiesenen einschlusswirksamen Gebirgsbereich* stellt aufgrund des langen Nachweiszeitraumes von 1 Million Jahren (gegenüber 100.000 Jahren beim KBS-3-Konzept) der langfristige sichere Einschluss die größte Herausforderung dar; abgesehen von Indizien für das **KBS-3**-Konzept oder das **UFC-II**-Konzept (unter entsprechenden Annahmen insbesondere zum hydrochemisch-biologischen Milieu) erfüllt kein Behälterkonzept diese Anforderung. Informationen zu den zu erwartenden chemisch-biologischen Einwirkungen in Kristallinformationen in Deutschland sind hier unerlässlich. Auch ist für kristalline Wirtsgesteine mit ausweisbarem ewG die Konsolidierungszeit der geotechnischen Barrieren zu ermitteln, die durch die Übernahme der Einschlussfunktion durch die geotechnischen und geologischen Barrieren die anzusetzende Behälterlebensdauer eingrenzt.

Die Erfüllung der thermischen Anforderungen orientiert sich hier an den Randbedingungen (explizit ungestörte Temperatur des Wirtsgesteines und implizit thermische Eigenschaften) der schwedischen, finnischen oder kanadischen Wirtsgesteinsformationen. Bei diesen Standortgeologien handelt es sich sämtlich um kristalline Wirtsgesteine (bzw. Sedimente) *ohne ewG*. Für kristalline Gesteinsformationen *mit einem – z. B. überdeckenden oder multiplen – ewG* kommt um die Einlagerungsbereiche bzw. über dem Endlagerbergwerk noch eine mögliche thermische Barriere im Geogradienten hinzu, was gegenüber Wirtsgesteinen ohne ewG zu höheren Temperaturen führen könnte. Die thermischen Randbedingungen wären dann neu zu evaluieren und sind im besten Falle vor Ort zu erkunden.

Eine weitere Herausforderung in beiden Wirtsgesteinen stellt die **Anforderung nach Bergbarkeit** dar, die in dieser Form nur in Deutschland gestellt wird. Für alle betrachteten Behälterkonzepte müssen diesbezügliche Nachweise an den ausreichenden sicheren Einschluss (**POLLUX®**) bzw. an eine mögliche Handhabbarkeit der Gebinde bis zum Ende der Bergbarkeitsphase geführt werden. Abgesehen vom abgeschirmten Behälterkonzept **POLLUX®**, für das die für eine Bergbarkeit vorauszusetzende mechanische Stabilität und Dichtheit auf Grundlage der verwendeten Materialien und Wandstärken als möglich angesehen werden kann, sind hier nur die langlebigen Behälterkonzepte aus **Schweden/Finnland**, der **Tschechischen Republik** und der **Schweiz** zu nennen, bei denen allerdings zusätzlich die Bergung unabgeschirmter Gebinde zu zeigen ist. Eine Identifizierbarkeit der Gebinde Bei einer Beurteilung des **französischen Andra-Konzeptes** muss für das eingelagerte Gebinde der Lastenabtrag durch die Verrohrung nachgewiesen werden; abgesehen davon gelten für eine Erfüllung der Anforderung nach Bergbarkeit die Überlegungen in Abschnitt 4.1.5 Aufgrund der zwischen einer möglichen Rückholung und einer möglichen Bergung anzunehmenden geringen Unterschiede im mechanisch stabilen Endlagersystem in harten kristallinen Wirtsgesteinen wird eine Bergbarkeit auch für Einlagerungskonzepte mit verrohrten Strecken bzw. Bohrlöchern als grundsätzlich möglich angesehen, ist aber an umfassende Nachweise und Demonstrationsversuche zur mechanischen Integrität der Verrohrungen gebunden.

4.3 Anwendbarkeit der Behälterkonzepte im Wirtsgestein Tonstein

Da für potenzielle Wirtsgesteinsinformationen in Tonstein in Deutschland keine detaillierten Informationen vorliegen, werden hier – wie auch in den grundlegenden FuE-Arbeiten zu möglichen Endlagerkonzepten in Tonformationen [82, 34] – Betrachtungen aus anderen Endlagerprogrammen zur Untersuchung der Behälterkonzepte auf eine mögliche Übertragbarkeit hinzugezogen. Da es zwischen Tongestein unterschiedlicher Gesteinsformationen eine höhere Diversität gibt als in kristallinen Wirtsgesteinen, ist eine Untersuchung repräsentativer Wirtsgesteinsinformationen in Deutschland für nähere Betrachtungen unerlässlich.

Bei der Betrachtung internationaler Endlagerprogramme in Tonstein ist zu beachten, dass nach § 23 Abs. 5 StandAG [5] ein einschlusswirksamer Gebirgsbereich (ewG) mit einer minimalen Mächtigkeit von 100 m und einer minimalen Teufe von 300 m (Oberfläche des ewG) Mindestanforderungen für einen möglichen Endlagerstandort sind. Demzufolge ist das belgische Endlagerkonzept hier nicht als Referenzmodell für ein mögliches Endlagersystem im Wirtsgestein Tonstein in Deutschland zulässig.

Die Umgebungstemperaturen im Wirtsgestein Tonstein (siehe auch Tabelle 5) sind allgemein höher als in kristallinen Wirtsgesteinen; die Temperatur von 38 °C (62 K unterhalb der vorläufigen Grenztemperatur) in 650 m Tiefe aus dem schweizerischen Endlagerprogramm dient hier als Referenz, wobei die anzunehmenden Temperaturen zwischen 23 °C (Frankreich, 525 m – 77 K unterhalb der vorläufigen Grenztemperatur) und 45 °C (Schweiz, 850 m – 55 K unterhalb der vorläufigen Grenztemperatur) liegen. Aufgrund des ähnlichen hydrochemischen Milieus (siehe Tabelle 7) und einer als ähnlich angenommenen mikrobiellen Besiedelung wird eine Vergleichbarkeit der Korrosionsraten – und damit der Lebensdauer – zwischen den Behälterkonzepten für Tonstein und Kristallin angenommen. Eine mögliche Steigerung der Korrosionsraten und der Stoffwechselaktivität vorhandener Mikroben im wärmeren Wirtsgestein Tonstein führt bei der Übertragung von Lebensdauern von für kristalline Wirtsgesteine entwickelte Behälterkonzepten zu einer möglichen Überschätzung der Behälterlebensdauer. Hinsichtlich statischer mechanischer Lasten sind hier entsprechend den zusammengestellten Informationen zu lithostatischem Druck (Tabelle 2), hydrostatischem Druck (Tabelle 3) und Schwelldruck (Tabelle 4) zwischen $\leq 24,3$ MPa im französischen Endlagerkonzept² und $\leq 23,5$ MPa im flachen Schweizer Endlagerkonzept (Teufe 450 m) bis $\leq 34,5$ MPa im tiefen Schweizer Endlagerkonzept (Teufe 850 m) anzusetzen, zuzüglich einer Gletscherlast von ≤ 15 MPa in Norddeutschland [52] bzw. ≤ 5 MPa nahe der Schweizer Grenze [23]. Insgesamt ergeben sich so zwischen ≤ 30 MPa (flach, alpennah) und $\leq 49,5$ MPa (tief, Norddeutschland), abhängig von korrespondierendem Endlagerkonzept und regionaler Gletscherlast.

4.3.1 Spiegelung der Behälterkonzepte an Anforderungen und Einwirkungen im Wirtsgestein Tonstein

4.3.1.1 Unterkritikalität

Für die Unterkritikalität gelten die Überlegungen aus Abschnitt 4.1.1 bzw. aus der Betrachtung für kristalline Wirtsgesteine in Abschnitt 4.2.1). Das Vorhandensein von Wasser im umliegenden Wirtsgestein bzw. in den geotechnischen Barrieren macht eine Überprüfung für

² Ein hier mitberechneter Schwelldruck von ≤ 7 MPa (siehe auch Tabelle 4) gilt für das optional betrachtete Konzept eines Behälters für Brennelemente (siehe Abbildung 7 rechts), das eine Einlagerung in verrohrten Strecken mit einem Bentonit-*buffer* vorsähe [45].

die **BSK** notwendig; für das an deutsche Inventare anzupassende **UFC-II-Konzept** ist die Kritikalitätssicherheit neu zu evaluieren.

4.3.1.2 Sicherer Einschluss

Der sichere Einschluss ergibt sich, da bei Endlagerkonzepten in Tonstein immer ein ewG nachgewiesen werden muss, direkt analog zum sicheren Einschluss in kristallinen Wirtsgesteinen mit ewG (siehe Abschnitt 4.2.1). Als Empfehlung für eine Mindeststandzeit der Endlagergebinde im Tonstein gilt eine Richtgröße von 1.000 Jahren, ehe sich die geotechnischen Barrieren komplett konsolidiert haben [127]. Dies bedingt einen zu führenden Nachweis über die Lebensdauer des **POLLUX®**-Behälters, wobei aus Analogiebetrachtungen zum **Schweizer** Endlagerbehälter eine ausreichend lange Behälterlebensdauer für wahrscheinlich angesehen wird. Die für einen sicheren Einschluss des Inventars notwendige mechanische Stabilität ist für die auf höhere mechanische Lasten in Endlagerkonzepten für kristalline Wirtsgesteine hin ausgelegten Behälterkonzepte bis ca. 45 MPa gegeben. Für die für eine Endlagerung in Tonformationen optimierten Behälterkonzepte der **Andra** und der **Nagra** ist eine mechanische Stabilität im jeweiligen Endlagerkonzept ebenfalls in den konzeptabhängigen Grenzen gegeben; allerdings erfolgt der Lastabtrag im französischen Konzept über die Verrohrung. Der Kategorie-C-Behälter ist selbst nur für eine isostatische Last von bis zu 12 MPa ausgelegt. Für das französische Konzept ist daher eine Übertragbarkeit gegebenenfalls unter Anpassung der Verrohrung als wahrscheinlich anzusehen. Gleiches gilt für die **BSK**. Das französische Behälterkonzept für eine optionale Endlagerung von Brennelementen erscheint aus Analogiebetrachtungen zu Material und Wanddicke als wahrscheinlich ausreichend stabil. Für den dickwandigen **POLLUX®**-Behälter wird ebenfalls aus Analogiebetrachtungen zu den Konzepten der **Nagra** und der **SKB** angenommen, dass die Integrität des Innenbehälters auch bei einem Versagen des Sekundärdeckels gegeben ist. Eine Übertragbarkeit des **belgischen Supercontainers** auf tiefe Endlager nach Schweizer Konzept erscheint fraglich und wäre umfassend zu überprüfen.

4.3.1.3 Thermische Anforderungen

Für die Beurteilung der thermischen Anforderungen müssen die thermischen Randbedingungen im wärmeren Wirtsgestein Tonstein einzeln betrachtet werden. Das **Andra-Konzept** und der **belgische Supercontainer** sind für eine maximal zulässige Temperatur von 100 °C ausgelegt, allerdings unter Annahme der in den Wirtsgesteinen jeweils zu erwartenden Umgebungstemperaturen ≤ 23 °C (77...84 K unter der vorläufigen Grenztemperatur, siehe Tabelle 5). Diese Temperaturen liegen nahe genug an den hier angesetzten maximal zulässigen Temperaturerhöhungen im Endlagersystem (55...77 K mit Referenz 62 K), um eine Erfüllung der thermischen Anforderungen mit einfachen Anpassungen für wahrscheinlich zu erachten. Im belgischen Programm wird für Abfälle, die die maximal zulässige Wärmeleistung geringfügig überschreiten, eine längere Abklinglagerung betrachtet [120]. Gegenüber einer Endlagerung in kristallinen Wirtsgesteinen ergibt sich hier eine ≤ 13 K (flaches Endlager) und bis zu ≤ 35 K (tiefes Endlager) geringere zulässige Temperaturerhöhung im Behälternahefeld. Dies entspricht einer Reduktion der Temperaturerhöhung um bis zu 39% gegenüber den ≤ 90 K im Kristallin, mit einer entsprechenden notwendigen Reduktion der zulässigen Wärmeleistung des Inventars für die Behälterkonzepte **KBS-3** und **UOS**. Eine Verkleinerung des Inventars oder Verlängerung der Zwischenlagerzeiten ist daher zu prüfen. Gleiches gilt für das auf höhere Grenztemperaturen ausgelegte **Nagra-Referenzkonzept**. Analog zu den Untersuchungen im Abschnitt 4.2.1, ist auch für die Konzepte **POLLUX®** und **BSK** gegebenenfalls die Wärmeleistung des Inventars weiter zu begrenzen und eine Vergrößerung der Gebindeabstände zu prüfen. Während dies beim **POLLUX®** durch eine Anpassung des Behälterkonzeptes grundsätzlich möglich erscheint, ist eine Anpassung der **BSK** aufgrund der Relation von Abfall- und

Gebindeabmessungen nur begrenzt möglich und erfordert umfassende Änderungen am Endlagerkonzept [34]. Unabhängig von diesen Überlegungen ist das **UFC-II-Konzept** bei einer Anpassung auf deutsche Inventare neu zu evaluieren.

4.3.1.4 Radiologische Anforderungen

Die mögliche Erfüllung der radiologischen Anforderungen ergeben sich aus den für kristalline Wirtsgesteine geführten Überlegungen in Abschnitt 4.2.1. Das **Andra-Konzept** und der **belgische Supercontainer**, beide für die Endlagerung im Wirtsgestein Tonstein konzipiert, überschreiten als einzige den in Skandinavien und der Schweiz für Tone bzw. tonbasierte *buffer* angegebenen Grenzwert einer Ortsdosisleistung $\leq 1 \text{ Gy/h}$ (um eine Größenordnung, siehe Tabelle 6) an der Gebindeoberfläche. Da diese Konzepte einerseits den in den meisten Fällen genutzten Grenzwert überschreiten, andererseits aber für das Wirtsgestein Tonstein ausgelegt sind, wird eine Erfüllung der an sie gestellten Anforderung hier als mindestens *wahrscheinlich* angesehen. Eine Erfüllung radiologischer Anforderungen durch die **BSK** wird analog zu den Betrachtungen für kristalline Wirtsgesteine als unwahrscheinlich angesehen.

4.3.1.5 Handhabung

Überlegungen zur Handhabung im Wirtsgestein Tonstein ergeben sich analog zu den in Abschnitt 4.1.3 gemachten wirtsgesteinsübergreifenden Überlegungen. Für Transport, Handhabung und Einlagerung in einem Endlager im Wirtsgestein Tonstein ist gegebenenfalls eine geringere maximal zulässige Last auf den Streckenboden als in kristallinen Wirtsgesteinen zu berücksichtigen.

4.3.1.6 Rückholbarkeit

Die Rückholbarkeit ergibt sich ebenfalls direkt aus den in Abschnitt 4.1.4 dargestellten wirtsgesteinunabhängigen Überlegungen. Aufgrund der gegenüber Steinsalz und Kristallingesteinen schlechteren Wärmeleitung im Tonstein [34] ergibt sich eine langsamere Einstellung der Gleichgewichtstemperatur (vergleiche Abbildung 13), wodurch möglicherweise vor den Verschlussarbeiten anfallende Rückholungstätigkeiten vereinfacht werden können.

4.3.1.7 Bergbarkeit

Die wirtsgesteinsübergreifenden Betrachtungen zur Bergbarkeit in Abschnitt 4.1.5 sind behälterbezogen geführt worden und daher auch im Wirtsgestein Tonstein gültig. Lediglich an das **KBS-3-Konzept**, das **Andra-Konzept** und das **Referenzkonzept der Nagra** wurden entwicklungsseitig Anforderungen gestellt, die den in Deutschland geltenden Anforderungen an eine mögliche Bergbarkeit – Identifizierbarkeit, sicherer (aerosoldichter) Einschluss und mechanische Stabilität – entsprechen; für den **UOS** und den **POLLUX®**-Behälter kann die Anwendung der für diese Konzepte erarbeiteten bzw. diskutierten technischen Lösungen aus Analogiegründen als möglich angenommen werden. Da Tongestein allgemein mechanisch weniger stabil ist als Kristallingestein, müssen bei Behälterkonzepten, die eine Einlagerung in einer Verrohrung vorsehen, die bestimmte Funktionen übernimmt (z. B. Lastabtrag) mögliche mechanische Langzeiteinwirkungen auf die Verrohrung und daraus resultierende mögliche Beeinträchtigungen einer Bergbarkeit aller Gebinde bis zu 500 Jahre nach dem Verschluss des Endlagers betrachtet werden.

4.3.2 Schlussfolgerungen

Von den 56 untersuchten Fällen für die Endlagerung im Wirtsgestein Tonstein (siehe nachfolgend Tabelle 17) ist eine Erfüllung der jeweiligen Anforderung in 40 Fällen wahrscheinlich oder zumindest realistisch erreichbar. Weitere 10 Fälle erscheinen fraglich oder nur unter großem Aufwand möglich, in einem Fall wird eine Erfüllung der Anforderungen

für unwahrscheinlich erachtet. Verbunden mit einer notwendigen Anpassung des UFC-II-Konzeptes an deutsche Abfälle sind 5 Fälle an dieser Stelle nicht ohne Weiteres beurteilbar.

Übertragbarkeit auf Konzepte in Tonstein							
Behälterkonzept	UK Unterkritikalität	SE Sicherer Einschluss	TH Thermische Anforderungen	RA Radiologische Anforderungen	HA Handhabbarkeit	RÜ Rückholbarkeit	BE Bergbarkeit
KBS-3							
UFC-II							
UOS							
Andra-Konzept							
Supercontainer							
Nagra-Konzept							
POLLUX®							
BSK-3							

Farblegende	Die Erfüllung der Anforderungen durch die Behälterkonzepte erscheint unter den gegenwärtig bekannten Randbedingungen...		
	...wahrscheinlich möglich.	...fraglich bzw. mit erheblichem Aufwand verbunden.	...unwahrscheinlich.
		... aufgrund notwendiger Anpassungen des Konzeptes hier nicht eindeutig bewertbar (UFC-II).	

Tabelle 17: Übertragbarkeit der betrachteten Behälterkonzepte für Endlagerkonzepte in (tiefen) Tonsteininformationen.

Eine wesentliche Herausforderung an die Behälterkonzepte stellen die thermischen Anforderungen dar. Dies beruht auf der geringeren Wärmeleitfähigkeit des Tongesteins und der daraus ebenfalls resultierenden höheren Temperatur des ungestörten Wirtsgesteines im Geogradienten. Lediglich die **französischen** und **belgischen** Behälterkonzepte genügen unter den getroffenen Annahmen wahrscheinlich den Anforderungen in Deutschland. Insgesamt erscheint hier das **Andra-Konzept** als am einfachsten übertragbar, wie auch der abgeschirmte **POLLUX®**-Behälter, das **KBS-3-Konzept**, der **UOS** und das **Nagra-Referenzkonzept**. Für alle Behälterkonzepte muss allerdings die thermische Auslegung neu evaluiert werden, wofür realistische und detaillierte Informationen über Temperaturen und thermische Eigenschaften von Tonsteininformationen in Deutschland unerlässlich sind.

Wesentlicher Prüf- und Forschungsbedarf ergibt sich demnach aus den **thermischen Anforderungen**, die von den meisten Behälterkonzepten nicht unmittelbar erfüllt werden können. Auch eine Beurteilung einer jeweils möglichen **Bergbarkeit** bemisst sich hier weitestgehend nach wirtsgesteinsübergreifenden und behälterbezogenen Kriterien; Einwirkungen aus dem Endlagersystem sind hier zu erkunden und zu quantifizieren. Allgemein sind Informationen zu repräsentativen Temperaturen, sowie – für die Evaluation von Behälterlebensdauern und die Entwicklung der Gebinde bis zum Ende der Bergbarkeitsphase – des hydrochemisch-biologischen Milieus im Tonstein vonnöten, wie auch eine validierbare Einschätzung der Konsolidierungszeit der geotechnischen Barrieren.

4.4 Anwendbarkeit der Behälterkonzepte im Wirtsgestein Steinsalz

Für die Einwirkungen in einem Endlager im Wirtsgestein Salz werden als einziges Beispiel eines entsprechenden Erkundungsstandortes exemplarisch die vorhandenen Informationen aus der Vorläufigen Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben (VSG) genutzt.

Dementsprechend wirkt ein lithostatischer Druck von 18,8 MPa in 870 m Teufe zuzüglich bis zu 15 MPa Gletscherlast (Norddeutschland) [30]. Die Umgebungstemperatur beträgt dort 38°C. Hinsichtlich der Lebensdauer ist aufgrund der höheren Salinitäten und der hohen Chloridkonzentrationen eine Vergleichbarkeit mit den Lebensdauern in den anderen Wirtsgesteintypen nicht abdeckend möglich. Allerdings kommt diese Korrosionsrate nur bei einem Zutritt wässriger Lösungen oder einem Abscheiden von Lauge aus dem umgebenden Steinsalz bzw. Salzgrus auf der Gebindeoberfläche zum Tragen.

Es ist, auch vor dem Hintergrund der Rückholungskonzepte, zu überlegen, inwieweit bei der Einlagerung von Behälterkonzepten mit vorgesehenem *buffer* im Steinsalz auf die Bentonitschicht um die Gebinde verzichtet werden könnte. Da der Quelldruck von Bentonit mit steigender Salinität stark nachlässt [130, 131, 132], kann ein Bentonit-basierter *buffer* im Steinsalz keine mechanische Schutzfunktion übernehmen. Für das **KBS-3**-Konzept und den **belgischen Supercontainer** ist eine solche mechanische Stabilisierungswirkung des buffers bzw. des Verfüllmaterials explizit vorgesehen. Für die Bentonit-Supercontainer der Behälterkonzepte **UOS** und **UFC-II**, bei denen der Supercontainer auch der Abschirmung bzw. dem mechanischen Schutz während Transport und Einlagerung (UFC-II) dient, muss das Konzept entsprechend angepasst werden.

4.4.1 Spiegelung der Behälterkonzepte an Anforderungen und Einwirkungen im Wirtsgestein Steinsalz

4.4.1.1 Unterkritikalität

Für die Unterkritikalität gelten die wirtsgesteinunabhängig angestellten Überlegungen in Abschnitt 4.2.1 unverändert. Eine Anwesenheit von wässrigen Lösungen im Behälternahefeld ist durch das Endlagerkonzept auszuschließen oder zu begrenzen. Der Einfluss von Salzen oder Salzhydraten auf Moderation und Reflektion von Neutronen ist zu untersuchen, wird aber als durch die Betrachtungen in wasserführenden kristallinen Gesteinen abgedeckt abgeschätzt.

4.4.1.2 Sicherer Einschluss

Der sichere Einschluss im Wirtsgestein Steinsalz ergibt sich aus dem sicheren Einschluss in anderen Wirtsgesteinen mit nachgewiesenem ewG unter Annahme höherer Korrosionsraten beim durch das Endlagerkonzept mindestens für abweichende Entwicklungen zu begrenzenden Zutritt wässriger Lösungen zum Gebinde. Aufgrund einer angenommenen Konsolidierungszeit im Bereich um 1.000 Jahre [127] wird der sichere Einschluss für die langlebigen Behälterkonzepte **KBS-3**, **UOS**, **UFC-II** und das **Nagra-Referenzkonzept** als abgedeckt angesehen. Allerdings ist für die Einlagerung von Behältern nach dem **UOS**-Konzept oder dem **UFC-II**-Konzept der Einfluss von Steinsalz auf den Bentonit-Supercontainer zu untersuchen. Für das **Andra-Konzept** wird ein sicherer Einschluss über ausreichend lange Zeiträume als wahrscheinlich angesehen, da neben den Gebinden auch die Verrohrung angepasst werden kann. Gleiches gilt für die explizit für die Randbedingungen der VSG ausgelegte **BSK-3**, wobei hier zwingend ein Nachweis über die Behälterlebensdauer zu erbringen ist, um einen möglichen Anpassungsbedarf gegebenenfalls zu quantifizieren. Der **belgische Supercontainer** ist auf durch den Beton des Supercontainers gewährleisteten hohen pH-Wert angewiesen, um die Korrosion ausreichend zu begrenzen. Bei einem vom Endlagerkonzept weitgehend auszuschließenden Zutritt größerer Mengen von Lauge mit vergleichsweise niedrigerem pH-Wert (vergleiche Tabelle 7) könnte daher den sicheren Einschluss in der Übergangsphase gefährden. Hier besteht Klärungsbedarf. Die mechanische Stabilität ist durch alle Behälterkonzepte durch ihre Auslegung gegen stärkere statische mechanische Lasten abgedeckt. Nur für den **belgischen Supercontainer** ist dies noch zu zeigen (vergleiche Abschnitt 3.3.3).

4.4.1.3 Thermische Anforderungen

Die Beurteilung der Erfüllung der thermischen Anforderungen erfolgt aufgrund der gleich hoch angenommenen Referenztemperatur des ungestörten Wirtsgesteines analog zu den Überlegungen für das Wirtsgestein Tonstein in Abschnitt 4.3.1 (Schweizer Referenztemperatur von 38 °C für 650 m Teufe). Die für kristalline Wirtsgesteine entwickelten Behälterkonzepte (ausgenommen das generell zu überprüfende **UFC-II-Konzept**) erfüllen die Anforderungen dementsprechend nicht unmittelbar, auch die für höhere Grenztemperaturen entwickelten Konzepte **POLLUX®**, **BSK** und das **Nagra-Referenzkonzept** müssen hierfür neu evaluiert werden. Dabei ist die gegenüber Tonstein bessere Wärmeleitfähigkeit des Wirtsgesteins möglicherweise günstig für eine mögliche Übertragbarkeit anderer betrachteter Behälterkonzepte. Für die französischen und belgischen Behälterkonzepte gelten die in Abschnitt 4.3.1 dargelegten Überlegungen.

4.4.1.4 Radiologische Anforderungen

Die Erfüllung der radiologischen Anforderungen ist für Steinsalz nicht ohne Weiteres überprüfbar, da es für die maximal zulässige Ortsdosisleistung an der Gebindeoberfläche im Steinsalz keinen validierten Grenzwert gibt (siehe Abschnitt 3.2.4). Da Steinsalz allgemein als strahlungshärter gilt als Tonminerale, wird angenommen, dass alle Behälterkonzepte, die die radiologischen Anforderungen im Tonstein erfüllen, auch eine noch zu formulierende Anforderung für Steinsalz erfüllen. Für die **BSK-3** ist dies nach der Etablierung eines validierten Grenzwertes zu zeigen. Das **UFC-II-Konzept** ist nach den in Abschnitt 4.2.1 gemachten Überlegungen generell zu überprüfen.

4.4.1.5 Handhabbarkeit

Eine Handhabung der Gebinde wird nach den wirtsgesteinsunabhängigen Überlegungen in Abschnitt 4.1 für alle Behälterkonzepte außer dem zu prüfenden **UFC-II-Konzept** in Steinsalz als machbar angesehen.

4.4.1.6 Rückholbarkeit

Für die Rückholung der Gebinde gelten im Steinsalz die gleichen Argumente wie für die Rückholung im Ton. Da Steinsalz kriecht, ist hier eine zunehmende Kompaktierung bereits verfüllter Strecken zu beachten, zudem entsprechende mechanische Einwirkungen auf Gebinde und Verrohrungen.

4.4.1.7 Bergbarkeit

Auch eine Bergbarkeit der Gebinde ergibt sich aus den wirtsgesteinsunabhängigen und behälterbezogenen Überlegungen in Abschnitt 4.1. Abgesehen von der zunehmenden Kompaktierung des in bisherigen Endlagerkonzepten im Steinsalz als Verfüllmaterial geplanten Salzgrus' und den damit verbundenen Herausforderungen an die Bergung der Gebinde aus technischer Sicht, ergeben sich aus dem Kriechen des Salzes über den Bergbarkeitszeitraum mögliche Herausforderungen an das Auffinden individueller Gebinde. Für in verrohrten Strecken eingelagerte Gebinde – das **Andra-Konzept** und die Brennstabkokille **BSK** – ist hinsichtlich der Kriechfähigkeit und des Fließvermögens der die Verrohrungen umgebenden geologischen Barriere unter dem Gesichtspunkt möglicher Verformungen der Verrohrungen (Verbiegen oder Aufschrumpfen auf die Gebinde) nachzuweisen, dass der Zustand der Verrohrung zum Ende der Bergbarkeitsphase eine Herausholung der Gebinde gestattet.

4.4.2 Schlussfolgerungen

Von den 56 untersuchten Fällen für die Endlagerung im Wirtsgestein Steinsalz (siehe nachfolgend Tabelle 18) erscheint in 38 Fällen eine Erfüllung der jeweiligen Anforderung wahrscheinlich oder zumindest realistisch erreichbar. Weitere 13 Fälle sind umfassend zu überprüfen, in 5 Fällen ist eine Beurteilung einer möglichen Übertragbarkeit (des **UFC-II**-Konzeptes) durch notwendigen Anpassungsbedarf des Behälterkonzeptes hier nicht möglich.

Übertragbarkeit auf Konzepte in Steinsalz							
Behälterkonzept	UK Unterkritikalität	SE Sicherer Einschluss	TH Thermische Anforderungen	RA Radiologische Anforderungen	HA Handhabbarkeit	RÜ Rückholbarkeit	BE Bergbarkeit
KBS-3							
UFC-II							
UOS							
Andra-Konzept							
Supercontainer							
Nagra-Konzept							
POLLUX®							
BSK-3							

Farblegende	Die Erfüllung der Anforderungen durch die Behälterkonzepte erscheint unter den gegenwärtig bekannten Randbedingungen...		
	...wahrscheinlich möglich.	...fraglich bzw. mit erheblichem Aufwand verbunden.	...unwahrscheinlich.
		... aufgrund notwendiger Anpassungen des Konzeptes hier nicht eindeutig bewertbar (UFC-II).	

Tabelle 18: Übertragbarkeit der dargestellten Behälterkonzepte für Endlagerkonzepte im Wirtsgestein Steinsalz.

Wesentliche Herausforderung für Endlagergebinde ist, wie auch im betrachteten Endlagersystem im Tonstein (mit einer im gleichen Rahmen befindlichen Wirtsgesteinstemperatur) die Erfüllung der **thermischen Anforderungen** im Steinsalz. Die vorbehaltlich neuer Forschungsergebnisse festgelegte vorläufige Grenztemperatur von 100 °C lässt eine Erfüllung dieser Anforderungen nach derzeitigem Stand lediglich durch das **Andra-Konzept** und den **belgischen Supercontainer** als wahrscheinlich möglich erscheinen. Jedoch können aufgrund der vorhandenen geringen Abweichungen in der zu erwartenden Temperaturerhöhung auch für diese Konzepte Anpassungen des Einlagerungskonzeptes angebracht sein.

Aufgrund der (durch das Endlagerkonzept zu begrenzenden) Möglichkeit eines Zutrittes wässriger, hochkonzentrierter Salzlösungen zum Endlagergebinde und aufgrund der Kriechfähigkeit des Steinsalzes ist eine Bergbarkeit von nicht nachgewiesenen langlebigen Gebinden bzw. in verrohrten Strecken eingelagerten Behältern wahrscheinlich mit einem höheren Nachweisaufwand verbunden.

4.5 Übertragbarkeit von Transport- und Lagerbehältern

Ergänzend zu den betrachteten Endlagerbehälterkonzepten werden im Folgenden auch generische Beispiele aus den in Deutschland für den Transport und eine auf maximal 40 Jahre begrenzte Zwischenlagerung verwendete TLB-Typen betrachtet. Eine Verwendung von TLB

für die Endlagerung Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle würde eine Rekonditionierung der Abfälle gegebenenfalls unnötig machen. Allerdings ist zu beachten, dass die Behälter ursprünglich nicht für die Endlagerung konzipiert worden sind, sodass allein für eine generische Betrachtung die Auslegung der Behälterfunktionen für jeden vorhandenen Typ überprüft werden müsste. Ein hierfür verwendbares Instrument stellt der im Arbeitspaket 3 [4] erstellte top-down-Ansatz dar, aus dem sich auch die hier verwendete Methodik (siehe Abbildung 2) ableitet. Da hier allerdings auch die Behälterfunktionen miteinander verglichen werden müssten, wäre die Methodik zu erweitern und auf jeden vorhandenen TLB-Typ anzupassen, was den Rahmen des vorliegenden Arbeitspaketes zweifelsohne sprengen würde. Anstelle dessen werden hier die wesentlichen im Arbeitspaket 3 hergeleiteten Behälterfunktionen für die TLB kurz aufgeführt werden, um Unterschiede zu den Endlagerbehälterkonzepten aufzuzeigen.

4.5.1 Darstellung der Behälterfunktionen

Die im Kapitel 6 des Berichtes zum Arbeitspaket 3 [4] hergeleiteten wesentlichen Behälterfunktionen umfassen den sicheren Einschluss des radioaktiven Inventars, die Abschirmung des vom Inventar ausgehenden Strahlungsfeldes, den Kritikalitätsausschluss, die Begrenzung der Temperaturen an Gebindeoberfläche und in der Abfallmatrix, die Begrenzung von Gaserzeugung und Korrosion und die Handhabbarkeit der Gebinde.

4.5.1.1 Sicherer Einschluss

Der sichere Einschluss des Inventars richtet sich bei den TLB nach den Anforderungen aus Transport- und Verkehrsrecht sowie aus der Genehmigung für eine Aufbewahrung des Inventars für einen Zeitraum von bis zu 40 Jahren. Der Einschluss ist dabei durch ein Doppel-Deckeldichtsystem mit Dichtringen aus Polymer und Metall gewährleistet. Das Langzeit- und Alterungsverhalten dieser Dichtringe und die sich daraus ergebenden Folgen für die Einschlussfunktion über mehr als 40 Jahre trockener Zwischenlagerung ist derzeit Gegenstand aktiver Forschung. Die Deckel sind allgemein verschraubt, wohingegen bei allen betrachteten Behälterkonzepten dicht verschweißte Deckel (bzw. beim **POLLUX**[®] ein dicht verschweißter Deckel des Innenbehälters und ein verschraubter Deckel des äußeren Behälters) betrachtet wird. Die ebenfalls notwendige mechanische Stabilität des Gebindes ist durch die Auslegung für Transport und Handhabung gegeben. Eine Aussage über das Materialverhalten unter Endlagerbedingungen – über Korrosion, über Kriechdehnung oder Verformung des Materials sowie das Verhalten des Deckeldichtsystems unter mechanischen Lasten über lange Zeiträume – gibt es noch keine Aussagen.

4.5.1.2 Abschirmung

Die TLB sind für Transport und Handhabung ausreichend abgeschirmt.

4.5.1.3 Kritikalitätsausschluss

Der Ausschluss einer sich selbst erhaltenden nuklearen Kettenreaktion ist auch bei einer Flutung des Behälters nachzuweisen und damit für die TLB während ihrer noch nicht quantifizierten Behälterlebensdauer gewährleistet. Die Gewährleistung der Unterkritikalität für bislang noch nicht konditionierte, teilweise hoch angereicherte Brennelemente aus Forschungsreaktoren ist noch für alle vorhandenen Brennstoffe zu zeigen.

4.5.1.4 Temperaturbegrenzung

Die TLB sind aus wirtschaftlich-logistischen Gründen auf die Aufnahme großer Wärmeleistungen hin ausgelegt (siehe Tabelle 19), um einen schnellen und wirtschaftlichen Transport von Brennelementen und Abfällen aus der Wiederaufarbeitung aus den Brennelementlagerbecken bzw. aus den Lagern der Wiederaufarbeitungsanlagen in die

Zwischenlager in Deutschland zu garantieren. Die Beladung der TLB erfolgt dabei durch die jeweiligen Betreiber; die maximal zulässige Wärmeleistung ist nur eine obere Schranke für die tatsächlich inventarisierten Wärmeleistungen. Die große maximal zulässige Wärmeleistung der dargestellten überschweren TLB-Typen bedingt eine Wärmeabfuhr durch Strahlung und Konvektion; der im verfüllten Einlagerungsbereich einzig mögliche Wärmetransportmechanismus der Wärmeleitung würde hier eine Einhaltung der Temperaturgrenzwerte unmöglich machen (vergleiche hierzu auch die maximal zulässigen Wärmeleistungen der Endlagerbehälterkonzepte in Tabelle 5). Die Vielzahl von TLB-Typen mit jeweils eigenen Grenzwerten für eine maximal zulässige Wärmeleistung, die diese Grenzwerte nicht zwangsläufig erreichende Beladung sowie die verschiedenen Abklingzeiten der vorhandenen TLB machen hier eine individuelle Betrachtung notwendig.

4.5.1.5 Begrenzung von Gaserzeugung und Korrosion

Die TLB sind für eine trockene Lagerung in belüfteten Hallen ausgelegt; etwaige Schädigungen der Oberfläche können aufgrund der ausreichenden Abschirmung beseitigt werden. Eine Korrosionsresistenz in Anwesenheit wässriger Lösungen ist nicht vorgesehen. Neben der möglichen Korrosion des gusseisernen Behältergrundkörpers ist auch eine mögliche thermische, radiolytische oder chemische Zersetzung der vorhandenen PE-Moderatorstäbe und eine entsprechende Gasfreisetzung zu betrachten.

4.5.1.6 Handhabbarkeit

Die TLB sind durch angebrachte Tragzapfen, ausreichende Abschirmung und mechanische Stabilität entsprechend den Anforderungen aus Beladung, Transport und Zwischenlagerung für eine Handhabung bis einschließlich zur Einlagerung der Gebinde ausgelegt. Beim **POLLUX**[®]-Behälterkonzept wird nach dem Versatz des Behälters kein Kredit mehr von den außen am Behälterkörper angeschraubten Tragzapfen genommen (siehe auch Kapitel 6 im Bericht zum Arbeitspaket 2 [3]), weshalb eine analoge Eingrenzung der Nutzung dieser Handhabungshilfen auch bei den zumindest überschweren TLB angenommen werden kann.

4.5.2 Übersicht relevanter Behältereigenschaften

Die in Deutschland verwendeten TLB umfassen eine umfangreiche Gruppe hochdiversitärer Behälter. Eine pauschale Aussage zur Eignung dieser Behälter für eine Aufgabe ist nicht möglich. Auch die Zulassungen der jeweiligen Behälter zu Transport und befristeter Aufbewahrung von Brennelementen oder Kokillen aus der Wiederaufarbeitung erfolgen typenweise. Im Rahmen dieser Betrachtungen werden exemplarisch einige Behälter der CASTOR[®]-Familie betrachtet (siehe Tabelle 19).

Behälter	Inventar	Wärmeleistung [kW]	Höhe [cm]		Durchmesser [cm]		Masse [Mg]	Quelle
			außen	innen	außen	innen		
CASTOR [®]								
V/19	≤ 19 DWR-BE	≤ 39	594	503	244	148	≈ 108	[133]
V/52	≤ 52 SWR-BE	≤ 40	553	455			≈ 105	[134]
HAW28M	≤ 28 CSD-V	≤ 56	612	518	248	135	≈ 100	[101]
MTR3	versch.	k. A.	160	92	150	72	16	[135]

Tabelle 19: Eigenschaften einiger TLB der CASTOR[®]-Familie

Aus den gegebenen Informationen zu den ausgewählten TLB-Typen ergibt sich eine Wandstärke aus 39 cm (MTR3), 48 cm (V/19 und V/52) und 56,5 cm (HAW28M) Gusseisen. Davon sind noch die Doppelreihen PE-Moderatorstäbe mit jeweils 8 cm Durchmesser (Wert für den Endlagerbehälter des gleichen Herstellers, POLLUX[®], aus [66] entnommen)

abzuziehen. Damit ergibt sich eine maximal ansetzbare Wandstärke von insgesamt 23 cm (MTR3), 32 cm (V/19 und V/52) und 40,5 cm (HAW28M), die in drei Schichten – innerhalb der Moderatorstäbe, zwischen den Moderatorstabreihen und außerhalb der Moderatorstäbe – vorliegt. Da aus den Quellen nicht ersichtlich ist, ob die Abmessungen inklusive oder exklusive der Kühlrippen an der Behälteroberfläche sind, entsprechen diese Werte oberen Grenzen. Dies entspricht summarisch einer Wandstärke oberhalb jener des Innenbehälters des KBS-3-Behälters (Gusseisen, 50 mm). Vorbehaltlich zu erbringender rechnerischer Nachweise wird daher angenommen, dass die mechanische Stabilität des KBS-3-Behälters erreicht wird.

4.5.3 Spiegelung der TLB-Konzepte an Anforderungen und Einwirkungen in den Wirtsgesteinen

Unter Beachtung der gegenüber Endlagerbehälterkonzepten unterschiedlichen Auslegung der Behälterfunktionen (siehe Abschnitt 4.5.1) wird die Übertragbarkeit der exemplarischen überschweren TLB-Konzepte analog den Betrachtungen zu den Endlagerbehälterkonzepten für die generischen Wirtsgesteine geführt.

4.5.3.1 Unterkritikalität

Die dauerhafte Unterkritikalität des Inventars ist, zumindest für Brennelemente aus Leistungsreaktoren durch die Verfüllung der Zwischenräume und gegebenenfalls die Beimischung von Neutronenabsorbern zu erreichen [33]. Ein Nachweis steht aus.

4.5.3.2 Sicherer Einschluss

Die mechanische Stabilität wird für die großen Behälterkonzepte aus Analogiebetrachtungen anhand einer abgeschätzten maximalen Wanddicke als ausreichend abgedeckt betrachtet, muss aber für verschiedene TLB-Typen im Einzelfall bewertet werden. Der sichere Einschluss der Abfälle kann für Wirtsgesteine mit ewG (Mindestlebensdauer 1.000 Jahre [127]) nicht abgeschätzt werden, da keine entsprechenden FuE-Arbeiten zum Vergleich vorliegen. Für Wirtsgesteine ohne ewG ist eine Erfüllung dieser Anforderung aus Analogiebetrachtungen mit korrosionsresistenten Behälterkonzepten heraus als ausgeschlossen zu betrachten.

4.5.3.3 Thermische Anforderungen

Die thermischen Anforderungen richten sich bei den TLB nicht nur nach der Temperatur des ungestörten Wirtsgesteins, sondern auch nach der für einzelne Typen und einzelne Behälter abzuschätzenden oder zu bestimmenden Wärmeleistung des Inventars. Die wirtschaftliche Motivation, möglichst große Wärmeleistungen zuzulassen, übersetzt sich in typenabhängig maximal zulässige Wärmeleistungen von z. B. 39 bis 56 kW je Behälter für die Behälter mit Abfällen aus der Kernenergieerzeugung. Eine Betrachtung der maximal zulässigen Wärmeleistungen für verschiedene Endlagerbehälterkonzepte (im Bereich $\leq 1,8$ kW für Gebinde mit einer maximal zulässigen Grenztemperatur von 100 °C, siehe Tabelle 5) verdeutlicht, dass die Einlagerung von TLB mit maximal zulässiger Wärmeleistung zu solchen Temperaturerhöhungen im Endlagersystem führen kann, die eine Erfüllung der thermischen Anforderungen unmöglich machen. Abgesehen von diesen Überlegungen für die maximal zulässige Wärmeleistung hat die entsprechend ihres Konzeptes logistisch motivierte Beladung der TLB real zu einem hochvariablen Spektrum an inventarisierten Wärmeleistungen geführt. Darüber hinaus besteht eine große Bandbreite an Standzeiten und damit Abklingzeiträumen für die TLB-Inventare.

4.5.3.4 Radiologische Anforderungen

Die radiologischen Anforderungen werden für alle Wirtsgesteine erfüllt. Die TLB sind für Handhabung und Transport ausgelegt und entsprechend abgeschirmt.

4.5.3.5 Handhabbarkeit

Eine Handhabung der Gebinde für Transport und Einlagerung ist für alle Gebinde anzunehmen, da die Auslegung der Temperaturen und Ortsdosisleistung an den Oberflächen für Handhabung und Transport ausgelegt worden ist. Die Handhabung von Großbehältern bis zu einer Masse von 165 t wurde am Beispiel der hier aufgeführten TLB in einer positiv bewerteten Machbarkeitsstudie untersucht [33].

4.5.3.6 Rückholbarkeit

Eine Rückholung der Gebinde ist durch die Möglichkeit zur Einlagerung implizit wahrscheinlich. Allerdings sind entsprechende Konzepte in weichen bzw. kriechenden Wirtsgesteinen noch zu zeigen. Aus dem Vergleich mit Rückholungskonzepten für POLLUX® ergibt sich eine zumindest als möglich anzusehende Rückholbarkeit der TLB – allerdings ist die technische Machbarkeit einer Rückholung überschwerer Gebinde aus den verfüllten Einlagerungsbereichen noch offen.

4.5.3.7 Bergbarkeit

Eine Bergbarkeit der Gebinde bis zu 500 Jahren nach Verschluss des Endlagerbergwerkes ist in Wirtsgesteinen mit vorhandenem Wasser grundsätzlich zu prüfen, da die Gebinde nicht gegen Korrosion ausgelegt sind. In trockenen Wirtsgesteinen kann – bei entsprechender Nachweisführung der Geologie – Korrosionsprozesse auszuschließen. Allgemein ist jedoch das Materialverhalten unter im Endlager anzunehmenden mechanischen Lasten – insbesondere Kriechdehnung und Verformung – über lange Zeiträume noch zu untersuchen. Auch sind die Deckel der Behälter verschraubt und mit Dichtungen versehen, deren Aerosoldichtheit nach mehr als 500 Jahren unter Endlagerbedingungen nicht nachgewiesen ist. Auch ein dichtes Verschweißen der Behälterdeckel ist daher zu überprüfen.

4.5.4 Schlussfolgerungen

Für die Einlagerung von TLB in die unterschiedlichen betrachteten Wirtsgesteinstypen (Zusammenfassung siehe nachfolgend in Tabelle 20) sind nach derzeitigem Stand und unter den getroffenen Annahmen für die Einwirkungen auf die Gebinde nur die Erfüllung der radiologischen Anforderungen und der Handhabbarkeit erfüllt. Die Anforderung an Unterkritikalität wird konzeptionell als wahrscheinlich angesehen, ist aber nachzuweisen.

Übertragbarkeit von TLB								
Wirtsgestein	ewG	UK Unterkritikalität	SE Sicherer Einschluss	TH Thermische Anforderungen	RA Radiologische Anforderungen	HA Handhab- barkeit	RÜ Rückholbarkeit	BE Bergbarkeit
Kristallin	ohne							
Tonstein	mit							
Steinsalz								

Farblegende	Die Erfüllung der Anforderungen durch die Behälterkonzepte erscheint unter den gegenwärtig bekannten Randbedingungen...		
	...wahrscheinlich möglich.	...fraglich bzw. mit erheblichem Aufwand verbunden.	...unwahrscheinlich.

Tabelle 20: Übertragbarkeit der betrachteten TLB-Konzepte für die verschiedenen Wirtsgesteine.

Eine Rückholung in harten Gesteinen erscheint aufgrund der wahrscheinlich durchführbaren Einlagerung konzeptionell möglich, ist aber ebenfalls zu zeigen. In weichen Gesteinen steht

ein Nachweis ebenfalls aus. Eine Bergbarkeit ist zusätzlich zu Handhabbarkeit und Rückholung auch an zu erbringende Nachweise der Aerosoldichtheit nach mehr als 500 Jahren im Endlager gebunden. Dies, wie auch der sichere Einschluss bedarf weiterer Forschung zu Materialverhalten und Korrosion des verwendeten Materials unter den Bedingungen eines Endlagers. Die Erfüllung der thermischen Anforderungen wird aufgrund der individuellen Beladungen und der Vielzahl vorhandener Abklingzeiträume in typen-, chargen- oder behälterbezogenen Einzelfallentscheidungen münden.

Für die Korrosion von Gusseisen wurden nur wenige Quellen gefunden. Schwedische Studien zur Korrosion von Gusseisen in verschiedenen sauerstofffreien granitischen Grundwässern (insbesondere synthetischem Äspö-Grundwasser und Bentonit-saturierten Wässern) zeigen anaerobe Korrosionsraten von ca. 10 nm/a (50°C, Gleichgewicht nach 5.000 Stunden) bis ca. 100 nm/a (85°C, Gleichgewicht nach 5.000 Stunden) [136].

4.6 Offene Fragen und weiterer Forschungsbedarf

Aus den Betrachtungen zur Übertragbarkeit verschiedener Behälterkonzepte auf Endlagerkonzepte in unterschiedlichen Wirtsgesteinen lässt sich unmittelbar noch vorhandener Forschungsbedarf ableiten, der für die Qualifizierung von Endlagersystemen und/oder Behälterkonzepten notwendig ist.

4.6.1 Forschungsbedarf hinsichtlich der Einwirkungen auf die Endlagerbehälter

Wirtsgesteinsübergreifend ist eine umfassende Erkundung der Standortgeologie und der Eigenschaften möglicher Wirtsgesteinsformationen unerlässlich. Eine Herleitung generischer und später wirtsgesteins- und standortspezifischer Behälterkonzepte ist ohne eine zunehmend detaillierte Kenntnis der physikalischen und biologisch-chemischen Einwirkungen im Endlagerbereich nicht möglich.

Bereits generische endlagerrelevante Informationen zu Kristallingesteinen in Deutschland sind spärlich vorhanden. Weitere Erkundungsarbeiten zu Geologie und Temperaturen (insbesondere auch erhöhte Temperaturen bei Vorhandensein zusätzlicher Wärmewiderstände im Geogradienten durch einen ausweisbaren ewG), zum chemisch-biologischen Milieu, zur Hydrogeologie und zu möglichen Gesteinsformationen, die auch in kristallinen Wirtsgesteinen als ewG ausweisbar sind, bilden die notwendige Grundlage zur Qualifizierung einer möglichen Endlagerung in solchen Wirtsgesteinen.

Auch für potenziell als Wirtsgesteinsformationen in Betracht zu ziehende Tongesteine sind bereits generische Informationen im Wesentlichen aus dem Ausland bekannt und werden entsprechend extrapoliert. Wie in kristallinen Wirtsgesteinen fehlen hier für mögliche Wirtsgesteinsformationen in Deutschland wesentliche endlagerrelevante Randbedingungen wie z. B. Temperatur, repräsentative (lokale) Informationen zum biologisch-chemischen Milieu und die Charakterisierung von mechanischer Festigkeit, mechanischen Lasten etc.

Für Steinsalz sind generische Eigenschaften durch abgeschlossene FuE-Arbeiten vorhanden. Zusätzlich zu den im Rahmen der Standortsuche durchzuführenden Erkundungsarbeiten in möglicherweise infrage kommenden Wirtsgesteinsformationen ist – allein zu Nachweiszwecken – ein validierter Grenzwert für die zum Schutz der geologischen Barriere und der Verfüllmaterialien zulässige Strahlungsbelastung (Dosis und Dosisleistung) zu ermitteln.

4.6.2 Forschungsbedarf hinsichtlich endlagerrelevanter Behälterfunktionen

Das Langzeitverhalten von Materialien und Komponenten ist vor Allem auch vor dem Hintergrund einer möglichen späteren Rückholung (≈Jahrzehnte) oder Bergung (≥ 500 Jahre)

quantitativ zu beschreiben. Dies beinhaltet Untersuchungen zu Kriechdehnung, Verformung und (biologisch-chemischer) Korrosion unter repräsentativen Endlagerbedingungen (Druck, Temperatur, Milieu).

Dies gilt insbesondere für die Weiterführung der Überlegungen zur Einlagerung von TLB in verschiedenen Wirtsgesteinen. Das Korrosionsverhalten der Behältermaterialien, vor Allem auch der PE-Moderatorstäbe, unter den thermischen, chemischen und radiologischen Bedingungen eines Endlagers sind hierfür zu untersuchen und zu modellieren. Die mechanische Stabilität der Behälter unter besonderer Berücksichtigung des Deckeldichtsystems ist gleichermaßen validiert unter Endlagerbedingungen darzustellen und zu bewerten.

4.6.3 Forschungsbedarf hinsichtlich Bergbarkeit

Unter den endlagerrelevanten Behälterfunktionen, zu denen noch Forschungsbedarf besteht, stechen vor allem die zur Gewährleistung einer möglichen Bergung der Endlagergebinde in einem Zeitraum von bis zu 500 Jahren nach Verschluss des Endlagersystems hervor. Die hier geführten Betrachtungen sind primär bezogen auf die grundlegenden Anforderungen an eine Gewährleistung einer möglichen späteren Bergbarkeit gemäß § 14 EndlSiAnfV [70]. Eine vollständige Zusammenfassung und Quantifizierung möglicher Einwirkungen, die den zur Gewährleistung von Aerosoldichtheit, Handhabbarkeit und Identifizierbarkeit dienenden Behälterfunktionen ist erst möglich, wenn potenzielle technische Lösungsprinzipien für diese Behälterfunktionen zusammengetragen worden sind (vergleiche Abschnitt 4.1.5). Auch hier sind für eine Beurteilung einer möglichen Übertragbarkeit zunächst quantifizierbare Aussagen über eine Erfüllung der Anforderung zu stellen, verbunden mit einer durch ausstehende Erkundungsarbeiten zu erbringenden Charakterisierung der zu erwartenden Einwirkungen über den kombinierten Betriebs- und Bergbarkeitszeitraum. Allgemein besteht noch Bedarf nach entsprechenden Nachweisen.

5 Herleitung generischer Behälterkonzepte

Für die Erstellung anforderungsgerechter Behälterkonzepte wurde im Kapitel 2 des Berichtes zum Arbeitspaket 3 [4] ein mehrstufiger top-down-Ansatz hergeleitet, auf dem bereits die Methodik zum Vergleich verschiedener Behälterkonzepte und zur Untersuchung derer Übertragbarkeit im Kapitel 4 basierte. Für die Ableitung generischer Behälterkonzepte wird direkt auf den top-down-Ansatz zurückgegriffen. Demnach werden aus den allgemeinen regulatorischen Anforderungen einerseits Nutzungsphasen der Behälter abgeleitet und mit diesen dann aus den allgemeinen Anforderungen phasenabhängige Behälteranforderungen entwickelt. Dies ist im Abschnitt 2.4 des Berichtes zum Arbeitspaket 3 dokumentiert. Aus den Eigenschaften der Wirtsgesteine werden weiterhin – ebenfalls abhängig von den Nutzungsphasen – mögliche Einwirkungen auf die Behälter abgeleitet (Kapitel 3 des Berichtes zum Arbeitspaket 3). Zur Erfüllung der Anforderungen unter Berücksichtigung der Einwirkungen werden aus den Anforderungen Behälterfunktionen hergeleitet (Kapitel 6 des Berichtes zum Arbeitspaket 3). Die Summe der Behälterfunktionen – verwirklicht durch verschiedene Komponenten des Endlagergebindes – bildet dann das Behälterkonzept. Aus der Verwendung generischer Einwirkungen und Funktionen entsteht ein generisches Behälterkonzept. Eine zunehmende Validierung und Quantifizierung der Einwirkungen und Behälteranforderungen erlaubt eine fortschreitende Spezifizierung und Quantifizierung der Behälterfunktionen. Mit wirtsgesteins- und zuletzt standortabhängigen Einwirkungen können entsprechend spezifische Behälterkonzepte erstellt werden.

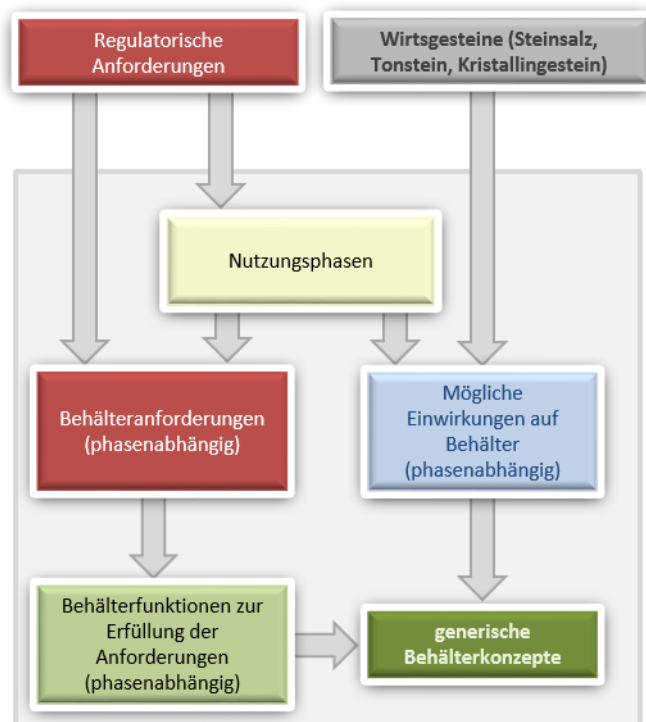


Abbildung 17:
Ausschnitt aus dem top-down-Ansatz: Erstellung generischer Behälterkonzepte

5.1 Methodik zur Erstellung von generischen Behälterkonzepten

Für die Erstellung generischer Behälterkonzepte ohne quantifizierte Behälterfunktionen genügt die Betrachtung der für die Erfüllung der Anforderungen unter generischen Einwirkungen notwendigen Behälterfunktionen. Hierzu wurde im Vorhaben „KoBrA“ folgende Methodik entwickelt:

- Aus den Behälteranforderungen werden Behälterfunktionen hergeleitet (Kapitel 6 im Bericht zum Arbeitspaket 3).
- Die Behälterfunktionen für das gesamte Behälterkonzept werden auf Teilfunktionen der Komponenten des Behälterkonzeptes heruntergebrochen. Durch die Kombination der Teilfunktionen ist die Behälterfunktion abzudecken.
- Für die verschiedenen Teilfunktionen werden entsprechend den Komponenten oder Komponentengruppen Lösungsprinzipien entwickelt. Diese Lösungsansätze

entsprechen technisch-wissenschaftlichen Lösungen für die durch die Komponenten aufgrund der zugrundegelegten Einwirkungen zu erfüllenden Funktionen.

- Die Sammlung der möglichen Lösungsansätze kann, hierarchisch geordnet nach Anforderungen, Funktionen und Teilfunktionen der Komponenten, in einer Lösungsmatrix zusammengestellt werden (siehe Tabelle 21). Die Verknüpfung verschiedener Elemente dieser Lösungsmatrix entspricht einem generischen Behälterkonzept, das geeignet erscheint die Behälteranforderungen zu erfüllen (vergleiche Abbildung 18).

Zur Ermittlung der Lösungsprinzipien werden einerseits die Ergebnisse aus der Recherche des Arbeitspaketes 1 [2] benutzt, um bereits bekannte und damit als nutzbar anzunehmende Lösungen abzudecken, andererseits können Lösungsprinzipien aus den physikalischen Hintergründen der einzelnen Teilfunktionen abgeleitet werden. Wenn alle Teilfunktionen durch die Lösungsprinzipien erfüllt werden, dann erfüllt das Behälterkonzept (Summe aller Komponenten) die Behälterfunktionen (Summe der Teilfunktionen). Das gewählte Vorgehen entspricht damit grundsätzlich dem Vorgehen wie es z.B. in den VDI-Richtlinien 2222 [137] zur methodischen Entwicklung von technischen Systemen und Produkten erläutert wird.

Behälterfunktionen			Komponenten	Lösungsprinzipien				
Teilfunktionen								
Behälteranforderungen	Funktion A	Teilfunktion A1	Komponente 1	Lösung A1a	A1b	A1c	...	A1Ω
		Teilfunktion A2	Komponente 2	Lösung A2a	A2b	A2c	...	A2Ω
		⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
		Teilfunktion An	Komponente n	Lösung Ana	Anb	Anc	...	AnΩ
	...	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
	Funktion κ	Teilfunktion κ1	Komponente 1	Lösung κ1a	κ1b	κ1c	...	κ1Ω
		Teilfunktion κ2	Komponente 2	Lösung κ2a	κ2b	κ2c	...	κ2Ω
		⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
		Teilfunktion κm	Komponente m	Lösung κma	κmb	κm _c	...	κmΩ
				⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
				⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
				⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
			⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
			⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
			⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
			⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
			⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
			⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
			⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
			⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
			⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
			⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
			⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
			⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
			⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
			⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
			⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
			⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
			⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
			⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
			⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
			⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
			⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
			⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
			⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
			⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
			⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
			⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
			⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
			⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
			⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
			⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
			⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
			⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
			⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
			⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
			⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
			⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
			⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
			⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
			⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
			⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
			⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
			⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
			⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
			⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
			⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
			⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
			⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
			⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
			⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
			⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
			⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
			⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
			⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
			⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
			⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
			⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
			⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
			⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
			⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
			⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
			⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
			⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
			⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
			⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
			⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
			⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
			⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
			⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
			⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
			⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
			⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
			⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
			⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
			⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
			⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
			⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
			⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
			⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
			⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
			⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
			⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
			⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
			⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
			⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
			⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
			⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
			⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
			⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
			⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
			⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
			⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
			⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
			⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
			⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
			⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
			⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
			⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
			⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
			⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
			⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
			⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
			⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
			⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
			⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
			⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
			⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
			⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
			⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
			⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
			⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
			⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
			⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
			⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
			⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
			⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
			⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
			⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
			⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
			⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
			⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
			⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
			⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
			⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
			⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
			⋮	⋮	⋮</			

Tabelle 21: Ansatz für die Herleitung einer Lösungsmatrix aus den Lösungsprinzipien für die aus den Behälteranforderungen abgeleiteten Behälterfunktionen. Die Matrix ist hier generisch für κ Behälterfunktionen mit n (Funktion A) bzw. m (Funktion κ) Teilfunktionen für entsprechende Behälterkomponenten und jeweils $\leq \Omega$ Lösungsprinzipien dargestellt, wobei Matricelemente auch leer bleiben können.

Bei der Verknüpfung ist darauf zu achten, dass sich gegenseitig ausschließende Lösungsprinzipien vermieden werden müssen. Ebenso müssen die Teilfunktionen der Komponenten so gewählt werden, dass die später quantifizierten Teilfunktionen insgesamt die jeweilige Mutterfunktion abdeckend erfüllen.

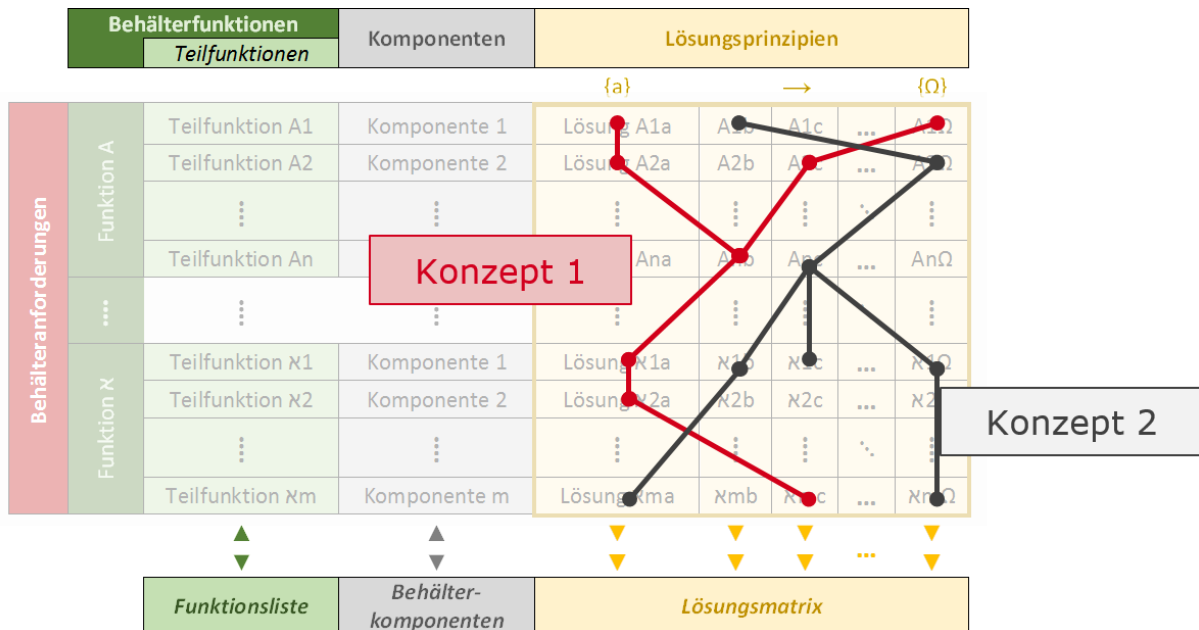


Abbildung 18: Erstellung von verschiedenen generischen Behälterkonzepten durch die Verknüpfung der Teilfunktionen in der Lösungsmatrix. Durch Einlegen eines Pfades können die eingetragenen Lösungsprinzipien zu Gesamtlösungen bzw. generischen Behälterkonzepten kombiniert werden.

5.2 Behälterfunktionen zur Erfüllung der Anforderungen

Die im Arbeitspaket 3 hergeleiteten wesentlichen Behälterfunktionen lassen sich wie folgt auflisten und charakterisieren:

- **Sicherer Einschluss:** Das Endlagergebinde muss die Freisetzung radioaktiver Stoffe verhindern. Diese Einschlussfunktion muss vom Gebinde so lang erfüllt werden, bis gegebenenfalls die geologische Barriere im Zusammenwirken mit geotechnischen Barrieren diese Funktion vollumfänglich übernehmen kann, mindestens jedoch bis zum Ende der Bergbarkeitsphase. Die Einschlussfunktion umfasst die Gewährleistung der Integrität gegen mechanische Lasten (*mechanische Stabilität*) und biologisch-chemische Einwirkungen (*Korrosionsbeständigkeit*) sowie den *dichten Verschluss* der Gebinde.
- **Abschirmung:** Der Behälter muss das Strahlungsfeld der konditionierten radioaktiven Abfälle, gegebenenfalls unter Verwendung weiterer technischer Hilfsmittel wie z. B. Abschirm- oder Transferbehältern, ausreichend abschirmen, um während Transport- und Handhabungsmaßnahmen den Schutz des eingesetzten Personals zu gewährleisten und nach dem Versatz eine Schädigung der weiteren Barrieren zu vermeiden. Es müssen Neutronen und ionisierende Strahlung (weitestgehend Photonen) abgeschirmt werden.
- **Kritikalitätsausschluss:** Eine selbsterhaltende nukleare Kettenreaktion ist zu verhindern.
- **Temperaturbegrenzung:** Zur Vermeidung einer Schädigung technischer, geotechnischer oder geologischer Barrieren sowie zum Schutz des eingesetzten Personals während Transport- und Handhabungsmaßnahmen muss die Temperatur am Endlagergebinde begrenzt werden. Als Maß für eine zu gewährleistende Wärmeabfuhr können die Temperaturgrenzwerte in der Abfallmatrix (abdeckend 390 °C, siehe Tabelle 10) bzw. an der Gebindeoberfläche während Transport (50 °C

an berührbaren Oberflächen, siehe auch Abschnitt 3.2.5) und nach der Einlagerung (allgemein 100 °C, siehe Tabelle 11) dienen. Während der Handhabungs- und Transportmaßnahmen ($\Delta T \leq 340$ K) erfolgt der hierfür notwendige Wärmetransport über Wärmeleitung, Wärmestrahlung und Konvektion. Nach der Einlagerung ($\Delta T \leq 290$ K) erfolgt der Wärmetransport aus dem Gebinde über Wärmeleitung.

- Begrenzung von Korrosion und Gaserzeugung: Korrosionsprozesse können die strukturelle Integrität der Endlagergebinde kompromittieren (s. o. Sicherer Einschluss). Bei der Korrosion sowie bei chemischer, thermischer und radiologischer Zersetzung organischer Stoffe entstehen Gase. Zur Vermeidung von Gasdrücken, die die technischen, geotechnischen und geologischen Barrieren schädigen können und zur Ausbildung einschlussgefährdender Gastransportpfade führen können, ist die Gasproduktion im Endlagersystem zu minimieren. Neben einer Minimierung der Korrosion umfasst dieser Punkt auch die Minimierung organischer Materialien sowie die Begrenzung von Temperaturen und Dosisleistung im Behälternahfeld sowie die Begrenzung von Diffusionsvorgängen im Behälterumfeld. Daher sind grundlegende Entscheidungen zu eingesetzten Materialien hier relevant.
- Handhabbarkeit: Die Handhabbarkeit der Gebinde ist für Transport und Einlagerung sowie für eine mögliche spätere Rückholung oder Bergung zu gewährleisten. Dabei ist das Zusammenwirken mit Handhabungsgeräten zu beachten. Zur Handhabung müssen die Endlagerbehälter über Lastanschlagpunkte verfügen. Dabei sind Lastanschlagpunkte für die Einlagerung und für Rückholung bzw. Bergung vorzusehen. Auch eine grundlegende Entscheidung über die Behältergeometrie kann unter diesem Punkt getroffen werden.

5.3 Erstellung einer Lösungsmatrix

Aufbauend aus diesen Betrachtungen zu den wesentlichen Behälterfunktionen lässt sich eine exemplarische Lösungsmatrix erstellen. Hierzu werden zur Erfüllung der Teilfunktionen durch die Behälterkomponenten stichpunktartig exemplarische Lösungsprinzipien gesammelt.

5.3.1 Sicherer Einschluss

Mechanische Stabilität

- (Komponente Behälterkörper): Wahl geeigneter Materialien (vergleiche Abbildung 31) und Wanddicke (Bsp.: *Nagra-Referenzkonzept, UFC-II*)
- (Komponente Behälterkörper): Ausführung eines Doppelhüllenbehälters mit einer Hülle speziell auf mechanische Stabilität ausgelegt (Bsp.: *KBS-3, POLLUX®*)
- (Komponente technische Hilfsmittel): stabile Verrohrung um die Endlagerbehälter (Bsp.: *Andra-Konzept, BSK-3*)
- (Komponente technische Hilfsmittel): stabile Umverpackung (Bsp.: *belgischer Supercontainer*)

Chemische Beständigkeit

- (Komponente Behälterkörper): Wahl geeigneter Materialien und Wanddicke (Bsp.: *Nagra-Referenzkonzept*)
- (Komponente Behälterkörper): Auftragen einer dünnen Korrosionsschutzschicht (Bsp.: *UFC-II, UOS*)
- (Komponente Behälterkörper): Ausführung mit einem umhüllenden Korrosionsschutz (Außenhülle) (Bsp.: *KBS-3, UOS*)

- (Komponente Umgebung): Beeinflussung des hydrochemischen Milieus durch hohen pH-Wert (Bsp.: *belgischer Beton-Supercontainer, Einbringung von Beton und MgO in britischen Konzeptstudien*)

Dichter Verschluss

- (Komponente Deckel): Stoffschluss – dichtes Verschweißen (geeignete Materialwahl, geeignetes Verfahren) (Bsp.: *alle betrachteten Endlagerbehälterkonzepte; Primärdeckel beim POLLUX[®]*)
- (Komponente Deckel): Stoffschluss – Kleben (geeignete Materialwahl)
- (Komponente Deckel): Stoffschluss – Löten (geeignete Materialwahl, geeignetes Verfahren)
- (Komponente Deckel): Formschluss – selbstabdichtender Deckel
- (Komponente Deckel): Kraftschluss – Verschrauben, Verwendung von Dichtringen (Bsp.: *Sekundärdeckel POLLUX[®], verschiedene TLB*)
- (Komponente Deckel): Kraftschluss – Schraubverschluss (geeignete Materialwahl, geeignete Fertigung)
- (Komponente Deckel): Kraftschluss – Klemmverschluss
- (Komponente Behälterkörper): Stoffschluss – heißisostatisches Verpressen (geeignete Materialwahl, geeignete Fertigungstechnologie) (Bsp.: *keramische Behälterkonzepte; massiv-kupferner KBS-2-Behälter [7]*)

5.3.2 Abschirmung

Die Abschirmungswirkung des Behälters kann sowohl schwach abschirmend ausgelegt werden (geringe Wandstärke) als auch ausreichend bzw. nicht ausreichend abgeschirmt für Handhabungs- und Transportvorgänge.

- (Komponente Behälterkörper): (γ -)Photonenfeldabschirmung durch hoch-Z-Materialien³ (geeignete Materialwahl, Wanddicke)
- (Komponente Behälterkörper): Neutronenfeldabschirmung durch absorbierende Materialien (Bsp.: *amerikanische Konzepte mit Borstahlplatten*)
- (Komponente Behälterkörper): Moderatormaterialien zur Verstärkung der Neutronenabsorption im Material (geeignete Materialwahl) (Bsp.: *POLLUX[®], BSK-3, CASTOR[®]*)
- (Komponente Inventar): Verfüllung mit photonenabsorbierendem (hoch-Z-Metalle wie Blei etc.) bzw. neutronenabsorbierendem (Bor, Gadolinium) Material
- (Komponente Inventar): Begrenzung des Inventars pro Gebinde

5.3.3 Kritikalitätsausschluss

- (Komponente Inventar): Begrenzung der Beladung
- (Komponente Inventar): Kontrolle der Beladung (Mindestabbrand, Beladungskurven)
- (Komponente Inventar): Verfüllung mit nichtmultiplizierenden bzw. absorbierenden Stoffen (z. B. Magnetit, abgereichertes Uran in DIREGT-Studie, Gadoliniumoxid)
- (Komponente Inventar): geometrischer Kritikalitätsausschluss
- (Komponente Inventar): Verdichtung des Inventars durch Einlagerung gezogener Brennstäbe (Verringerung möglicher Moderatorvolumina)
- (Komponente Behälterkörper): Begrenzung moderierender bzw. reflektierender Materialien und Materialzusätze im Behälterkörper (Bsp.: *KBS-3*)

³ Elemente hoher Ordnungszahl wie z. B. Cadmium (Z = 48), Wolfram (Z = 74) oder Blei (Z = 82)

5.3.4 Temperaturbegrenzung

- (Komponente Inventar): Begrenzung der Beladung (*Bsp.: alle betrachteten Konzepte*)
- (Komponente Behälterkörper): Vergrößerung der Oberfläche (Vergrößerung der abstrahlenden oder ableitenden Oberfläche bzw. des Wärmeüberganges)
- (Komponente Behälterkörper): geeignete Materialwahl (hohe Wärmeleitfähigkeit, siehe Abbildung 30, geringe Wärmekapazität)
- (Komponente Behälterkörper): Oberflächenbehandlung (Vergrößerung der Emissivität zur Wärmeabstrahlung vor der Einlagerung z. B. durch Anstrich)
- (Komponente Behälterkörper): Minimierung der Behälterwanddicke (Verkleinerung des Temperaturgradienten und des Wärmewiderstandes)

5.3.5 Begrenzung der Korrosion und Gasproduktion

Begrenzung der Korrosion – siehe „chemische Beständigkeit“, unter „Sicherer Einschluss“ oben

Begrenzung der Gasproduktion

- Vermeidung bzw. Minimierung organischer Stoffe im Endlagersystem
- Begrenzung der Temperatur (siehe Temperaturbegrenzung oben)
- Begrenzung der Dosisleistung in Bereichen mit radiolytisch zersetzbarem Material (z. B. organische Materialien) bzw. an der Gebindeoberfläche (siehe Abschirmung oben)

5.3.6 Handhabbarkeit

Lastanschlagpunkte

- (Komponente Behälterkörper): Tragzapfen anbringen (*Bsp.: POLLUX[®], TLB CASTOR[®]*)
- (Komponente Deckel): Tragpilz anbringen (*Bsp.: Nagra-Referenzkonzept für Kokillen*)
- (Komponente Deckel): Hinterschneidung am Deckel (*Bsp.: KBS-3, Andra-Konzept, Nagra-Referenzkonzept für BE*)
- (Komponente Behälterkörper): Tragringe (*Bsp.: generische ENTRIA-Behälter [138]*)
- (Komponente Behälterkörper): robust ausgelegter Behältermantels als Anschlagpunkt

Lastanschlagpunkte für Rückholung und Bergung

Für Anschlagpunkte an Endlagerbehältern ist ein Sicherheitsnachweis zu führen. Eventuell kann dieser für die Zeiträume der Rückholung und Bergung nicht mehr geführt werden, sodass sich die Notwendigkeit weiterer geeigneter Anschlagpunkte am Behälter ergibt. Die Lösungsprinzipien können hier von den Lastanschlagpunkten für die Einlagerung übernommen werden und sind entsprechend robust auszulegen.

Geometrie

- (Komponente Behälterkörper): Zylindrischer Behälterkörper (*Mehrzahl aller Konzepte*)
- (Komponente Behälterkörper): kapselförmiger Behälterkörper (*Bsp.: UFC-II, keramischer Andra-Behälter für Kokillen*)
- (Komponente Behälterkörper): prismatischer Behälterkörper

5.4 Exemplarische Lösungsmatrix

In der nachfolgenden Tabelle 22 sind nach dem in Tabelle 21 dargestellten Schema einige exemplarische Lösungsprinzipien aus Abschnitt 5.3 als Lösungsmatrix aufgetragen. Dabei sind Verweise auf andere Funktionen (z. B. → A), Teilfunktionen (z. B. → A2) und komponentenspezifische Lösungsprinzipien (z. B. → A2.3) gekennzeichnet, wobei die vereinfachte Nummerierung der Komponenten im Gesamtschema einheitlich ist.

Funktion		Teilfunktionen	Komponente	Lösungsprinzipien (exemplarische Auswahl)												
A	Sicherer Einschluss	A1: Mechanische Stabilität	1 – Behälterkörper	Lastabtrag durch Behälter selbst		Lastabtrag durch zusätzliche Hülle (Doppelhüllenbehälter)										
			3 – Material und Wand	Auslegung gegen mech. Lasten (Bruch)		Auslegung gegen mechanische Lasten (Verformungen)		Auslegung gegen Kriechdehnung		Minimierung thermischer Spannungen						
			5 – technische Hilfsmittel	stabile Verrohrung um die Gebinde (Versatz)		stabile Umverpackung (Handhabung & Betrieb)										
		A2: Chemische Stabilität	1 – Behälterkörper	Begrenzung der Strahlungsdosisleistung (→B)		Begrenzung der Temperatur (→ D)										
			2 – Deckel 3 – Material und Wand	Oberfläche minimieren		Behälter- material		Hülle		Beschichtung		keine		Wandstärke		Kontrolle von Schweißnähten
										dick	dünn					
		6 – Umgebung	Einstellung eines hohen pH-Wertes		Minimierung mikrobieller Aktivität		Begrenzung des Edukt-transportes									
		A3: Dichter Verschluss	2 – Deckel	Kraftschluss				Stoffschluss				Formschluss				
Schraub- verschluss	Verschrauben			Klemmverschluss		Kleben		Schweißen		selbstdichtender Formschluss						
B	Abschirmung ionisierender Strahlung	B0: Abschirmung allgemein	1 – Behälterkörper	selbstabschirmend nach Betriebsvorgaben		gering abschirmend zum Schutz der Barrieren		nicht abschirmend								
			3 – Material und Wand	dickwandiger Metallbehälter		dünnwandiger Metallbehälter										
			4 – Inventar	Begrenzung des Inventars		Verfüllung mit absorbierendem Material										
			5 – technische Hilfsmittel	Transfer- bzw. Abschirmbehälter		Spezialfahrzeuge mit Transfer- bzw. Abschirmbehältern										
		B1: Neutronen-Abschirmung	3 – Material und Wand	dickwandiger Metallbehälter		Moderatormaterial für effizientere Absorption										
C	Kritikalitäts- ausschluss	C0: Ausschluss der Kritikalität	1 – Behälterkörper	Dichtheit (→ A)		Stabilität der Geometrie (→ A1)										
			3 – Material und Wand	Vermeidung / Minimierung moderierender bzw. reflektierender Materialien und Legierungsbestandteile												
			4 – Inventar	Begrenzung des Inventars / Beladekurven		Verfüllung mit neutronenabsorbieren den Materialien		unterkritische Geometrie		Zerlegung der Brennelemente (Minimierung möglichen Moderatorvolumens)						

Funktion		Teilfunktionen	Komponente	Lösungsprinzipien (exemplarische Auswahl)				
D	Temperaturbegrenzung	D0: Temperaturbegrenzung allgemein	1 – Behälterkörper	Oberfläche maximieren				
			3 – Material und Wand	Wärmewiderstand der Behälterwand minimieren				
				Wärmeleitung verbessern	Wandstärke minimieren			
		4 – Inventar	Begrenzung des Inventars	Verfüllung mit gut wärmeleitendem Material				
		D1: Begrenzung der Temperaturen in der Betriebsphase	1 – Behälterkörper	äußere Kühlung				
			3 – Material und Wand	Oberflächenbehandlung oder -beschichtung (Emissivität erhöhen)				
			5 – technische Hilfsmittel	Transfer- bzw. Abschirmbehälter	Spezialfahrzeuge mit Transfer- bzw. Abschirmbehältern			
D2: Begrenzung der Temperaturen zum Schutz der Barrieren	6 – Umgebung	Wärmeübergang maximieren	Wärmewiderstand geotechnischer Barrieren minimieren (→ D0.3)	Verwendung temperaturresistenter Materialien (z. B. Sand)				
E	Begrenzung von Korrosion und Gasproduktion	E1: Begrenzung der Korrosion → A2						
		E2: Begrenzung der Gasproduktion	1 – Behälterkörper	Begrenzung der Strahlungsdosisleistung (→B)	Begrenzung der Temperatur (→ D)			
			3 – Material und Wand	Minimierung / Vermeidung organischer Stoffe				
			6 – Umgebung	Minimierung / Vermeidung organischer Stoffe	Minimierung mikrobieller Aktivität			
F	Handhabbarkeit	F1: Begrenzung der Temperaturen zum Schutz des Personals →D0, D1						
		F2: Abschirmung der Strahlung zum Schutz des Personals → B						
		F3: Lastanschlagpunkte für Einlagerung	1 – Behälterkörper	Tragzapfen / Tragpilz	Tragring	Behältermantel	Tragmulde / Hinterschneidung	
		F4: Lastanschlagpunkte für Rückholung u./o. Bergung	1 – Behälterkörper	Tragzapfen / Tragpilz	Tragring	Behältermantel	Tragmulde / Hinterschneidung	
		F5: Geometrie	1 – Behälterkörper	Zylinder	Kapsel	Prisma		

Tabelle 22: Exemplarische Matrixdarstellung von zur Erfüllung der hergeleiteten Behälterfunktionen gesammelten Lösungsprinzipien (Lösungsmatrix)

Aufgrund möglicher weiterer Entwicklungen oder (noch) nicht erfasster Lösungsansätze empfiehlt es sich, in vollständigen Lösungsmatrizen bis zum Übergang von generischen zu wirtsgesteinsspezifischen Behälterkonzepten je Zeile noch ein Lösungsprinzip „weitere“ als „*fall-back option*“ einzuführen. Im Zusammenhang der Konzeptentwicklung entspräche dies dem Schweizer Prinzip einer spätestmöglichen Detailfestlegung mit dem Ziel einer technisch optimalen Lösung [139].

5.4.1 Vor- und Nachteile ausgewählter Lösungsprinzipien

Die in Tabelle 22 zusammengetragenen exemplarischen Lösungsprinzipien für die Erfüllung der Teilfunktionen stellen allgemein eine Sammlung *möglicher* Lösungen dar. Viele der genannten Lösungsprinzipien haben sowohl Vor- als auch Nachteile für die Gesamterfüllung der Behälterfunktionen, weshalb eine Gewichtung der Teilfunktionen bzw. eine Optimierung der Behälterkonzepte (siehe Abschnitt 5.6) notwendig ist. Für ausgewählte Lösungsprinzipien sollen in der folgenden Übersicht Vor- und Nachteile dargestellt werden.

Zeile in der Lösungsmatrix (Tabelle 22)	Lösungsprinzip	Vorteile	Nachteile
→ A2.2/3	(Gebinde-) Oberfläche minimieren	verringert Korrosion und Gaserzeugung; verringert Gebindeabmessungen	schränkt mögliche Wanddicken und Gebindeabmessungen ein (nachteilig für Abschirmung bzw. Logistik)
→ A3.2	Kraftschluss: Schraubverschluss	einfache Fertigung (Gewinde schneiden); einfacher Verschluss möglich	bei Großbehältern unerprobt; Langzeitdichtheit nachzuweisen;
	Kraftschluss: Klemmverschluss	einfacher Verschluss möglich	
	Stoffschluss: Kleben bzw. Löten		Zuverlässigkeit der Dichtheit bei Metallteilen nachzuweisen; Auflösung unter thermischen bzw. chemischen Lasten zu erwarten
	Formschluss: selbstdichtender Formschluss		sehr hohe Anforderungen an Fertigung und Qualitätskontrolle; empfindlich gegen mech. Verformung oder thermische Ausdehnung
→ B0.1	nicht abschirmender Behälter	leichtere Behälter möglich	erfordert technische Hilfsmittel für Handhabung, Transport etc.; erschwert Rückholung und Bergung
→ B0.4 → C0.4 → D0.4	Verfüllen von Hohlräumen im Behälterinneren	bessere Wärmeabfuhr von BE/ Brennstäben an die Behälterwand; höhere mechanische Stabilität des Inventars; mögliches Einbringen von Neutronenabsorbern; bessere Abschirmung ionisierender Strahlung;	Erhöhung der Gebindemasse; zuverlässig gleichmäßige Verfüllung von Hohlräumen nachzuweisen; bei Verfüllen mit flüssigen Metallen: Einhaltung von Grenztemperaturen an der Abfallmatrix nachzuweisen; bei Verschütten mit Granulat, Pulver etc. mechanische Lasten durch notwendiges Rütteln der Gebinde
→E2.3/6	Vermeiden/ Minimierung organischer Stoffe	verringert Gasproduktion; verringert mikrobielle Aktivität	Wegfall gebräuchlicher Moderatormaterialien
→F5.1	Geometrie: prismatisch (siehe Abbildung 19)	Verbesserungen in Handhabung, Transport und Lagerung möglich	Kanten nachteilig für die Ableitung mechanischer Spannungen

Tabelle 23: Vor- und Nachteile ausgewählter Lösungsprinzipien aus Tabelle 22

Zur Verdeutlichung der Vor- und Nachteile alternativer Geometrien sind in Abbildung 19 verschiedene denkbare prismatische Geometrien schematisch dargestellt. Für eine Beladung der Behälter mit gezogenen Brennstäben etwa wäre eine trigonale oder hexagonale

Behältergeometrie vorstellbar, für die Beladung mit Brennelementen (aus DWR oder SWR) wäre aufgrund derer grob quaderförmigen Geometrie ein ebenso quaderförmiger Behälter möglich. Diese alternativen Geometrien würden rein geometrisch das Volumen des Inventars für die jeweilige Abfallform minimieren. Allerdings würden mechanische Lasten bei solchen Gebinden zu großen Spannungen im Bereich der Kanten führen.

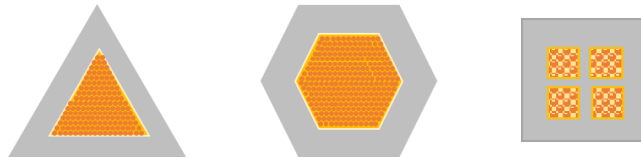


Abbildung 19: Mögliche alternative Behältergeometrien: Für die Beladung mit gezogenen Brennstäben würden sich z. B. trigonale oder hexagonale Prismen anbieten (l., m.), während für eine Beladung mit Brennelementen auch quaderförmige Behälter (quadratische Prismen) infragekämen (r.)

Die rechts gezeigte quaderförmige Gebindeform kommt in verschiedenen Gebindetypen für schwach- und mittelaktive Abfälle z. B. in Deutschland (Endlagergebinde für das Endlager Konrad) oder der Schweiz [65] vor.

Auch die für mehrere Behälterfunktionen – Einschluss der Abfälle, Abschirmung der Strahlung, Begrenzung der Temperaturen und Handhabbarkeit – wesentliche Auslegung der Behälterwand bzw. des Behälterkörpers gestattet eine Vielzahl an möglichen Lösungen, die mit Vor- und Nachteilen verbunden sind. In Abbildung 20 sind mögliche Behälterwandkonzepte – dünnwandige und dickwandige Behälter, Behälter mit einer oder zwei Hüllen, mit und ohne Beschichtung – schematisch dargestellt. Allgemein hat eine dickere Behälterwand den Vorteil einer besseren Abschirmung. Auch die Einschlussfunktion wird positiv beeinflusst, da sowohl die Widerstandsfähigkeit gegen mechanische Lasten steigt als auch ein Waddickenzuschlag als Sicherheitsmarge gegen Korrosionsverluste vor einem möglichen mechanischen Versagen. Nachteile großer Wandstärken sind die eine Handhabung erschwerende größere Gebindemasse sowie der größere Wärmewiderstand, der zu höheren Temperaturdifferenzen zwischen Abfallmatrix und Gebindeoberfläche führt und die Einhaltung der jeweiligen Grenzwerte (Tabelle 10 bzw. Tabelle 11) erschwert.

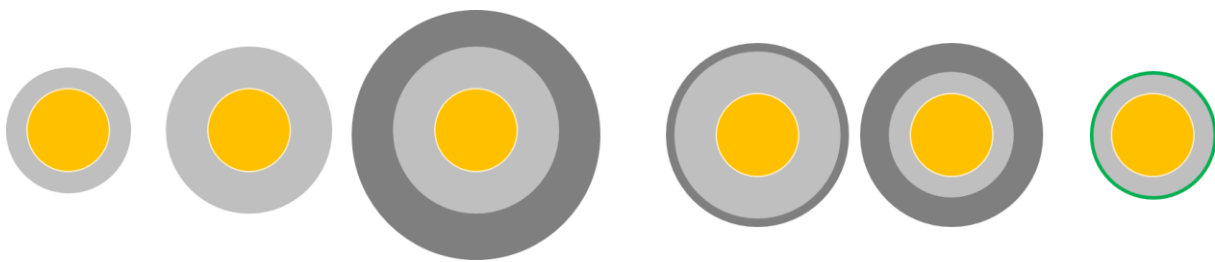


Abbildung 20: Mögliche Gestaltung der Behälterwand um das Inventar (●), schematisch v. l. n. r.: dünnwandiger Behälter, dickwandiger Behälter, dicke Doppelhülle, verschiedene Doppelhüllen (innen dick, außen dünn – innen dünn, außen dick), beschichteter dünnwandiger Behälter.

5.4.2 Anwendung auf vorhandene Behälterkonzepte

Aus der in Tabelle 22 aufgeführten exemplarischen Sammlung von Lösungsprinzipien für die verschiedenen Teilfunktionen lassen sich nach dem in Abbildung 18 gezeigten Schema durch die Verknüpfung verschiedener Lösungsprinzipien generische Behälterkonzepte erstellen. Dabei kann auch auf die im Arbeitspaket 1 ermittelten Behälterkonzepte (siehe Tabelle 1) zurückgegriffen werden, die in ihrer Auslegung ebenfalls als für das jeweilige Wirtsgestein optimierte Kombinationen von Lösungsprinzipien der verschiedenen Teilfunktionen darstellbar sind. Diese Behälterkonzepte sind, nach dem bereits in Abbildung 19 und Abbildung 20

verwendeten vereinfachten Schema, nachfolgend nochmals kurz dargestellt und auf die Anwendung der in Tabelle 22 gesammelten Lösungsprinzipien skizziert..

5.4.2.1 Behälterkonzepte für das Wirtsgestein Kristallin

Vorhandene Behälterkonzepte für die Endlagerung Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle in Kristallingesteinen (siehe Abschnitt 2.1; Schemata in Abbildung 21) sind aufgrund der vorgesehenen wasserführenden Wirtsgesteine allesamt auf eine möglichst große Korrosionsresistenz hin ausgelegt, was, zusammen mit der Vermeidung organischer Stoffe, auch der Minimierung der Gasproduktion dient. Die Umhüllung mit verdichtetem Bentonit als *buffer* bzw. Supercontainer begrenzt darüber hinaus die Diffusion von Edukten an die Gebindeoberflächen und begrenzen so mittel- und langfristig chemische Reaktionen an der Oberfläche. Die Behälter sind dickwandige Doppelhüllenbehälter, ausgenommen den dünnwandigen kanadischen UFC-II (Abbildung 21 r.) und einer UOS-Variante mit einer einzigen dicken Hülle (Abbildung 21 4.v.l.). Ausgenommen die UOS-Variante mit erlaubter Korrosion (Abbildung 21 m.), einen dickwandigen Doppelhüllenbehälter aus Gussstahl und Edelstahl, weisen alle Behälterkonzepte eine Korrosionsschutzschicht zwischen 3 mm (UFC-II) und 50 mm (KBS-3, Abbildung 21 l.) auf, aus Kupfer bzw. Kupfer oder Titan (UOS). Zur Verbesserung der Handhabung dient bei den UOS-Varianten und beim UFC-II ein Bentonit-Supercontainer, bei letzterem auch mit der Aufgabe, die Oberfläche vor mechanischen Schäden zu schützen.

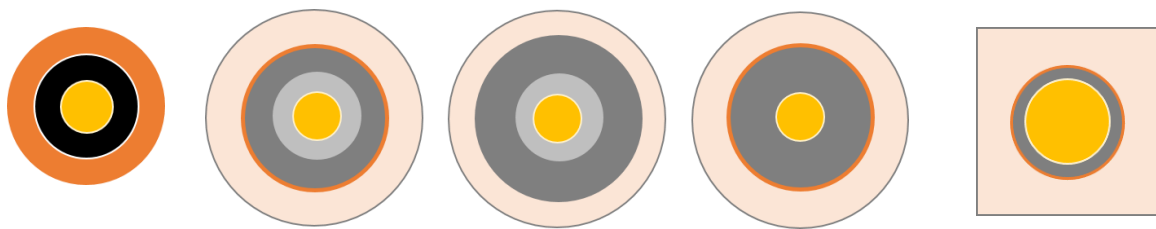


Abbildung 21: Schematische Darstellung der in Tabelle 1 aufgeführten Behälterkonzepte für Kristallingestein, v. l. n. r.: KBS-3-Behälter (Inventar ● BE, innen ● Gusseisen, massive ● Kupferhülle), drei verschiedene UOS-Varianten (● BE, 2.v.l. ● Edelstahlbehälter mit kupferbeschichteter ● Gussstahlhülle, 3.v.l. dünner Edelstahlbehälter mit dicker Gussstahlhülle, 4.v.l. Gusstahlbehälter mit Kupferbeschichtung) im Bentonit-Supercontainer mit Stahl-liner, UFC-II-Behälter (● BE in Gussstahlbehälter mit Kupferbeschichtung) im Bentonit-Supercontainer mit Stahl-liner („buffer box“). Darstellungen sind nicht maßstäblich.

Keines der Gebinde ist ausreichend abgeschirmt für Handhabung oder Transport ohne technische Hilfsmittel. Der dichte Verschluss erfolgt allgemein durch Verschweißen. Kritikalitätsausschluss und Temperaturbegrenzung werden über die Begrenzung der Beladung und (beim KBS-3) die Kontrolle der Legierungszusammensetzung im Behälterkörper gewährleistet. Als Handhabungshilfen sind die KBS-3-Behälter mit Hinterschneidungen am Deckel versehen. Bei UOS und UFC-II werden die zylindrischen bzw. quaderförmigen Supercontainer mit einem Stahlliner umgeben.

5.4.2.2 Behälterkonzepte für das Wirtsgestein Tonstein

Die vorhandenen Behälterkonzepte für die Endlagerung Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle in Tonsteinformationen (siehe Abschnitt 0; Schemata in Abbildung 22) bestehen allgemein aus Stahl. Das Wirtsgestein enthält wässrige Lösungen, bildet aber in den betrachteten Endlagerkonzepten eine wirksame Barriere. Eine Korrosionsresistenz wird im schweizerischen Konzept (Abbildung 22 m.) durch eine größere Wandstärke erreicht, in anderen beiden Konzepten wird nur eine begrenzte Korrosionsresistenz gefordert. Die robusten Behälter tragen mechanische Lasten durch den Behälterkörper ab, im französischen Konzept (Abbildung 22, l.) besteht darüber hinaus eine stabile Verrohrung der Einlagerungsbereiche (im Schema nicht aufgeführt). Beim belgischen Supercontainer (Abbildung 22, r.) dient der Betonkörper der mechanischen Stabilität

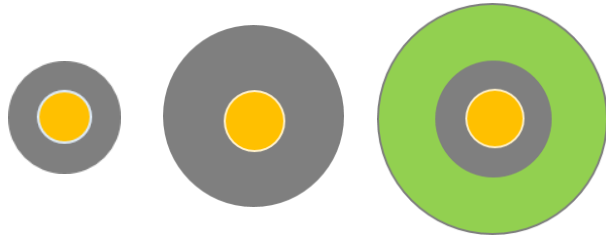


Abbildung 22:

Schematische Darstellung der in Tabelle 1 aufgeführten Behälterkonzepte für Tonstein, v. l. n. r.: Andra-Behälter (Inventar ● Kokille, ● Stahlhülle), Nagra-Referenzkonzept (● BE/Kokille, mit dicker Stahlhülle) und belgischer Supercontainer (● BE/Kokille mit Stahlhülle und massivem ● Betonkörper). Darstellungen sind nicht maßstäblich.

und der Begrenzung der Korrosion durch die Schaffung eines hohen pH-Wertes in der Umgebung der Gebinde. Der dichte Einschluss erfolgt auch hier allgemein durch Verschweißen der Stahlbehälter. Keines der dargestellten Gebinde ist ausreichend abgeschirmt für Handhabung und Transport ohne technische Hilfsmittel. Bei den französischen und schweizerischen Gebinden dienen Hinterschneidungen am Deckel als Handhabungshilfen. Kritikalitätsausschluss und Temperaturbegrenzung werden auch hier durch die Begrenzung des Inventars bzw. über die Einhaltung entsprechender Mindestabklingzeiten (Beladekurve) gewährleistet. Zur Verringerung der Gasproduktion wird die Anwesenheit organischer Materialien vermieden.

5.4.2.3 Behälterkonzepte für das Wirtsgestein Steinsalz

Die betrachteten Behälterkonzepte für das Wirtsgestein Salz (Abschnitt 2.3; Abbildung 23) bestehen aus Stahl bzw. Stahl und Gusseisen. Der sichere Einschluss wird beim POLLUX®-Konzept (Abbildung 23, r.) durch die verschweißte innere Hülle gewährleistet, bei der Brennstabkokille (Abbildung 23, l.) durch die verschweißte Stahlhülle. Die mechanische Stabilität wird beim POLLUX® durch die äußere Hülle gewährleistet, bei der Brennstabkokille

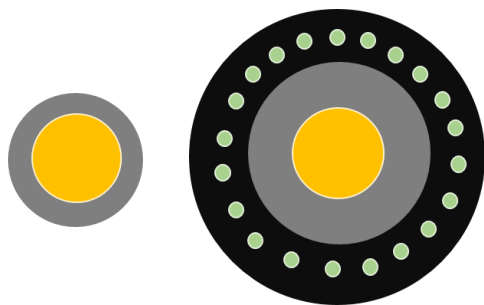


Abbildung 23:

Schematische Darstellung der in Tabelle 1 aufgeführten Behälterkonzepte für Steinsalz: l. Brennstabkokille (Inventar ● gezogene Brennstäbe, ● Stahlhülle), r. POLLUX® (● gezogene Brennstäbe, dickwandiger Stahlbehälter, dickwandiger äußerer ● Gusseisenbehälter mit ● Moderatorstäben). Darstellungen sind nicht maßstäblich.

durch eine robuste Verrohrung der Einlagerungsbohrlöcher (im Schema nicht mit aufgeführt). Ein Korrosionsschutz wird in beiden Konzepten nicht veranschlagt, allerdings verfügt das POLLUX®-Konzept aufgrund der großen Wandstärken der beiden Hüllen über eine Korrosionsbarriere. Die Brennstabkokille ist nicht abgeschirmt und muss für Transport- und Handhabungsvorgänge in Transfer- und Abschirmbehältern verpackt werden. Der POLLUX®-Behälter ist auf eine für Transport und Handhabung ausreichende Abschirmwirkung hin ausgelegt. Erreicht wird dies durch die große Wanddicke beider Hüllen sowie das

Einbringen von Moderatorstäben in der äußeren Hülle. Kritikalitätsausschluss und Temperaturbegrenzung erfolgen durch die Begrenzung des Inventars. Die Einlagerung gezogener Brennstäbe anstelle von Brennelementen verkleinert darüber hinaus mögliche Moderatorvolumina und trägt so zum Kritikalitätsausschluss bei. Die im Steinsalz anzunehmende geringe Korrosion begrenzt die Gasproduktion. Der Einfluss des organischen Moderatormaterials auf die Gasproduktion wie auf die Langzeitsicherheit ist zu untersuchen. Für die Handhabung sind die Brennstabkokillen mit einem am Deckel angeschweißten Tragepilz, der POLLUX® mit am Behälterkörper angeschraubten Tragzapfen ausgestattet.

5.4.2.4 Transport- und Lagerbehälter (TLB)

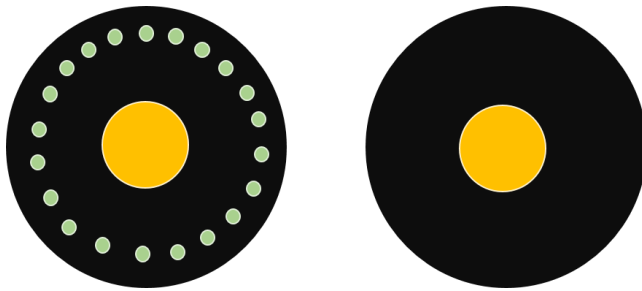


Abbildung 24:
Schematische Darstellung von TLB-Konzepten (Inventar ● BE/Kokillen), hier sehr dickwandige Behälter aus ● Gusseisen, l. mit ● Moderatorstäben (Typ CASTOR®), r. ohne Moderatorstäbe. Darstellungen sind nicht maßstäblich.

Die vorhandenen TLB-Konzepte (Abschnitt 0; Abbildung 24) bestehen allgemein aus Gusseisen. Zur Begrenzung von Korrosionsprozessen an der Gebindeoberfläche dient ein Schutzanstrich. Mechanische Lasten aus Handhabung und Transport werden durch am Behälterkörper verschraubte Tragzapfen abgetragen. Der dichte Verschluss während Transport und Lagerung wird durch verschraubte Doppeldeckelsysteme mit Dichtringen aus Metallfedern und aus Polymeren gewährleistet. Die TLB sind ausreichend abgeschirmt für Handhabung und

Transport. Zur Verbesserung der Abschirmwirkung gegen Neutronen verfügen die TLB der CASTOR®-Familie (Abbildung 24, l.) über in die Hülle eingelassene Moderatorstäbe. Der Kritikalitätsausschluss erfolgt durch Begrenzung der Beladung und eine unterkritische Geometrie des Inventars sowie den dichten Einschluss (Verhinderung des Eindringens von Wasser oder wässrigen Lösungen). Die Temperaturbegrenzung erfolgt ebenfalls durch die Begrenzung des Inventars, darüber hinaus erfolgt gegebenenfalls eine passive Kühlung durch außen angebrachte Kühlrippen. Eine Begrenzung der Gasproduktion an der Gebindeoberfläche ist im Zustand der Zwischenlagerung wenig problematisch und wird, wie Korrosion, durch Inspektionen der Oberfläche vermieden. Als Handhabungshilfen sind am Behälterkörper Tragzapfen angeschraubt.

5.5 Erstellung generischer Behälterkonzepte

Basierend auf den im Arbeitspaket 3 ermittelten Behälterfunktionen (Kapitel 6 im dazugehörigen Bericht [4]) für Endlagerkonzepte in den drei potenziellen Wirtsgesteinen und den für diese Funktionen in Tabelle 22 exemplarisch zusammengestellten Lösungsvorschlägen sollen nun generische Behälterkonzepte für die drei potenziellen Wirtsgesteine erstellt werden. Dabei werden diese Behälterkonzepte lediglich als generische Skizzen schematisch veranschaulicht. Auch wird der Versuch unternommen, jeweilige Variationsmöglichkeiten zu beschreiben. Letzten Endes wird eine Abweichung der im Folgenden beschriebenen Gewichtungen der Behälterfunktionen immer zu anderen Kombinationen von Lösungsansätzen führen. Auch werden in dieser Zusammenstellung möglicher generischer Behälterkonzepte die zur Erfüllung der Sicherheitsanforderungen abgeleiteten Behälterfunktionen zugrunde gelegt; zusätzliche Anforderungen an Fertigung, Qualitätskontrolle etc. werden für diese Konzeptskizzen nicht herangezogen.

5.5.1 Wirtsgesteinübergreifende Überlegungen für generische Behälterkonzepte

5.5.1.1 Dichter Verschluss

Der dichte Verschluss wird in allen betrachteten Endlagerkonzepten durch Verschweißen hergestellt. Für alle vorhandenen Behälterkonzepte wurden den Materialien entsprechende Schweißtechnologien erforscht und erprobt. Das Verschweißen von Stählen ist seit Langem erprobter Stand der Technik; für das Verschweißen von Kupfer (im schwedisch-finnischen KBS-3-Konzept) wurden Rührreibschweißen und Elektronenstrahlschweißen technisch erprobt und demonstriert. Prüftechniken wurden ebenfalls entwickelt und getestet. Mögliche negative Einwirkungen – die Ausbildung von Eigenspannungen und eine höhere Anfälligkeit für Korrosion – können durch Ausheilen begrenzt werden. Ein verschweißter Behälter gewährleistet den gasdichten Einschluss der Abfälle. Für alle hier beschriebenen generischen Behälterkonzepte wird daher ebenfalls ein dichter Verschluss durch **Stoffschluss (Verschweißen)** angenommen.

5.5.1.2 Abschirmung (Handhabbarkeit, Rückholbarkeit, Bergbarkeit)

Unabhängig vom Wirtsgestein sind eine Handhabung der Endlagergebinde sowie eine mögliche spätere Rückholung oder Bergung zu gewährleisten. Neben Anforderungen an den sicheren Einschluss der Abfälle ergeben sich daraus auch Anforderungen an die Begrenzung von Temperatur und Ortsdosisleistung an der Oberfläche der Gebinde. Im Abschnitt 6.4 des Berichtes zum Arbeitspaket 2 [3] wird anhand von Machbarkeitsstudien für die Rückholung von Endlagergebinden im Wirtsgestein Salz gezeigt, dass das Herausholen nicht ausreichend abgeschirmter Gebinde mit Problemen verbunden ist. Die Freilegung von Gebinden und anschließende Verpackung in Transfer- oder Abschirmbehälter sowie die notwendige Einstufung der Einlagerungsbereiche als Sperrbereiche kann durch ausreichend abgeschirmte Behälter vermieden werden. Gleiches gilt für eine mögliche spätere Bergung bis zu 500 Jahre nach dem geplanten Verschluss des Endlagers. Die an eine Bergbarkeit gestellten Anforderungen an Einschlussfunktion und Handhabbarkeit der Gebinde [70] wurde im Kapitel 7 des Berichtes zum Arbeitspaket 3 [4] als mehrheitlich auslegungsbestimmend identifiziert. Aus diesem Grunde wird für sämtliche in diesem Abschnitt beschriebenen generischen Behälterskizzen eine Verbindung von Lösungsprinzipien veranschlagt, die eine **für eine Handhabung ausreichende Abschirmung** von ionisierender Strahlung und Neutronen auch für eine mögliche spätere Bergung ermöglicht. Um diese ausreichende Abschirmfunktion zu gewährleisten, werden allgemein dickwandige Behälter angenommen. Solche robusten Behälter aus dickwandigen Metallhüllen können gleichermaßen dazu ausgelegt werden, den **Abtrag der mechanischen Lasten** vor und insbesondere nach dem Versatz durch den Behälterkörper selbst zu gewährleisten.

5.5.1.3 Inventar

Aussagen zum Inventar werden für die Behälterkonzepte selbst nicht spezifiziert, sondern im nachfolgenden Abschnitt 5.6, „Optimierung der Behälterkonzepte“ skizziert. Grundsätzlich müssen die Behälter in ihren Dimensionen für eine Aufnahme des in Deutschland vorhandenen Inventares an Brennelementen oder gezogenen Brennstäben aus Leistungsreaktoren, AWA-Kokillen und Brennstäben oder Brennelementen aus den Versuchs-, Prototyp- und Forschungsreaktoren ausgelegt sein. Entsprechend den im FuE-Vorhaben LABRADOR [31] durchgeführten Betrachtungen zur Geometrie solcher Sonderbrennelemente sind zylindrische Gefäße mit einem Innendurchmesser von 350 mm abdeckend dazu in der Lage diese aufzunehmen. Für unzerlegte Brennelemente ist ein entsprechend größerer Durchmesser notwendig.

5.5.1.4 Handhabbarkeit

Handhabungshilfen werden im Folgenden nicht explizit benannt; basierend auf den bekannten Handhabungshilfen der Endlagergebinde (Abschnitt 5.4.2) und den Gebindemassen (Tabelle 14 für Endlagergebinde, Tabelle 19 für ausgewählte TLB-Typen) können für leichte Gebinde (< 10 t) ein am Deckel angeschweißter Tragepilz, für mittelschwere Gebinde (≤ 30 t) eine am Deckel angebrachte Hinterschneidung und für schwere und überschwere Gebinde (> 30 t) am Behälterkörper angeschraubte Tragzapfen angenommen werden. Grundsätzlich können auch Tragringe am Behälterkörper angenommen werden, entweder als ausschließliche oder als zusätzliche Handhabungshilfe für eine mögliche spätere Rückholung oder Bergung.

5.5.2 Generische Endlagerbehälterkonzepte für kristalline Wirtsgesteine

In Endlagerkonzepten in kristallinen Gesteinen ist die Wasserführung des Wirtsgesteins bestimmendes Merkmal. Es ergeben sich auslegungsbestimmende biologisch-chemische Einwirkungen und, durch den Schwelldruck der als geotechnische Barriere verwendeten tonbasierten *buffer*, hohe mechanische Lasten. In einem Endlagerkonzept *ohne ausgewiesenen ewG* ist zudem der sichere Einschluss der Abfälle über den gesamten Nachweiszeitraum durch die technischen und geotechnischen Barrieren zu gewährleisten. Bei Endlagerkonzepten *mit einem ausgewiesenen ewG* muss die Einschlussfunktion nur durch die technischen und geotechnischen Barrieren gewährleistet werden, bis sie durch die geologische Barriere vollumfänglich erfüllt werden kann. In beiden Fällen ist eine ausreichend wirksame Korrosionsbarriere unerlässlich, durch große Wandstärken, die Verwendung korrosionsresistenter Materialien, die Verminderung der Korrosion durch die Beeinflussung des biologisch-chemischen Milieus oder eine Kombination aller dieser Lösungsansätze.

Der sichere Einschluss der Abfälle im wasserführenden Umfeld von Kristallingesteinen, bzw. in den dadurch anzunehmenden wasserhaltigen geotechnischen Barrieren (tonbasierter *buffer*) bedingt einen ausreichenden Schutz vor Korrosion, um die Einschlussfunktion der Gebinde über den konzeptabhängig notwendigen Zeitraum – für Konzepte mit ewG bis zu jenem Zeitpunkt, da die geotechnischen und geologischen Barrieren den Einschluss vollumfänglich gewährleisten können, für Konzepte ohne ewG den gesamten Nachweiszeitraum – aufrechtzuerhalten. Gleichermaßen bedingt die Gewährleistung einer für Handhabung und Transport ausreichenden Abschirmung die Begrenzung des Materialabtrages am Behälterkörper. Zur Erfüllung der Anforderungen an mechanische Stabilität und eine ausreichende Abschirmung (vergleiche Abschnitt 5.5.1) werden hier Behälterskizzen für dickwandige Doppelhüllenbehälter erstellt, wobei die äußere Hülle als Korrosionsschutz ausgelegt wird.

5.5.2.1 Einschluss der Abfälle – Mechanische und chemische Stabilität

Die mechanische Stabilität des Gebindes wird in der gegebenen Behälterskizze (siehe Abbildung 25 für Kristallingesteine ohne nachgewiesenen ewG und Abbildung 26 für Kristallingesteine mit ausgewiesenem ewG) durch einen die mechanischen Lasten abtragenden robusten Innenbehälter aus Stahl oder Gusseisen gewährleistet. Die äußere Hülle besteht aus korrosions-beständigem Material – z. B. Kupfer oder Titan, oder, sofern eine entsprechend lange Lebensdauer unter den im Endlager über den einschlussrelevanten Zeitraum zu erwartenden biologisch-chemischen Einwirkungen nachgewiesen werden kann, Edelstahl, möglicherweise mit einer zusätzlichen Beschichtung, z. B. mit Kupfer oder einer Nickellegierung. Die äußere Hülle muss eine Übertragung dieser Lasten auf die innere Hülle gewährleisten, ohne selbst ihre strukturelle Integrität zu verlieren (was einem Wegfall der Korrosionsbarriere gleichkäme). Daher muss bereits die äußere Hülle stoffdicht verschweißt sein. Inwieweit die innere Hülle ebenfalls dicht verschweißt wird oder ein kraftschlüssiger Verschluss ausreichend ist, soll hier offen bleiben.

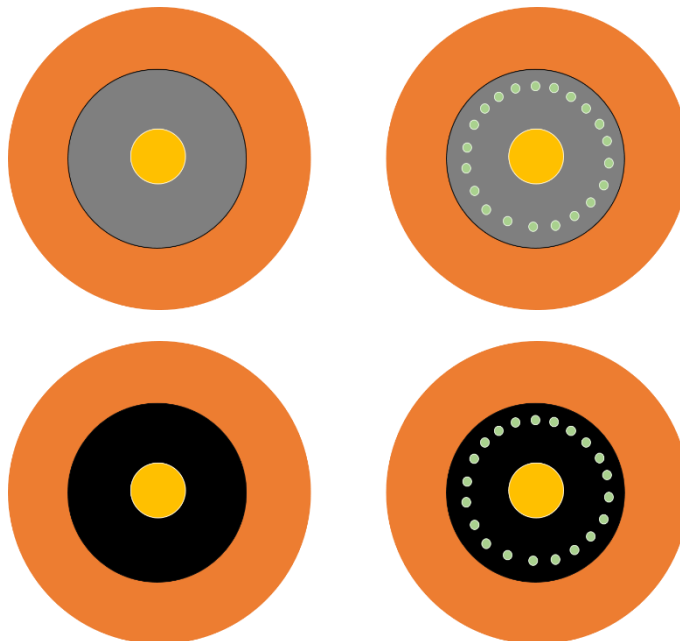


Abbildung 25: Skizze möglicher generischer Behälterkonzepte für Endlagerkonzepte in kristallinen Wirtsgesteinen ohne ewG. Ein dickwandiger Behälter aus ●Stahl (o.) oder ●Gusseisen (u.) gewährleistet die mechanische Stabilität. Eine massive Außenhülle aus z. B. ●Kupfer oder Titan gewährleistet eine ausreichende Korrosionsbarriere für den Nachweiszeitraum. Zur besseren Neutronenabsorption in der Behälterwand können optional ●Moderatorelemente in den Außenbereich des inneren Behälters eingesetzt werden (r.).

In den hier skizzierten generischen Behälterkonzepten wird die äußere Hülle im Falle kristalliner Wirtsgesteine *ohne ausgewiesenen* ewG als massive Hülle aus Kupfer oder Titan vorgeschlagen, um einen ausreichenden Korrosionsschutz über den gesamten Nachweiszeitraum zu bieten (siehe Abbildung 25). Im Falle von Wirtsgesteinen *mit ausgewiesenem* ewG wird eine kleinere Hülle aus Edelstahl, möglicherweise mit einer zusätzlichen Beschichtung aus einem korrosionsresistenten Material wie z. B. Kupfer oder einer Nickellegierung, vorgeschlagen (siehe Abbildung 26). Neben der Korrosionsbarriere ist in jedem Falle die Erfüllung der thermischen Anforderungen sowie die ausreichende Abschirmwirkung bis zum Ende des Bergbarkeitszeitraumes wichtig für die Auslegung der Wanddicke.

Bei der Verwendung von Gusseisen oder Gussstahl ist im Rahmen der zu erfüllenden Anforderungen an Fertigung und Qualitätskontrolle zu erwägen, ob die innere und äußere

Hülle getrennt gefertigt und dann vor der Beladung zusammengefügt werden (z. B. KBS-3 [116, 140]) oder ob die äußere Hülle mit Passformen für innere Komponenten ausgestattet und anschließend der innere Behälterkörper direkt in der äußeren Hülle gegossen wird (z. B. französisches optionales Konzept für BE-Behälter [45]).

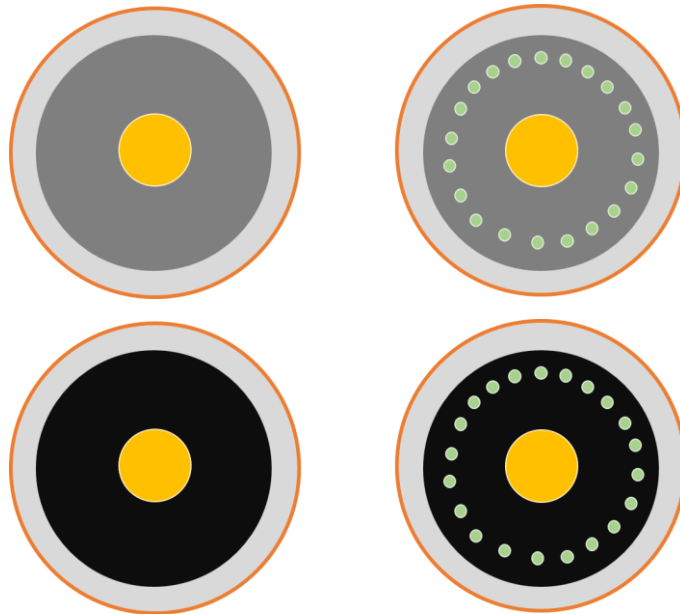


Abbildung 26: Skizze möglicher generischer Behälterkonzepte für Endlagerkonzepte in kristallinen Wirtsgesteinen mit ewG. Ein dickwandiger Behälter aus ●Stahl (o.) oder ●Gusseisen (u.) gewährleistet die mechanische Stabilität des Gebindes. Eine Außenhülle aus ●Edelstahl, möglicherweise mit einer zusätzlichen ●Beschichtung, gewährleistet einen ausreichenden Korrosionsschutz, um die Einschluss- und Abschirmungsfunktion für die notwendigen Zeiträume zu gewährleisten. Optional können ●Moderatorelemente in den Außenbereich des inneren Behälters eingesetzt werden (r.).

5.5.2.2 Abschirmung

Die Abschirmung der vom Inventar ausgehenden Strahlung wird durch die dickwandige Ausführung des Behälterkörpers gewährleistet. Hinsichtlich eines Materialabtrages bis zum Ende der Bergbarkeitsphase (500 Jahre nach dem Verschluss des Endlagers) ist in der vorliegenden Behälterskizze eine für Handhabungs- und Transportmaßnahmen ausreichende Abschirmung der ionisierenden Strahlung bis zu deren Ende auslegungsbestimmend. Eine mögliche Verfüllung des Inventars mit Schwermetall oder Schwermetallsalzen kann ebenfalls die vom Inventar ausgehende ionisierende Strahlung begrenzen, muss aber auf möglicherweise resultierende negative thermische, mechanische und chemische Effekte hin überprüft werden.

Für eine effektivere Abschirmung des Neutronenfeldes ist der Einsatz von Moderatorelementen⁴ in der inneren Hülle möglich (siehe Abbildung 25 und Abbildung 26,

⁴ In den TLB des Typs „CASTOR®“ [133, 134, 101] und im POLLUX®-Konzept [66] werden Moderatorstäbe aus Polyethylen verwendet, um die aus dem Inventar emittierten schnellen Neutronen auf thermische oder epithermische Energien herunterzumoderieren. Diese langsameren Neutronen werden vom Behältermaterial allgemein effizienter absorbiert als schnelle Neutronen [142].

jeweils rechts). Hierbei sind sich ergebende Wechselwirkungen mit dem Kritikalitätsausschluss und der Begrenzung der Gasproduktion (s. u.) zu beachten.

5.5.2.3 Kritikalitätsausschluss

Der Kritikalitätsausschluss wird durch die Beladung des Behälters und die Einschlussfunktion gewährleistet. Eine Begrenzung des Inventars, eine stabile unterkritische Anordnung des Inventars und der dichte Einschluss durch den Behälter (Verhinderung eines Zutrittes wässriger Lösungen) sind hier angewendete Lösungsprinzipien für eine dauerhafte Gewährleistung der Unterkritikalität über die Behälterlebensdauer. Inwieweit eine Regulierung der Verunreinigungen in den Behältermaterialien für den Kritikalitätsausschluss relevant ist, muss hier offen bleiben; allgemein ist eine systemische Unterkritikalität auch ohne die Notwendigkeit einer Materialkontrolle erstrebenswert. Im Falle einer Verwendung von Moderatormaterialien für die Verbesserung der Abschirmwirkung hinsichtlich Neutronen ist darauf zu achten, dass die Moderatorgeometrie derart optimiert werden, dass insbesondere die Rückstreuung von an den Stäben thermalisierten Neutronen in das Inventar minimiert wird.

5.5.2.4 Temperaturbegrenzung

Die Auslegung der Behälterwand erfolgt entsprechend den in Abschnitt 5.5.1 dargelegten Überlegungen primär nach ihrer Abschirmwirkung und der notwendigen Korrosionsbarriere (Lösungsprinzipien für die Funktionen der Abschirmung und des Einschlusses). Die Begrenzung der Temperaturen erfolgt daher nach dem mehrteiligen Lösungsprinzip einer Minimierung des Wärmewiderstandes der Behälterwand durch die Materialwahl und, soweit es die Lösung der Funktionen Abschirmung und Einschluss erlauben, durch eine Minimierung der Wanddicke. Ein wesentlicher Lösungsansatz für die Temperaturbegrenzung ist die Begrenzung und Kontrolle (Zusammensetzung, Abklingzeiten, Beladekurve) des Inventars.

Bei einer Verwendung von Moderatorelementen ist neben der Temperaturbegrenzung zum Schutz der Abfallmatrix und der geotechnischen Barrieren im Behälternahfeld (*buffer*) eine mögliche Begrenzung der Temperaturen in der Behälterwand zur Vermeidung oder Minimierung der Zersetzung des Moderatormaterials zu beachten.

5.5.2.5 Begrenzung von Korrosion und Gasproduktion

Eine Begrenzung der Korrosion des Behältermaterials ist durch die Auslegung der äußeren Hülle als Korrosionsbarriere zum Schutz der inneren Hülle über die gesamte konzeptabhängig zu bestimmende Behälterlebensdauer gegeben. Weiterhin besteht die Möglichkeit einer entsprechenden chemischen Beeinflussung des biologisch-chemischen Milieus durch die Einbringung geeigneter Stoffe (z. B. Erdalkali- oder Alkalioxide) in die Einlagerungsbereiche.

Bei einer möglichen Verwendung von Moderatorelementen für die effizientere Abschirmung des Neutronenfeldes ist eine mögliche Gasproduktion durch radiolytische, thermische oder chemische Zersetzung des Moderatormaterials zu beachten. Die radiolytische Zersetzung wird durch die Maximierung des Abstandes zwischen Moderatorelementen und Inventar (Maximierung für die Funktion Kritikalitätsausschluss, s. o.) minimiert. Für die Vermeidung einer thermischen Zersetzung sind möglicherweise entsprechende Anforderungen an die Funktion der Temperaturbegrenzung (s. o.) zu stellen. Die o. g. Maximierung des Abstandes zum Inventars würde die Temperatur an den Positionen der Moderatorelemente weiter begrenzen. Eine chemische Zersetzung wird während der Behälterlebenszeit dadurch ausgeschlossen, dass die Moderatorelemente in der inneren Hülle, also innerhalb der durch die äußere Hülle gebildeten Korrosionsbarriere, liegen.

5.5.2.6 Handhabbarkeit

Das Gebinde ist auf eine für Handhabung und Transport ausreichende Abschirmung hin ausgelegt. Der robuste Behälterkörper ist auf den Abtrag der während Handhabung, Transport und Endlagerung auftretenden Lasten hin auszulegen. Mögliche Handhabungshilfen sind in Abschnitt 5.5.1 aufgeführt.

5.5.3 Generische Endlagerbehälterkonzepte für das Wirtsgestein Tonstein

Für Endlagerkonzepte in Tonformationen sind die wasserhaltige aber nicht wasserführende geologische Barriere und die Temperaturen im Endlagersystem wesentliche Faktoren für die Auslegung von Endlagergebinden. Mechanische Lasten im Tonstein sind in den hier betrachteten Endlagerkonzepten vergleichbar oder kleiner als die in Kristallingesteinen zu erwartenden (vergleiche Tabelle 2, Tabelle 3 und Tabelle 4). Zum Schwelldruck der geotechnischen bzw. geologischen Barriere kommt der lithostatische Druck des Wirtsgesteins hinzu. Für Endlagerkonzepte in Tonformationen wird aufgrund der Barrierewirkung des Wirtsgesteins allgemein von einem ausgewiesenen einschlusswirksamen Gebirgsbereich ausgegangen. Damit ist die Einschlussfunktion durch die Gebinde nur zu gewährleisten, bis die geotechnischen Verschlussbauwerke und die geologische Barriere den Einschluss der Abfälle vollumfänglich gewährleisten können. Damit wird die Behälterlebensdauer auf diesen konzeptabhängigen Wirkzeitraum, mindestens aber auf die Bergbarkeitsphase begrenzt.

Entsprechend den in Abschnitt 5.5.1 aufgeführten Überlegungen werden die hier skizzierten Behälter als robuste und ausreichend für Handhabung und Transport abgeschirmte Behälter ausgelegt. Da die an die Gebinde grenzende geotechnische bzw. geologische Barriere wässrige Lösungen enthalten, ist ebenso eine äußere Hülle als Korrosionsschutz vorgesehen, die die Erfüllung der Funktionen des Einschlusses und der ausreichenden Abschirmung bzw. Handhabbarkeit auch zum Ende der Bergbarkeitsphase garantiert. Im Wesentlichen ergibt sich aus diesen grundlegenden Überlegungen eine den Behälterskizzen für die Endlagerung in *kristallinen Wirtsgesteinen mit nachgewiesenem ewG* analoge Bandbreite möglicher generischer Behälterkonzepte. Wesentlicher Unterschied ist die aus den zu erwartenden Umgebungstemperaturen (siehe Tabelle 5, caveat siehe Abschnitte 4.2 und 4.6) abgeleitete erhöhte Anforderung an die Temperaturbegrenzung (s. u.). Ohne eine quantitative Betrachtung des Inventars (maßgebliches Lösungsprinzip für die Temperaturbegrenzung, s. u. „Temperaturbegrenzung“) sind die in Abbildung 26 skizzierten möglichen generischen Behälterkonzepte in kristallinen Wirtsgesteinen mit ewG ebenso mögliche Behälterskizzen für Endlagerkonzepte im Wirtsgestein Ton.

5.5.3.1 Einschluss der Abfälle – Mechanische und chemische Stabilität

In der vorgeschlagenen Skizze eines möglichen generischen Behälterkonzeptes für das Wirtsgestein Tonstein (Abbildung 27) wird die mechanische Stabilität durch einen robusten Behälterkörper aus zwei Hüllen gewährleistet. Die als Korrosionsschutz ausgelegte äußere Hülle (z. B. aus Edelstahl) muss den Abtrag der wirkenden mechanischen Lasten entweder in Verbindung mit der inneren Hülle (z. B. aus Stahl oder Gusseisen) gewährleisten oder die Übertragung dieser mechanischen Lasten auf die stabile innere Hülle gewährleisten, ohne selbst ihre Integrität zu verlieren. Da die äußere Hülle als Korrosionsschutz ausgelegt ist, bedeutet ein Integritätsverlust den Wegfall dieses Korrosionsschutzes. Inwieweit der innere Behälterkörper die Funktionen des Einschlusses und der Begrenzung von Korrosion und Gasproduktion (s. u.) ohne die äußere Hülle erfüllt, ist durch entsprechendes dichtes Verschweißen auszuschließen oder für diesen Fall zu untersuchen. Ein dichtes Verschweißen des inneren Behälterkörpers ist gegebenenfalls zu erwägen. Eine zusätzliche Beschichtung (z. B. mit Kupfer oder einer Nickellegierung) als zusätzlicher Korrosionsschutz analog dem oben skizzierten Behälterkonzept für *kristalline Wirtsgesteine mit ausgewiesenem ewG* (siehe Abbildung 26) ist grundsätzlich ebenfalls möglich.

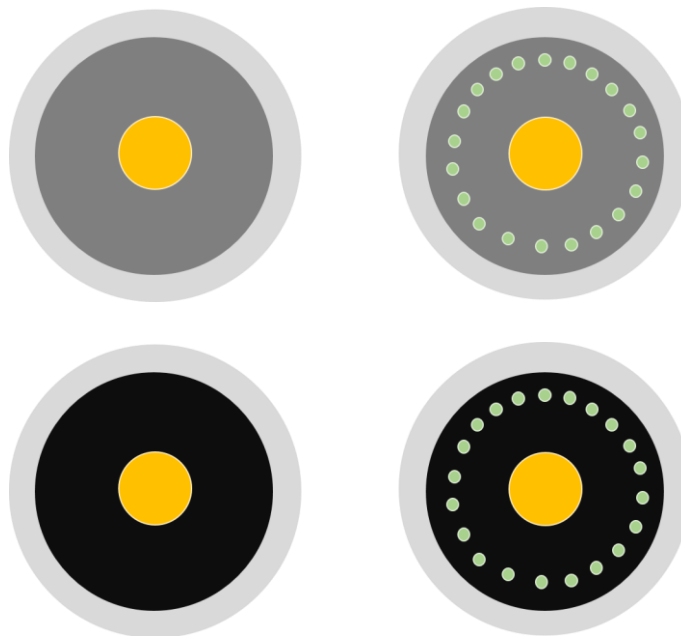


Abbildung 27: Skizze möglicher generischer Behälterkonzepte für Endlagerkonzepte in Tonstein. Ein dickwandiger Behälter aus ●Stahl (o.) oder ●Gusseisen (u.) gewährleistet die mechanische Stabilität des Gebindes. Eine Außenhülle aus ●Edelstahl gewährleistet eine ausreichende Korrosionsbeständigkeit und den sicheren Einschluss der ●Abfälle.

Bei einer Verwendung von Gusseisen oder Gussstahl als Material des inneren Behälterkörpers ist aus fertigungstechnischer Sicht auch hier zu erwägen, ob die innere und äußere Hülle getrennt gefertigt und dann vor der Beladung zusammengefügt werden sollen (z. B. KBS-3 [116, 140]) oder ob der innere Behälterkörper direkt in der äußeren Hülle gegossen werden soll (z. B. französisches optionales Konzept für BE-Behälter [45]).

5.5.3.2 Abschirmung

Die Abschirmung der vom Inventar emittierten Strahlung erfolgt über den dickwandigen metallischen Behälterkörper. Ein Verfüllen des Inventars mit Schwermetallen oder Schwermetallsalzen ist ebenfalls möglich, soweit dies keine die Integrität der Abfallmatrix negativ beeinflussenden chemischen, thermischen oder mechanischen Einwirkungen nach sich zieht.

Für eine effektivere Abschirmung des Neutronenfeldes ist der Einsatz von Moderatorelementen denkbar. Mögliche Auswirkungen auf die Erfüllung der Funktionen Kritikalitätsausschluss, Temperaturbegrenzung und Begrenzung der Gasproduktion sind hier zu beachten.

5.5.3.3 Kritikalitätsausschluss

Der Kritikalitätsausschluss wird primär durch Kontrolle und Begrenzung des Inventars gewährleistet. Weiterhin gewährleistet der dichte Einschluss den Ausschluss wässriger Lösungen und die Aufrechterhaltung einer unterkritischen Anordnung im Inneren des Gebindes. Eine Kontrolle und Begrenzung verschiedener moderierender bzw. reflektierender Isotope im Behältermaterial ist möglich, gegenüber einer Begrenzung des Inventars jedoch weniger praktikabel. Im Falle eines Einsatzes von Moderatormaterialien zur Verbesserung der Abschirmwirkung der Behälterwand gegen Neutronen sind Größe und Positionen der Moderatorelemente so zu wählen, dass eine Rückstreuung von im Moderatormaterial thermalisierten Neutronen in das Inventar minimiert wird.

5.5.3.4 Temperaturbegrenzung

Die Behälterwand ist maßgeblich auf den Erhalt der Abschirmfunktion bis zum Ende der Bergbarkeitsphase und auf den Erhalt des sicheren Einschlusses über die konzeptabhängig zu bestimmende Lebensdauer ausgelegt. Unter diesen Randbedingungen erfolgt die Temperaturbegrenzung nur nachrangig durch das mehrteilige Lösungsprinzip der Minimierung des Wärmewiderstandes des Behälterkörpers (Materialauswahl und Minimierung der Wandstärke). Primäres Lösungsprinzip ist hier die Begrenzung bzw. Kontrolle des Inventars. Der mögliche Einsatz von Moderatorelementen für eine effektivere Absorption der vom Inventar emittierten Neutronen im Behältermaterial kann zu weiteren Anforderungen an eine Begrenzung der Temperaturen in der Behälterwand führen.

5.5.3.5 Begrenzung von Korrosion und Gasproduktion

Durch die als Korrosionsschutz ausgelegte dicht verschweißte äußere Hülle werden Korrosion und Gasproduktion über die gesamte konzeptabhängig zu bestimmende Lebensdauer des Endlagergebindes begrenzt. Die mögliche Einbringung geeigneter und verträglicher chemischer Stoffe (z. B. Alkali- oder Erdalkalioxide) in das Endlagersystem kann das biologisch-chemische Milieu weiterhin über lange Zeiträume günstig (korrosionshemmend) beeinflussen.

Eine zusätzliche Gasproduktion durch den Einsatz von Moderatorelementen aus organischem Material wird dadurch begrenzt, dass die einer radiologischen, thermischen oder chemischen Zersetzung des Moderatormaterials zugrundeliegenden Einwirkungen begrenzt oder ausgeschlossen werden: Radiologische Einwirkungen werden minimiert durch eine entsprechende Optimierung der Moderatorgeometrie hinsichtlich der Funktion Kritikalitätsausschluss (großer Abstand zum Inventar, s. o. „Kritikalitätsausschluss“). Thermische Einwirkungen werden gleichermaßen durch eine große Entfernung zum Inventar und eine sich möglicherweise ergebende Begrenzung der Temperatur in der Behälterwand minimiert (s. o. „Temperaturbegrenzung“). Chemische Einwirkungen werden ausgeschlossen durch die Platzierung der Moderatormaterialien im inneren Behälterkörper, innerhalb der Korrosionsbarriere.

5.5.3.6 Handhabbarkeit

Die in Abbildung 27 skizzierten generischen Behälterkonzepte sind nach den in Abschnitt 5.5.1 dargelegten Grundgedanken auf eine für Handhabung und Transport ausreichende Abschirmung hin ausgelegt. Mit einer dicht verschweißten äußeren Hülle als Korrosionsbarriere zur Aufrechterhaltung sowohl der Abschirm- als auch der

Einschlussfunktion mindestens bis zum Ende der Bergbarkeitsphase ist eine Handhabung inklusive einer möglichen späteren Rückholung oder Bergung gewährleistet. Mögliche Handhabungshilfen am Gebinde sind in Abschnitt 5.5.1 aufgeführt.

5.5.4 Generische Endlagerbehälterkonzepte für das Wirtsgestein Salz

Endlagerkonzepte im Wirtsgestein Salz unterscheiden sich von Endlagerkonzepten in Tonformationen vor Allem dadurch, dass das Wirtsgestein nicht nur nicht wasserführend und wenig wasserdurchlässig ist, wenn auch in temperaturabhängig begrenztem Maße wasserlöslich, sondern darüber hinaus an bisher erkundeten Standorten auch vernachlässigbar geringe Mengen wässriger Lösungen enthält. Damit kann für Endlagerkonzepte im Steinsalz nicht nur von einem auszuweisenden einschlusswirksamen Gebirgsbereich ausgegangen werden, sondern auch von einer je nach nachgewiesener geologischer Situation begrenzten oder vernachlässigbaren Korrosion mangels wässriger Lösungen. Damit gelten hier die bereits für das Wirtsgestein Tonstein getroffenen Grundannahmen (siehe Abschnitt 5.5.3): Die Einschlussfunktion ist nur zu erfüllen, bis die geotechnischen und geologischen Barrieren diese Funktion vollumfänglich übernehmen. Die nach den wirtsgesteinsunabhängigen Überlegungen in Abschnitt 5.5.1 vorausgesetzte für Handhabung und Transport der Gebinde ausreichende Abschirmung muss bis zum Ende der Bergbarkeitsphase gewährleistet werden. Hinsichtlich der Einwirkungen muss hier unterschieden werden zwischen einer Vernachlässigung bzw. einer Betrachtung von Korrosion durch den Zutritt von Lauge aus dem umliegenden Wirtsgestein als unwahrscheinliches Szenario (hypothetische Entwicklung entsprechend den Einstufungen der EndlSiAnfV [70]) oder eine Auslegung des Behälters auch gegen möglicherweise in das Endlagersystem eindringende Salzlauge. Im Gegensatz zu den Behälterkonzeptskizzen in den anderen Wirtsgesteinen kann diese Unterscheidung zu unterschiedlichen Ergebnissen führen (s. u. „Einschluss der Abfälle“).

Aufgrund der in Abschnitt 5.5.1 wirtsgesteinsübergreifend vorausgesetzten Abschirmfunktion und dem für einen sicheren Einschluss notwendigen Abtrag aller auftretenden mechanischen Lasten wird auch hier vom Ansatz eines robusten dickwandigen Behälters ausgegangen. Ohne weitere Quantifizierung der Behälterfunktionen sind die in Abbildung 27 gezeigten Beispiele möglicher Behälterkonzepte für das Wirtsgestein Tonstein gleichermaßen auch grundsätzlich mögliche Behälterkonzepte für ein Endlagerkonzept im Wirtsgestein Salz; das quantitative Ausmaß der Korrosionsbarriere hängt hierbei von der Betrachtung von Korrosion (also: des Zutrittes von Lauge zum Gebinde) ab; bei einer Vernachlässigung von Korrosion aufgrund eines entsprechenden zu führenden Nachweises über Zustand und Entwicklung der geologischen Barriere kann die auf Korrosionsschutz optimierte äußere Hülle damit wegfallen und der Schutz vor möglichen biologisch-chemischen Einwirkungen durch ein weniger korrosionsresistentes Material erfolgen (siehe Abbildung 28).

5.5.4.1 Einschluss der Abfälle – Mechanische und chemische Stabilität

Die während Handhabung und Transport sowie nach dem Versatz der Gebinde auftretenden mechanischen Lasten werden durch den Behälterkörper selbst abgetragen. Dazu ist wahlweise ein ausreichend stabiler Behälterkörper auszulegen, oder, im Falle eines Doppelhüllenbehälters, eine Außenhülle, die die mechanischen Lasten gemeinsam mit dem inneren Behälterkörper abträgt oder derart auf einen die mechanische Stabilität allein gewährleistenden inneren Behälter überträgt, dass die ihr zugeschriebenen Funktionen nicht beeinträchtigt werden. Damit ergibt sich entweder die Auslegung eines dickwandigen Behälterkörpers (siehe Abbildung 28 oben und Mitte) oder ein Doppelhüllenbehälter mit zwei stabilen Hüllen oder einer mechanisch robusten inneren Hülle. Für den Fall einer Auslegung der Endlagergebinde gegen Korrosion ergibt sich notwendigerweise eine dicht verschweißte äußere Hülle aus einem korrosionsresistenten Material (z. B. Edelstahl) und damit eine

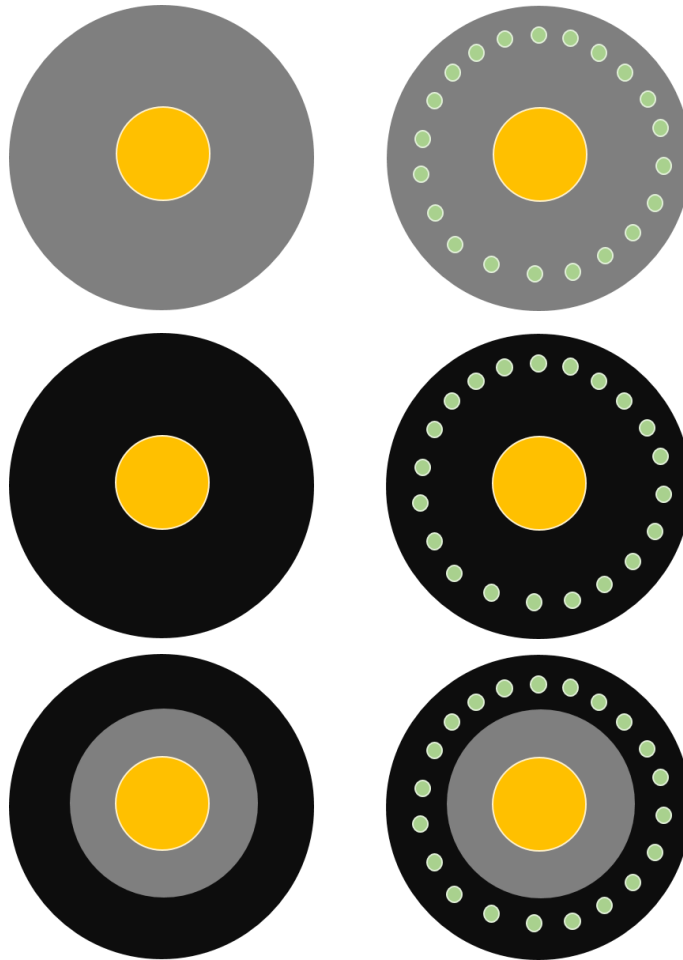


Abbildung 28: Skizze möglicher generischer Behälterkonzepte für Endlagerkonzepte im Wirtsgestein Salz (bei vernachlässigbarer Korrosion). Dargestellt sind massive Behälter aus ●Stahl (o.), ●Gusseisen (m.) sowie Doppelhüllenbehälter mit einer den sicheren Einschluss gewährleistenden inneren Stahlhülle und einem der Abschirmung dienenden äußeren Gusseisenbehälter (u.). Optional können ●Moderatorelemente eingesetzt werden (r.). Die Skizze u. r. entspricht unmittelbar dem auf diesen Überlegungen beruhenden POLLUX®-Konzept (vergleiche Abbildung 23). Für nicht vernachlässigbare Korrosion entsprechen die Behälterskizzen den in Abbildung 27 dargestellten.

Bandbreite möglicher generischer Behälterkonzepte entsprechend den in Abbildung 27 dargestellten Skizzen. Für den Fall einer als vernachlässigbar angenommenen Korrosion im Endlagersystem kann die äußere Hülle als Korrosionsbarriere auch entfallen und ein entsprechend der zu gewährleistenden Abschirmung (s. u.) dickwandiger Behälterkörper als Lösungsprinzip bleiben (siehe Abbildung 28 oben und Mitte). Dies entspräche einer Vergrößerung des Behälterkörpers aus den Behälterkonzepten der Andra oder der Nagra (vergl. Abbildung 22 links und Mitte). Als weitere Möglichkeit bestünde im Falle nachweislich vernachlässigbarer chemischer Einwirkungen der sichere mechanische Einschluss und das dichte Verschweißen eines robusten Behälters (z. B. aus Stahl) und eine äußere Hülle, die keine Einschlussfunktion erfüllt, aber die ausreichende Abschirmung gewährleistet (siehe Abbildung 28 unten). Dies entspricht wiederum – in Ansatz und Schema – dem bereits betrachteten POLLUX®-Konzept (vergleiche Abbildung 23 rechts). Die Verschluss technik und die Materialauswahl ergeben sich dann aus der Zuweisung der Einschlussfunktion an eine oder mehrere Hüllen und den Anforderungen an mechanische Stabilität und Schweißbarkeit.

5.5.4.2 Abschirmung

Die entsprechend den allgemeinen Überlegungen in Abschnitt 5.5.1 für Handhabung und Transport ausreichende Abschirmung wird vom Behälter selbst gewährleistet. Dabei erfolgt die Abschirmung ionisierender Strahlung analog den bereits in den Abschnitten 5.5.2 und 5.5.3 dargelegten allgemeinen Lösungsprinzipien durch den dickwandigen metallischen Behälterkörper und eine unter Beachtung sich möglicherweise ergebender chemischer, thermischer und mechanischer Einwirkungen denkbare Verfüllung des Inventars mit Metallen oder Metallsalzen.

Zur Abschirmung des Neutronenfeldes dient ebenfalls primär der dickwandige metallische Behälterkörper; der Einsatz von Moderatorelementen für eine effektivere Absorption der Neutronen im Behältermaterial ist grundsätzlich möglich, kann aber zu Wechselwirkungen mit den Funktionen des Kritikalitätsausschlusses (s. u.), der Temperaturbegrenzung (s. u.) und der Begrenzung der Gasproduktion (s. u.) führen.

Für den Fall einer Betrachtung von Endlagerkonzepten mit nachweislich auszuschließenden chemischen Einwirkungen kann die Einschlussfunktion (s. o.) durch den Wegfall einer Korrosionsbarriere gemeinsam mit den anderen Funktionen durch einen massiven Behälterkörper erfüllt werden (siehe Abbildung 28 oben und Mitte) oder vollständig auf den kleineren inneren Behälterkörper übergehen. Damit hätte die äußere Hülle keine notwendigerweise über die Betriebsphase hinausgehende Einschlussfunktion, aber weiterhin eine Abschirmfunktion (siehe Abbildung 28 unten). Das bereits betrachtete Behälterkonzept des POLLUX® basiert auf dieser Funktionsverteilung [62, 141].

5.5.4.3 Kritikalitätsausschluss

Der Kritikalitätsausschluss erfolgt in den skizzierten Behälterkonzepten primär durch Begrenzung und Kontrolle des Inventars. Der dichte Einschluss verhindert einen Zutritt wässriger Lösungen über die Behälterlebensdauer. Die mechanische Stabilität des Gebindes gewährleistet den Erhalt der ausgelegten unterkritischen Anordnung. Bei einer Verwendung von Moderatorelementen zur besseren Abschirmung des Neutronenfeldes ist durch eine optimale Entfernung der Moderatorelemente vom Inventar eine mögliche Rückstreuung von im Moderatormaterial thermalisierten Neutronen in das Inventar zu minimieren.

5.5.4.4 Temperaturbegrenzung

Die Begrenzung der Temperaturen in der Abfallmatrix und an der Gebindeoberfläche erfolgt primär über die Begrenzung und Kontrolle des Inventars. Aufgrund der vorausgesetzten Auslegung als für Handhabung und Transport ausreichend abgeschirmtes Gebinde (Abschnitt 5.5.1) ist eine Minimierung des Wärmewiderstandes der Behälterwand durch eine geeignete Materialwahl und Minimierung der Wandstärke unter den Randbedingungen einer ausreichenden Abschirmung und des sicheren Einschlusses durchzuführen.

5.5.4.5 Begrenzung von Korrosion und Gasproduktion

Die Begrenzung von Korrosion und Gaserzeugung erfolgt bei der Betrachtung von Endlagerkonzepten mit einer möglichen Korrosion durch eine geeignete dicht verschweißte äußere Hülle als Korrosionsbarriere (siehe Abbildung 27). Dabei wird auch eine mögliche Gasproduktion durch radiologische, thermische und chemische Zersetzung möglicher Moderatorelemente aus organischem Material durch eine Optimierung derer Position in der Behälterwand (radiologisch/thermisch) des innerhalb der Korrosionsbarriere liegenden inneren Behälterkörpers (chemisch) sowie ggfs. durch weitere an die Temperaturbegrenzung zu stellende Anforderungen an Grenztemperaturen in der Behälterwand (thermisch) begrenzt. Für Endlagerkonzepte, in denen Korrosion ausgeschlossen werden kann, ist eine Begrenzung der Gaserzeugung durch die radiologische oder thermische Zersetzung des in einem

möglichen Moderator befindlichen organischen Materials ebenfalls durch eine ausreichende Begrenzung von Temperatur und Dosisleistung an den Moderatorpositionen zu begrenzen.

5.5.4.6 Handhabbarkeit

Die Gebinde sind allgemein nach den in (Abschnitt 5.5.1 beschriebenen Überlegungen als ausreichend abgeschirmt für Handhabung und Transport ausgelegt. Ein ausreichender Korrosionsschutz bzw. ein nachzuweisender Ausschluss von Korrosionsvorgängen gestatten die ausreichende Erfüllung der Einschluss- und Abschirmfunktion auch über die Bergbarkeitsphase. Mögliche Handhabungshilfen sind ebenfalls in Abschnitt 5.5.1 beschrieben.

5.6 Optimierung der Behälterkonzepte

Im Abschnitt 5.4.1 wurde gezeigt, dass nicht alle möglichen Lösungsprinzipien von Vorteil sein müssen und sich verschiedene Lösungsprinzipien für Teilfunktionen sogar nachteilig auf die Erfüllung anderer Teilfunktionen auswirken können. Daher muss frühzeitig in der Behälterentwicklung eine Gewichtung oder Priorisierung der Behälterfunktionen stattfinden. Zwar müssen sämtliche Anforderungen mindestens erfüllt werden, und dadurch auch alle gewählten Funktionen und Teilfunktionen durch das Behälterkonzept mindestens abgedeckt sein. Aber die Frage, welche Funktionen und Teilfunktionen Vorrang haben, kann zu unterschiedlichen Entwicklungslinien führen. Im Abschnitt 5.5 wurde dies auch dadurch gezeigt, dass zwar eine Vor-Gewichtung durch die frühzeitige Festlegung auf für Handhabung und Transport ausreichend selbstabschirmende Behälter (Abschnitt 5.5.1) getroffen worden ist, aber mögliche Materialkombinationen für die verschiedenen Skizzen möglicher Behälterkonzepte (Abbildung 25, Abbildung 26, Abbildung 27 und Abbildung 28) genauso dargestellt werden wie eine mögliche Verwendung von Moderatormaterialien für eine bessere Neutronenabsorption – inklusive der sich daraus ergebenden Konsequenzen für einige weitere Behälterfunktionen (Kritikalitätsausschluss, Temperaturbegrenzung und Begrenzung der Gasproduktion).

Auch in den betrachteten vorhandenen Behälterkonzepten zeigt sich eine jeweilige Gewichtung von sich gegenseitig abdeckenden oder nicht abdeckenden Behälterfunktionen. So ist beispielsweise das schwedisch-finnische KBS-3-Konzept maßgeblich auf einen sicheren Einschluss für den gesamten für dieses Konzept gültigen Nachweiszeitraum von 100.000 Jahren ausgelegt, also auf Korrosionsbeständigkeit, mechanische Stabilität und die Begrenzung der Temperatur an der Gebindeoberfläche. Eine Grenztemperatur für die Abfallmatrix (im KBS-3-Konzept ausschließlich Brennelemente) wurde dagegen nicht definiert, da die im KBS-3-Konzept rechnerisch maximal erreichbare Temperatur in der Abfallmatrix deutlich unterhalb international üblicher Grenzwerte liegt (siehe Tabelle 10). Weiterhin ist das Gebinde nicht ausreichend für Handhabung und Transport abgeschirmt und bedarf mit Transfer- und Abschirmbehältern ausgerüstete Spezialfahrzeuge [102]. Im Nagra-Referenzkonzept sind ebenfalls Anforderungen und daraus resultierende Funktionen und Teilfunktionen nach Prioritäten sortiert worden [80]; an erster Stelle stehen der sichere Einschluss und die Handhabbarkeit, gefolgt von Produktionsrate, Identifizierung der Gebinde, Kritikalitätsausschluss, Abschirmung, Rückholbarkeit, Herstellungskosten, Fertigungstechnik und Gebindedimensionen. Die generischen britischen Anforderungen [37] sind priorisiert geordnet nach sich teilweise überschneidenden Teilfunktionen, beginnend mit mechanischer Stabilität, Abschirmung, Temperaturbegrenzung, chemischer Stabilität, Transportfähigkeit, Handhabbarkeit, Identifizierbarkeit, Behälterlebensdauer etc. (siehe auch die Zusammenstellungen im Bericht zum Arbeitspaket 1 [2], speziell Abschnitt 3.6.3.3 für das Nagra-Referenzkonzept und Abschnitt 3.6.6.2 für generische britische Behälteranforderungen).

Die Gesamtheit der durch die Anwendung einer Lösungsmatrix möglichen Kombinationen von mindestens abdeckenden Lösungsansätzen für alle Behälterfunktionen bildet einen Entwurfsraum für die möglichen erstellbaren generischen Behälterkonzepte. Die Einengung dieses Entwurfsraumes möglicher generischer Behälterkonzepte muss anhand einer entsprechenden Gewichtung der verschiedenen Behälterfunktionen und Teilfunktionen erfolgen. Ausgenommen einer im Abschnitt 5.5.1 aus Erkenntnissen des Arbeitspaketes 3 [4] heraus argumentierten Präferenz für ausreichend selbstabschirmende Behälter, die eine gemeinsame Grundlage der hier skizzierten generischen Konzepte bildet, kann diese Einengung nicht Teil dieses Arbeitspaketes oder des Vorhabens KoBrA sein.

Eine Festlegung oder Priorisierung von Anforderungen kann im Rahmen des deutschen Endlagerprogrammes glaubhaft und definitiv nur seitens der Vorhabensträgerin mit Bezug auf die Sicherheitsnachweise für relevante oder mögliche Endlagerkonzepte und in Abstimmung mit der verantwortlichen Aufsichts- bzw. Genehmigungsbehörde erfolgen.

Anschließend müssen die aus dem erstellten Entwurfsraum ausgewählten Konzeptskizzen zu generischen Behälterkonzepten optimiert werden. Dabei ergeben sich weitere über die im Abschnitt 5.5 gegebenen Lösungsprinzipien hinausgehende Lösungsprinzipien und Optimierungsmöglichkeiten, beispielsweise für das Inventar und die Materialwahl, die hier beispielhaft angesprochen werden sollen.

5.6.1 Inventar und Entwurfsraum

Als Inventar sind, wie bereits im Abschnitt 5.5.1 angesprochen, Brennelemente oder gezogene Brennstäbe aus den Leistungsreaktoren, AWA-Kokillen und Sonderbrennelemente und -brennstäbe aus den Prototyp-, Versuchs- und Forschungsreaktoren vorhanden. Für letztere wurden im FuE-Vorhaben LABRADOR Überlegungen zur Menge und Geometrie möglicher Endlagergebinde gemacht, wonach zylindrische Behälter mit einem Innendurchmesser von 350 mm eine Konditionierung aller vorhandenen und endzulagernden Sonderbrennelemente zumindest geometrisch ermöglichen [31].

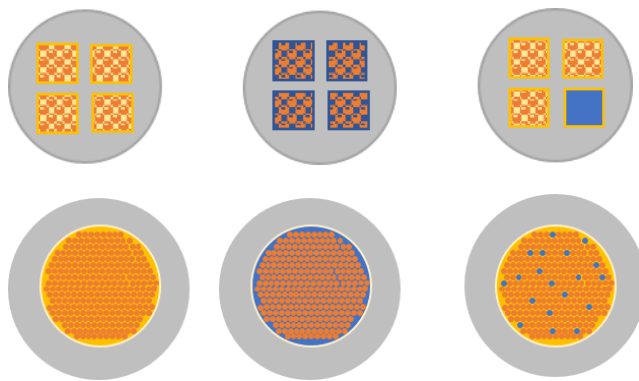


Abbildung 29:
Schematische Darstellung möglicher Beladungen mit Brennelementen (o.) oder gezogenen Brennstäben (u.); jeweils v. l. n. r.: Volle Beladung, Verfüllung, (Teil-)Beladung mit "dummies"

Für die Endlagerung von Brennelementen aus Leistungsreaktoren gibt es verschiedene Möglichkeiten. Statt ganzen Brennelementen können auch die aus den Brennelementen herausgezogenen Brennstäbe eingelagert werden (vergl. Schema in Abbildung 29). Dies hätte den Vorteil einer Volumenreduktion der Wärme entwickelnden Brennstoffabfälle und entsprechend dem kleineren möglichen Moderatorvolumen bei einem Integritätsverlust des Gebindes auch einen positiven Einfluss auf die Funktion des Kritikalitätsausschlusses. Die direkte Wärmeleitung zwischen den Brennstabhüllrohren würde den Wärmetransport

von der Abfallmatrix in den Behälterkörper verbessern. Andererseits müssten die Brennstäbe in speziell ausgerüsteten und dimensionierten heißen Zellen aus den Brennelementen herausgezogen werden, was zusätzliche mechanische Lasten für die technische Barriere des Hüllrohres darstellt. Hüllrohre können beschädigt werden, insbesondere bei Brennstäben mit starker Oxidation oder durch Kriechdehnung bzw. plastische Verformungen bedingte Krümmungen. Die metallischen Strukturteile der Brennelemente müssten, analog den verpressten Metallteilen aus der Wiederaufarbeitung (Kokillen des französischen Typs CSD-

C), ebenfalls konditioniert und im Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle eingelagert werden.

Auch für die Einengung des Entwurfsraumes für mögliche Behälterkonzepte ergibt sich aus der Variabilität des vorhandenen Inventars die Frage, ob ein gemeinsamer Behälter für alle Abfallformen angestrebt wird, wie etwa in den generischen britischen Behälterkonzepten (Abbildung 11) oder im Fall des POLLUX®-Konzeptes [66]. Hier hätten gezogene Brennstäbe den Vorteil, dass Gebinde ähnlicher Abmessungen für die Endlagerung von gezogenen Brennstäben aus den Leistungsreaktoren, AWA-Kokillen und Sonderbrennelementen aus den Prototyp- Versuchs- und Forschungsreaktoren verwendet werden könnten. Es können auch entsprechend der unterschiedlichen Charakteristika der Abfallformen verschiedene Gebinde für Brennelemente oder Kokillen entwickelt werden wie z. B. im Falle des Nagra-Referenzkonzeptes [65]. Dies böte sich aufgrund der unterschiedlichen Geometrien bei einer Lagerung von unzerlegten Brennelementen an.

In einem erstellten generischen Behälterkonzept schließlich kann das Inventar weiter für die Optimierung der Teilfunktionen variiert werden. So ist sowohl für die Funktion der Temperaturbegrenzung als auch für die Funktionen der Kritikalitätssicherheit und der Abschirmung eine Begrenzung des Inventars ein mögliches Lösungsprinzip. Neben einer Begrenzung der Beladung ist auch ein mögliches Verfüllen des Inventars mit einem inerten, nichtmultiplizierenden Material wie z. B. Metallen (flüssig oder als Granulat) oder Metallsalzen denkbar (Abbildung 29 Mitte). Dies würde bei geeigneter Materialwahl den Wärmetransport von der Abfallmatrix in die Behälterwand sowie die Abschirmung des Strahlungsfeldes sowie den Kritikalitätsausschluss positiv beeinflussen. Aufgrund des größeren ausfüllbaren Volumens ist dieses Lösungsprinzip bei unzerlegten Brennelementen effektiver als bei gezogenen Brennstäben auch hier gilt es im gegebenen Falle, mögliche negative (chemische, thermische oder mechanische) Effekte zu untersuchen (vergl. Tabelle 23). Eine weitere Möglichkeit, vorrangig Lösungsprinzipien für die Funktionen Temperaturbegrenzung und Kritikalitätsausschluss, ist die „Verdünnung“ des Inventars durch entsprechend dimensionierte brennstofffreie Metallstrukturen – „*dummies*“ – mit den Dimensionen eines Brennstabes oder Brennelementes (Abbildung 29 rechts). Diese Beimischung inaktiver und nicht Wärme entwickelnder Elemente ist eine logische Erweiterung der bereits für die Endlagerung gezogener Brennstäbe in den für die VSG untersuchten Behälterkonzepten POLLUX® und BSK-3 veranschlagten Mischung von MOX-Brennstäben mit UOX-Brennstäben vergleichsweise geringerer Wärmeleistung und Aktivität [30]. Auch die Beimischung der Steuerstäbe aus den DWR-BE könnte hier erwogen werden. Im Rahmen der Behälteroptimierung müssen die angewendeten Lösungen unter Berücksichtigung der im Endlagerprogramm bzw. im Endlagerkonzept verankerten Optimierungsziele abgewogen werden.

5.6.2 Materialwahl

Die Wahl des Materials bzw. der Materialien für die Behälter ist an vielen Stellen relevant für die Erfüllung der Behälterfunktionen und Teilfunktionen. Die physikalisch-chemischen Eigenschaften der verwendeten Materialien bestimmen maßgeblich den sicheren Einschluss (u. a. mechanische Stabilität und Festigkeit, Korrosionsbeständigkeit, Schweißbarkeit), die Abschirmung (Dichte und Absorptions- bzw. Streuquerschnitte), die Temperaturbegrenzung (Wärmeleitfähigkeit (siehe Abbildung 30), Wärmeübergang, Wärmekapazität, Oberflächenemissivität), die Begrenzung der Gasproduktion (neben Korrosionsbeständigkeit auch chemische Stabilität, mögliche gasförmige Reaktionsprodukte), die Handhabbarkeit (Dichte) und in geringerem Maße den Kritikalitätsausschluss (Materialzusammensetzung und Streuquerschnitte). In den folgenden Diagrammen sind einige der relevanten Kennwerte für eine umfassende Auswahl an Werkstoffen – inklusive Metallen und Legierungen von Metallen wie Eisen, Kupfer, Titan etc. – zusammengefasst, etwa zur mechanischen Festigkeit (Abbildung 31), zur Ausbildung von thermischen Spannungen (Abbildung 32) oder zur Veränderung der Festigkeit mit der Temperatur (Abbildung 33).

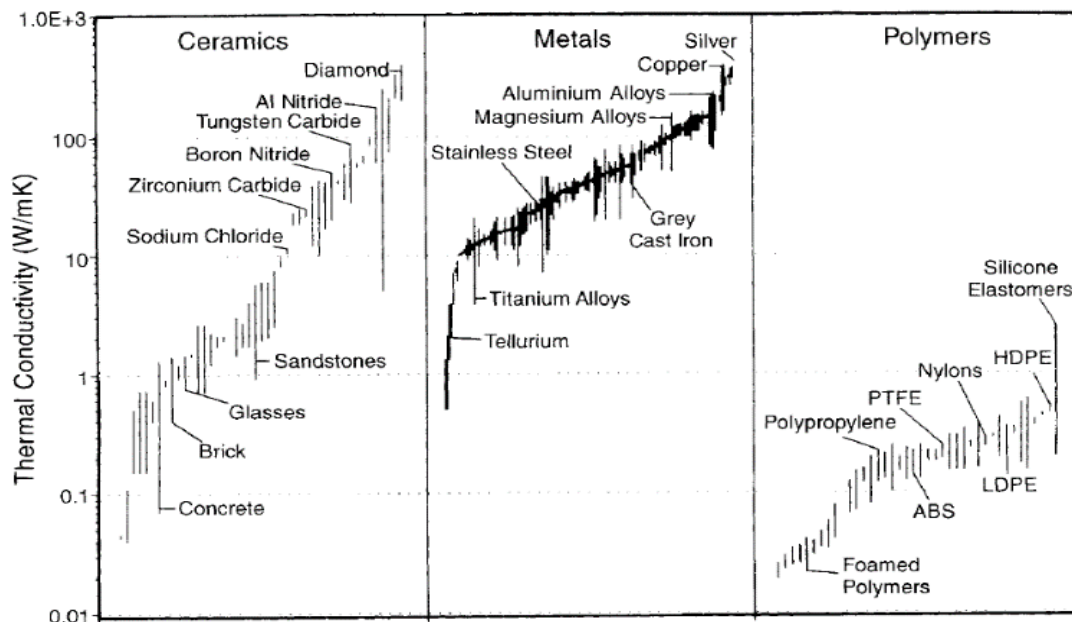


Abbildung 30: Wärmeleitfähigkeit verschiedener Materialien und Materialklassen [145] als Kriterium für Lösungsprinzipien der Funktion „Temperaturbegrenzung“.

5.6.3 Optimierung unter Randbedingungen – einige Beispiele

Neben der Optimierung der Materialwahl für die generischen und später zunehmend spezifischen Behälterkonzepte ergeben sich mit zunehmend quantifizierbaren Einwirkungen und Behälterfunktionen auch weitere Optimierungsmöglichkeiten unter Berücksichtigung der systemseitigen Randbedingungen in der Form der angewendeten Lösungsprinzipien und der Gewichtung der Behälterfunktionen und Teilfunktionen. Entsprechend der für nicht in der Lösungsmatrix berücksichtigte und im Laufe der Entwicklung ergänzbare Lösungsprinzipien (siehe Abschnitt 5.4) ist es auch möglich, unter Beibehaltung der Lösung der Gesamtfunktion Lösungsprinzipien für eine oder mehrere Teilfunktionen zu ändern und so das Behälterkonzept an neue Erkenntnisse zu quantifizierten Einwirkungen anzupassen. Als Beispiele können hier Wechsel in der Materialauswahl dienen, wie z. B. der mit Argumenten der mechanischen Stabilität und der einfacheren Fertigung vollzogene Wechsel von Gussstahl zu Gusseisen im KBS-3-Konzept [9]) oder auch der Übergang von der Untersuchung KBS-3-artiger Konzepte

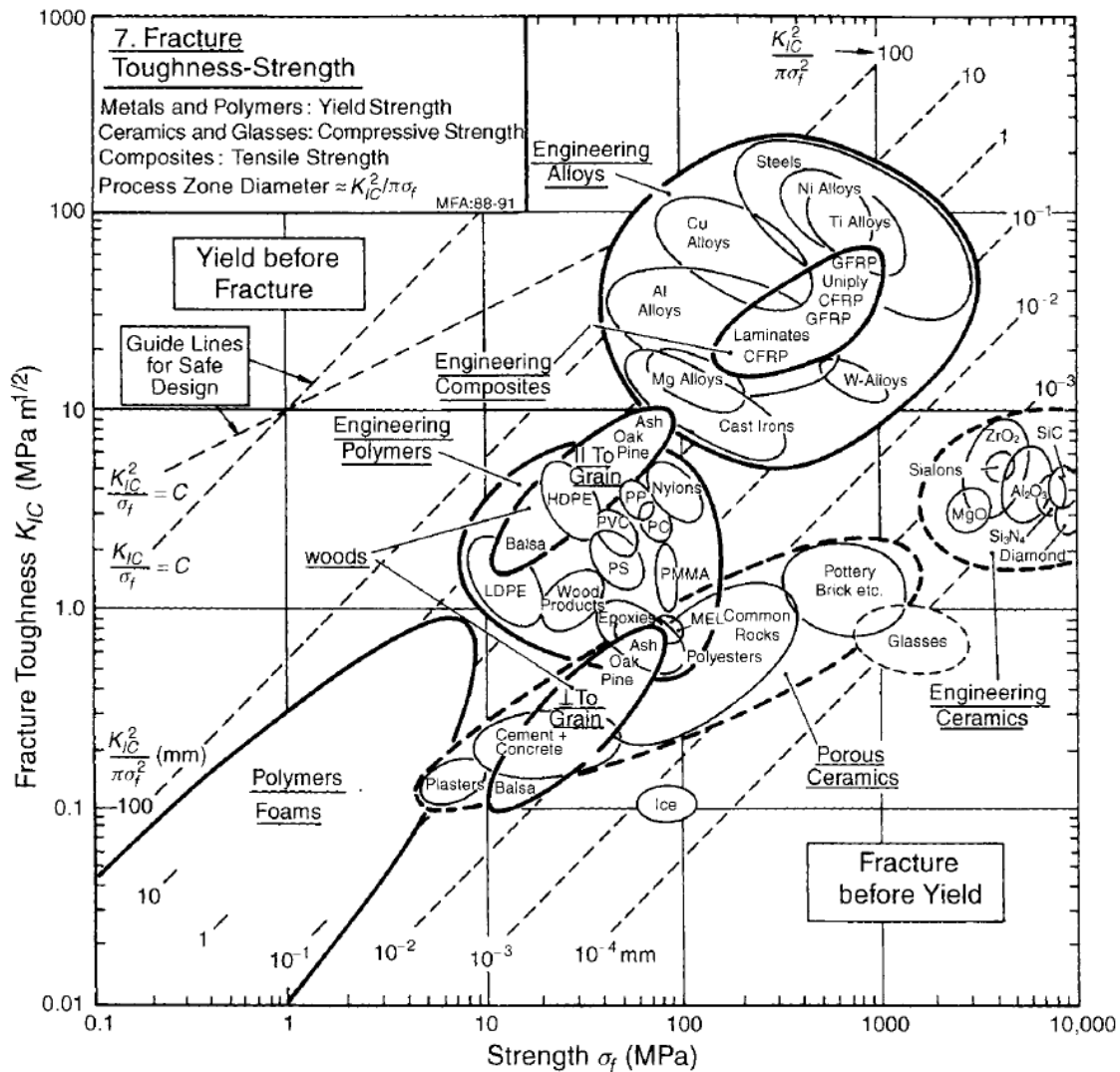


Abbildung 31: Mechanische Eigenschaften verschiedener Materialien als Auswahlkriterium für das Behältermaterial, hier Bruchzähigkeit gegen Streckgrenze zur Beurteilung der mechanischen Stabilität [145] (Funktion „sicherer Einschluss“).

für die Konditionierung von CANDU-BSB zur Untersuchung kleinerer Gebinde des Typs UFC-II in Kanada [14].

Beispiele für die quantitative Optimierung von Behälterfunktionen beim Übergang von generischen zu spezifischen Behälterkonzepten sind die im Abschnitt angesprochene Optimierung der Moderatorposition beim Einsatz von Moderatorelementen als Lösungsprinzip der Teilfunktion „Abschirmung von Neutronen“ sowie die Optimierung von Inventar und Behälterwand.

Im Falle der Moderatorelemente sind die grundlegende physikalische Lösungsgrundlage für die Verbesserung der Abschirmung des Neutronenfeldes durch eine effektivere Neutronenabsorption in der Behälterwand und die Konsequenzen aus der Verwendung organischer Materialien im Endlagergebäude (insbesondere den Kritikalitätsausschluss und die Begrenzung der Gasproduktion) gegeneinander abzuwägen. Das physikalische Grundprinzip besteht darin, dass aus dem Inventar emittierte zumeist schnelle Neutronen durch Stöße an den im Moderatormaterial enthaltenen Wasserstoff- und Kohlenstoffatomen auf niedrigere kinetische Energien heruntergebremst werden. Eine Absorption der Neutronen ist in diesen niedrigeren Energiebereichen allgemein wahrscheinlicher als in den ursprünglichen höheren

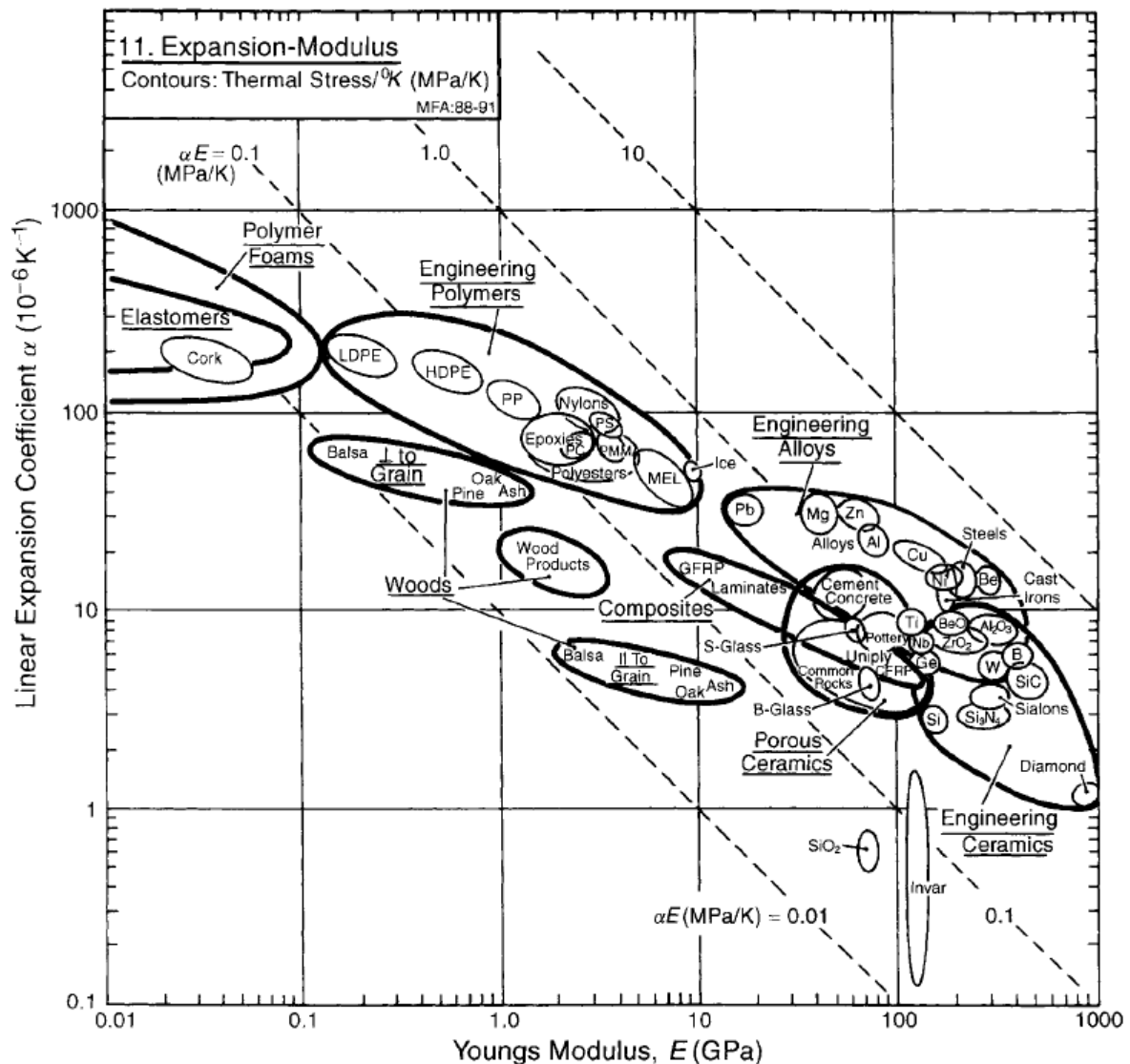


Abbildung 32: Thermische Ausdehnung verschiedener Materialien und Materialgruppen zur Beurteilung der Ausbildung thermischer Spannungen [145].

Energiebereichen [142]. Zur Optimierung der Absorptionswirkung sollte das Moderatormaterial also möglichst zentral in der Behälterwand liegen. Andererseits bewirken die ionisierende Strahlung und die Neutronenstrahlung auch eine radiolytische Zersetzung des Moderatormaterials, was zu einer Produktion von Radiolysegasen – bei Kohlenwasserstoffen z. B. Wasserstoff, Methan, Ethan, Ethen etc. – führen kann. Auch kann sich organisches Material bei zu hohen Temperaturen thermisch zersetzen. Aus diesen beiden Gründen ist eine Positionierung des Moderatormaterials möglichst weit weg vom Inventar als Strahlungs- und Wärmequelle optimal zur Begrenzung der Gasproduktion. Eine mögliche chemische Zersetzung wiederum, ebenfalls mit einer zu vermeidenden Gasproduktion als Folge, würde wahrscheinlich durch biologisch-chemische Einwirkungen vom äußeren Rand des Gebindes her erfolgen und bedingt als Gegenmaßnahme eine entsprechende Anordnung innerhalb einer ausreichenden Korrosionsbarriere. Eine Rückstreuung moderierter thermischer oder epithermischer Neutronen in das Inventar schließlich wäre nachteilig für den Kritikalitätsausschluss, weshalb eine diesbezüglich optimale Positionierung des Moderatormaterials wiederum möglichst weit außen im Gebinde erfolgt.

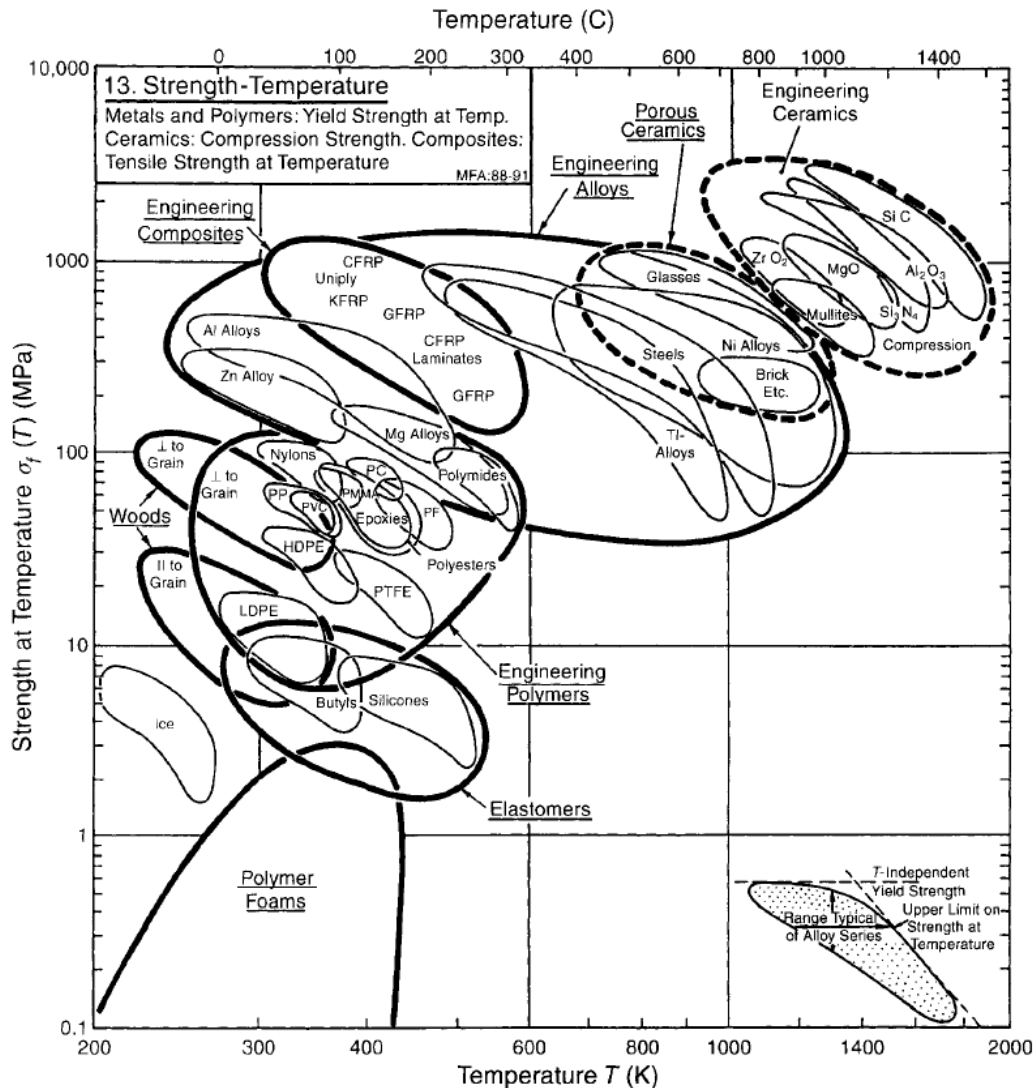


Abbildung 33: Veränderung der mechanischen Festigkeit in Abhängigkeit von der Temperatur zur Beurteilung des Materialverhaltens unter thermischen Einwirkungen [145].

Die schlussendliche Positionierung von Moderatormaterial im Behälterkonzept ergibt sich aus der Optimierung all dieser Beiträge nach ihrer Priorität und nach den quantifizierbaren Beiträgen, die die Positionierung bzw. das generelle Vorhandensein moderierender Materialien auf die Erfüllung der entsprechenden Behälterfunktionen hat.

Die Optimierung des Inventars und der Behälterwand ist eine noch grundlegendere Aufgabe für die Erstellung generischer und später spezifischer Behälterkonzepte, die bereits in der Erstellung erster Skizzen durch die Gewichtung oder Priorisierung verschiedener Behälterfunktionen angelegt werden muss. Der Optimierungsbedarf ergibt sich hier durch die verschiedenen einander teilweise entgegenwirkenden Lösungsprinzipien hinsichtlich Inventar und Behälterwand. Die grundsätzlich zu betrachtenden Behälterfunktionen sind der sichere Einschluss, die Abschirmung, die Temperaturbegrenzung, der Kritikalitätsausschluss und die Handhabbarkeit. Zur Vereinfachung der Darstellung soll von einer festgelegten Materialzusammensetzung der Behälterwand ausgegangen werden.

Der sichere Einschluss bedingt eine mechanische und chemische Stabilität des Gebindes über einen konzeptabhängig zu spezifizierenden Zeitraum, die Behälterlebensdauer. Dies bedingt eine endlagerkonzept- und materialabhängige Mindestwanddicke für den Abtrag der mechanischen Lasten zuzüglich einer ebenfalls endlagerkonzept- und materialabhängigen

Mindestwanddicke als maximal zulässigen Wandstärkeverlust durch Korrosion Eine zusätzliche Gewährleistung einer ausreichenden Abschirmung erhöht die Mindestwanddicke um einen material- und inventarspezifischen Betrag. Für die Abschirmung der ionisierenden Strahlung und des Neutronenfeldes ist eine Maximierung der Wandstärke ein mögliches Lösungsprinzip. Eine obere Grenze ergibt sich aus den Abmessungen und der Masse des Gebindes (Handhabbarkeit). Mit jeder Erhöhung der Wandstärke steigt im Gegenzug der Wärmewiderstand des Behälterkörpers um einen materialabhängigen Betrag, was den Wärmetransport vom Inventar über den Behälterkörper in die Umgebung zunehmend behindert. Für die Temperaturbegrenzung ist eine Minimierung des Wärmewiderstandes der Wand und damit eine Reduktion der Wandstärke bis auf ein durch den sicheren Einschluss bestimmtes Minimum vorteilhaft. Damit wäre allerdings, abhängig vom Material und anderen Lösungsprinzipien, eine ausreichende Abschirmung möglicherweise nicht mehr gegeben. Beispiele für Behälterkonzepte mit einer Priorisierung der Temperaturbegrenzung über der Abschirmwirkung sind das KBS-3-Konzept, das UFC-II-Konzept, das Andra-Konzept und das Nagra-Referenzkonzept. Beispiel für eine Priorisierung der Abschirmfunktion ist das POLLUX®-Konzept.

Eine Verwendung von weiteren Lösungsprinzipien führt zu weiteren Optimierungspfaden. So kann sowohl die Temperaturbegrenzung als auch eine ausreichende Abschirmwirkung durch eine Verkleinerung des Inventars erreicht werden, was die Wärmeleistung und die inventarisierte Aktivität verringern würde. Mit verringertem Inventar wiederum wären hinsichtlich der Temperaturbegrenzung größere und hinsichtlich der Abschirmung kleinere Wandstärken möglich. Bezogen auf die Temperaturbegrenzung und Abschirmung ergäbe sich der iterative Optimierungszyklus:

kleineres Inventar → größerer möglicher Wärmewiderstand → größere mögliche Wandstärke → niedrigere Ortsdosisleistung an der Oberfläche → größeres mögliches Inventar → kleinerer möglicher Wärmewiderstand → geringere Wandstärke → größere Ortsdosisleistung an der Oberfläche → kleineres Inventar

Dieser exemplarische Optimierungszyklus muss unter den Randbedingungen der weiteren betroffenen Behälterfunktionen des sicheren Einschlusses (Mindestwanddicke) und der Handhabbarkeit (maximale Gebindedimensionen) sowie des Kritikalitätsausschlusses (Begrenzung des Inventars) betrachtet werden.

Logistische und wirtschaftliche Randbedingungen ergeben sich wiederum aus der Auslegung der maximal zulässigen Abfallinventare und dem in Deutschland endzulagernden Abfallmengengerüst [143]. Mit einer geringeren maximal zulässigen Beladung der Endlagerbehälter steigt gleichzeitig die dazu näherungsweise invers proportionale Gesamtzahl der anfallenden Endlagergebäude, die gefertigt, geprüft, beladen und eingelagert werden müssen. Solche Betrachtungen sind jedoch im Rahmen des Vorhabens KoBrA und in den zu führenden Sicherheitsnachweisen und der damit einhergehenden Behälterentwicklung nachrangig gegenüber der Erfüllung der an die Endlagergebäude gestellten Anforderungen [5].

5.7 Test der Behälterkonzepte

Der Prozess der Optimierung generischer Behälterkonzepte ist, wie im vorhergehenden Abschnitt dargestellt worden ist, geprägt von Kompromissen zwischen den zu gewichtenden Behälterfunktionen. Aufgrund dieses multidimensionalen mehrstufigen Prozesses empfiehlt es sich, das Ergebnis des Optimierungsprozesses dahingehend zu überprüfen, dass sämtliche ursprünglich angesetzten Anforderungen unter den angenommenen Einwirkungen erfüllt werden. Da es sich um generische Konzepte handelt, können naturgemäß keine direkten Tests und Versuche durchgeführt werden. Trotzdem erlauben auch generische

Behälterkonzepte bereits weiterführende Betrachtungen in der Form theoretischer Betrachtungen, mit deren Hilfe Schwerpunkte für das weitere Vorgehen oder Gewichtungen zwischen verschiedenen Behälterfunktionen und Optimierungszielen abgesteckt werden können.

5.7.1 Theoretischer Test

Theoretische Testmöglichkeiten für generische Behälterkonzepte entsprechen Berechnungsmodellen für die Überprüfung der Konzepte. Im generischen Stadium sind diese Modelle (noch) nicht ausdetailliert, erfassen aber die z. B. aus einer Lösungsmatrix (siehe Abschnitt 5.3) abgeleiteten Realisierungsmöglichkeiten der Behälterfunktionen. Eine systematische Betrachtung der in den verschiedenen für die Endlagerbehälter relevanten Zeitphasen (Beladung/Transport – Einlagerung – Rückholbarkeit – Bergbarkeit – späte Nachverschlussphase) anzunehmenden Einwirkungen und zu erfüllenden Anforderungen erlaubt die abschließende Spiegelung des erstellten generischen Konzeptes an den zu gewährleistenden Funktionen. Eine solche Betrachtung erlaubt die Gewichtung von Optimierungszielen und Teilfunktionen. Darüber hinaus können konzeptionelle Lücken, z. B. nichtabdeckende Kombinationen von Teilfunktionen, identifiziert und geschlossen werden.

5.7.2 Repräsentativer Test

Ein repräsentativer Test ist ein theoretischer Test, in dem die generischen Behälterfunktionen anhand repräsentativer Werte (Kennwerte ähnlicher Materialien) als Annäherung quantifiziert werden und mit entsprechenden Einwirkungen repräsentativer Systeme verglichen werden. Dieser Test ersetzt keine weiterführenden Betrachtungen zu quantifizierten Einwirkungen und Behälterfunktionen, kann aber erste numerische Vorstudien zu den relativen Auswirkungen der gewählten Teilfunktionen auf die Erfüllung der gesamten Behälterfunktionen erlauben. Er dient daher dem Test des Konzeptes und nicht der weiteren Optimierung, die nur auf Grundlage weiterer Informationen zu den tatsächlichen Einwirkungen im Endlagersystem stattfinden kann.

6 Zusammenfassung

Im Rahmen des Arbeitspaketes 4 wurde aus dem im Arbeitspaket 3 hergeleiteten top-down-Ansatz eine Methodik zur Untersuchung verschiedener Behälterkonzepte auf eine Übertragbarkeit auf andere generische Endlagerkonzepte erarbeitet. Diese Methodik berücksichtigt sowohl die Unterschiede zwischen verschiedenen Anforderungsprofilen internationaler Behälterkonzepte als auch die verschiedenen Einwirkungen auf die Endlagergebinde, die für deren Entwicklung zugrundegelegt worden sind. Mit ihrer Hilfe wurde eine Auswahl von 8 Endlagerbehälterkonzepten auf eine mögliche Übertragbarkeit auf Endlagerkonzepte in den drei potenziellen Wirtsgesteinen in Deutschland untersucht.

In einem zweiten Teil des Arbeitspaketes wurde, ebenfalls auf dem top-down-Ansatz aufbauend, eine Methodik zur Erstellung generischer Endlagerbehälterkonzepte hergeleitet und exemplarisch vorgeführt. Dabei wurden die in komponentenspezifische Teilfunktionen aufgelösten Behälterfunktionen in einer Lösungsmatrix mit wissenschaftlich-technischen Lösungsprinzipien verbunden, deren Verknüpfung zu generischen Behälterkonzepten führt. An einer Beispielmatrix (Tabelle 22) wurde der mögliche Entwurfsraum demonstriert.

6.1 Gegenüberstellung von Einwirkungen

Bei der Ermittlung behälterrelevanter Einwirkungen aus internationalen Endlagerkonzepten wurde eine Gegenüberstellung verschiedener Einwirkungen für die drei potenziellen Wirtsgesteine in Deutschland vorgenommen. Mechanische (Tabelle 24), thermische (Tabelle

5) und radiologische Einwirkungen (Tabelle 6) wurden zusammengetragen und miteinander verglichen. Daten zu exemplarischen hydrochemischen Lösungszusammensetzungen (Tabelle 7) ermöglichen eine zumindest qualitative Beurteilung chemischer Einwirkungen in den drei Wirtsgesteinen. Mit diesen Einwirkungen wurden in der anschließenden Untersuchung der Behälterkonzepte auf eine Übertragbarkeit einerseits die repräsentativen Endlagersysteme charakterisiert.

Wirts- gestein	Land	Teufe [m]	Druck [MPa]			
			lithostatisch	hydrostatisch	Schwelldruck	Gletscher
Kristallin	Schweden	500	--	5	≤15	≤25
	Finnland	420		4,1		
	Rep. Korea	500		5	10	
	Tschechien				15	
	Kanada			6	≤11,5	≤30
Sediment						
Tonstein	Belgien	240	4,5	2,2	5...6	
	Frankreich	525	12	-- (5,3)	≤7	
	Schweiz	450...850	15...22	4,5...8,5	2..4	≤5
Steinsalz (VSG)	Deutschland	870	18,8	--	--	≤15

Tabelle 24: Zusammenfassung der in den betrachteten Endlagerkonzepten auf die Endlagergebäude wirkenden statischen mechanischen Lasten aus Abschnitt 3.1.1

6.2 Gegenüberstellung von Anforderungen

Aus den betrachteten fortgeschrittenen Endlagerprogrammen wurden die wesentlichen Anforderungen an Endlagergebäude zusammengetragen. Dabei wurden die Anforderungen an die Gewährleistung der Unterkritikalität, an Temperaturbegrenzungen und Begrenzungen der Ortsdosisleistungen an den Gebindeoberflächen zum Schutze der Barrieren ebenso erfasst wie Anforderungen an die Behälterintegrität, die Transportierbarkeit und die Handhabbarkeit. Ergänzend wurden auch einige Auslegungsgrößen zusammengetragen – Gebindedimensionen, die Auslegung der mechanischen Stabilität und eine vergleichende Übersicht der Inventare. Bei der Zusammenstellung der internationalen Anforderungen an Endlagergebäude zeigt sich die Angleichung internationaler und übernationaler Anforderungen. Vielfach wurden übereinstimmende Anforderungen gefunden, abweichende Anforderungen (wie z. B. geringe Bandbreiten der Temperaturkriterien in der Abfallmatrix oder abweichende Temperaturkriterien an der Gebindeoberfläche) erscheinen als Ausnahme. Eine direkte Vergleichbarkeit der zusammengetragenen Anforderungen ist, abgesehen von diesen Ausnahmen, allgemein gegeben.

Anforderung	Größe	Grenzwert	
		international abdeckend	Deutschland
Unterkritikalität	k_{eff}	< 0,95	< 0,95 bis 500 a < 0,98 danach
sicherer Einschluss - Behälterintegrität	Lebensdauer	≥ 100.000 a (Kristallin) ≥ 10.000 a (Tonstein) ≥ 500 a (Steinsalz, Hypothese)	<i>nicht festgelegt; konzeptabhängig</i> > 500 a (Bergbarkeit) ≥ 1.000.000 a (Nachweiszeitraum)
Temperaturbegrenzung - Abfallmatrix	Temperatur	≤ 350 °C (DWR-BE) ≤ 400 °C (SWR-BE) ≤ 400 °C (CSD-V)	≤ 390 °C (DWR-BE) ≤ 410 °C (SWR-BE) ≤ 500 °C (CSD-V)
Temperaturbegrenzung - Gebindeoberfläche		≤ 100 °C (Tschechien ≤ 95 °C)	≤ 100 °C
ODL-Begrenzung - Gebindeoberfläche	Dosisleistung	≤ 1 Gy/h (Kristallin) ≤ 1 Gy/h (Tonstein)	<i>nicht festgelegt</i>
Anforderungen an die Handhabbarkeit	Dosisleistung, Temperatur	<i>nach ADR</i>	<i>nach ADR</i>

Tabelle 25: Zusammenstellung wesentlicher Anforderungen aus Abschnitt 3.2

6.3 Übertragbarkeit von Behälterkonzepten

Anhand der zusammengestellten Einwirkungen aus internationalen Endlagerkonzepten wurden für die Beurteilung der drei potenziellen Wirtsgesteine exemplarische Endlagersysteme mit entsprechenden Charakteristika – statische mechanische Last, Temperatur, vorhandener ewG, qualitatives hydrochemisches Milieu – erstellt. An diesen Endlagersysteme und den jeweiligen Betrachtungen zu Einwirkungen und Anforderungen der Behälterkonzepte wurden die 8 Endlagerbehälterkonzepte sowie eine Auswahl deutscher TLB-Typen auf eine Übertragbarkeit hin untersucht. Es ist hierbei zu betonen, dass diese exemplarischen Endlagersysteme Extrapolationen international existierender Wirtsgesteinsinformationen abbilden und eine detaillierte Untersuchung für Einwirkungen in realen Wirtsgesteinsinformationen auf weitere Erkundungsarbeiten angewiesen ist.

Bezogen auf die Wirtsgesteine ergab sich folgendes Bild: In Kristallingesteinen *ohne ewG* spielt der sichere Einschluss aufgrund der für den gesamten Nachweiszeitraum notwendigen Einschlussfunktion eine entscheidende Rolle; lediglich KBS-3-artige Konzepte erscheinen hier als potenziell übertragbar. In Wirtsgesteinen *mit ausgewiesenem ewG* muss der sichere Einschluss nur noch über einen konzeptabhängigen Wirkzeitraum gewährleistet werden, weshalb der Erfüllung anderer Anforderungen ein relativ gesehen größeres Gewicht zukommt. Der Erfüllung der thermischen Anforderungen in den „wärmeren“ Wirtsgesteinen Tonstein und Steinsalz wird dabei die größte Schwierigkeit für eine mögliche Übertragung der betrachteten Behälterkonzepte zugeordnet. Die in diesen Wirtsgesteinen entsprechend internationalen Daten anzunehmenden hohen Temperaturen des umgebenden Wirtsgesteins lassen eine direkte Übertragbarkeit der meisten Behälterkonzepte als fraglich erscheinen und erforderten Anpassungen (kleinere Behälter, größere Endlagerflächen, längere Abklingzeiten). In Kristallingesteinen *mit ewG* fällt dieser Punkt aufgrund der (vorbehaltlich zu ermittelnder Daten) ebenfalls als niedrig angenommenen Wirtsgesteinstemperatur weniger ins Gewicht.

Das schwedisch-finnische **KBS-3-Konzept** erscheint für die Endlagerung in Wirtsgesteinen *mit ewG* grundsätzlich übertragbar. Die Erfüllung der endlagerrelevanten Anforderungen durch KBS-3-Gebinde erscheint überwiegend als wahrscheinlich möglich. In kristallinen

Wirtsgesteinen *ohne ewG* ist unter den spezifischen Einwirkungen und Randbedingungen eines Endlagers die Fähigkeit der auf 100.000 Jahre ausgelegten Behälter zu überprüfen, im Zusammenwirken mit den weiteren technischen (Abfallmatrix) und geotechnischen (*buffer*, Verfüllung und Verschlussbauwerke) Barrieren eine unzulässige Freisetzung der in der Abfallmatrix eingeschlossenen Radionuklide in die Biosphäre innerhalb des Nachweiszeitraumes von 1 Million Jahren zu verhindern.

Das tschechische **UOS-Konzept** ist im Wesentlichen dem schwedisch-finnischen KBS-3-Behälter ähnlich. Der wichtigste Unterschied in Bezug auf die an Endlagergebinde gestellten Anforderungen ist die fehlende Abschätzung über Standzeiten, die über die Auslegungslbensdauer von >10.000 Jahren hinausgehen, wie sie beim KBS-3 möglich sind. Für Wirtsgesteine *mit ewG* erscheint eine Erfüllung der an die Endlagergebinde gestellten Anforderungen durch das UOS-Konzept in gleichem Maße als wahrscheinlich erfüllt wie durch das KBS-3-Behälterkonzept. Inwieweit der für kristalline Wirtsgesteine *ohne ewG* anzusetzende sichere Einschluss über den gesamten Nachweiszeitraum durch korrosionsresistente Konzeptvarianten des UOS möglich ist, bleibt offen.

Behälterkonzepte nach dem Vorbild des kanadischen **UFC-II-Behälters** (dünnwandige kupferbeschichtete Stahlbehälter in einem Supercontainer) sind aufgrund einer Beladung mit Abfällen, die sich in Größe, Aktivität und Wärmeleistung stark von den kanadischen Abfällen unterscheiden, komplett neu zu evaluieren. Aus diesem Grund gibt es außer dem für alle Wirtsgesteinstypen *mit ewG* wahrscheinlich gewährleisteten sicheren Einschluss keine sichere Aussage zu einer möglichen Übertragbarkeit anzunehmen.

Das französische **Andra-Konzept** für Kategorie-C-Behälter ist hinsichtlich einer Bergbarkeit und der aufgrund von in der Entwicklung zugrundeliegenden höheren Grenzwerten fraglichen Einhaltung radiologischer Randbedingungen zu prüfen. Einen möglichen Einsatz der entwickelten Technik für Handhabung und Einlagerung/Rückholbarkeit sowie eine mögliche spätere Bergung vorausgesetzt, erscheint eine Übertragbarkeit des Konzeptes für Wirtsgesteine *mit ewG* als wahrscheinlich möglich.

Das belgische Konzept von **Beton-Supercontainern** umschlossener Stahlbehälter ist ebenfalls hinsichtlich der Erfüllung von Anforderungen an eine mögliche spätere Rückholbarkeit und Bergbarkeit und von radiologischen Anforderungen zu prüfen. Auch der sichere Einschluss ist durch die Anfälligkeit des Beton-Supercontainers für Rissbildung zu prüfen.

Ausgenommen einer sicher argumentierbaren Bergbarkeit und der a priori nicht erfüllten thermischen Anforderungen (Temperaturkriterium an der Gebindeoberfläche) erscheint eine Erfüllung der an Endlagergebinde gestellten Anforderungen durch das schweizerische **Nagra-Referenzkonzept** für alle Wirtsgesteine *mit ewG* als wahrscheinlich möglich. Relevante Anpassungen für die Erfüllung der thermischen Anforderungen – Verringerung der Wärmeleistung, längere Abklingzeiten, größere Gebindeabstände – sind hier zu prüfen.

Robuste abgeschirmte Behälter des Typs **POLLUX®** erscheinen nach den geführten Betrachtungen für alle Wirtsgesteine *mit ewG* wahrscheinlich übertragbar, sofern die Wärmeleistung der Gebinde deutlich gesenkt werden kann. Auch hier sind zusätzliche Nachweise insbesondere der Behälterlebensdauer und weiterer Voraussetzungen für eine mögliche spätere Bergung zu erbringen.

Die als Konzeptskizze vorliegende Brennstabkokille **BSK-3** erfüllt nach den geführten Betrachtungen in den Wirtsgesteinen Tonstein und Kristallin die radiologischen Anforderungen nicht. Aufgrund der technischen Schwierigkeiten in Verbindung mit dem Zustand der Verrohrungen nach bis zu 500 Jahren nach dem Verschluss des Endlagers ist auch die

Bergbarkeit trotz mehrerer Konzeptstudien zu prüfen und zu demonstrieren, insbesondere in weichen bzw. kriechenden Wirtsgesteinen (Tonstein und Salz). Wie auch der POLLUX® muss die für eine Oberflächentemperatur von $\leq 200\text{ °C}$ ausgelegte BSK auf eine mögliche Verkleinerung des Wärmeinventars hin geprüft werden, um das geltende Temperaturkriterium einhalten zu können.

Nachteilig für die Rückholbarkeit aller betrachteten Endlagerbehälterkonzepte außer dem ausreichend abgeschirmten **POLLUX®** ist die zur sicheren Handhabung notwendige Verwendung technischer Hilfsmittel zur Abschirmung des Strahlungsfeldes, was während der Betriebsphase mit der Nutzung von Transfer- oder Abschirmbehältern bzw. von mit solchen Hilfsmitteln ausgerüsteten Spezialfahrzeugen gewährleistet werden muss.

Für die Anwendbarkeit der vorhandenen **Transport- und Lagerbehälter (TLB)** für die Endlagerung in den betrachteten Wirtsgesteinstypen gibt es mehrere offene Fragen und weiteren Forschungsbedarf. Die wahrscheinlich mögliche Erfüllung der Anforderungen hinsichtlich Handhabbarkeit und ausreichender Abschirmung kann angenommen werden. Eine Gewährleistung der Unterkritikalität während der konzeptabhängigen Behälterlebensdauer ist für verschiedene Behälterkonzepte und mögliche Beladungen noch zu zeigen. Es fehlen weiterhin Kenntnisse und Nachweise zum sicheren Einschluss unter Endlagerbedingungen sowie zu technischen Fragen einer Rückholung und Bergung. Für die Beurteilung einer Erfüllung der thermischen Anforderungen ist eine Einzelfallbetrachtung einer hochdiversitären Behältergruppe mit individuellen Beladungen und einer großen Bandbreite an Abklingzeiten durchzuführen.

6.4 Forschungsbedarf

Im Zuge der Untersuchung der verschiedenen Behälterkonzepte auf eine Übertragbarkeit wurde an mehreren Stellen ein notwendiger Forschungsbedarf festgestellt, der für eine weitere Betrachtung nicht nur einer Übertragbarkeit internationaler Konzepte unabdingbar scheint, sondern gerade auch für eine Charakterisierung von Endlagerkonzepten und Endlagersystemen in Deutschland – und auch für die Übertragbarkeit bereits vorhandener deutscher Behälter und Behälterkonzepte auf die verschiedenen Endlagerkonzepte in den drei potenziellen Wirtsgesteinen.

Zuerst betrifft dies die Wirtsgesteinerkundung selbst: Im Rahmen der Standorterkundung müssen Daten zu allen möglichen Wirtsgesteinsinformationen gesammelt und für die Behälterentwicklung bereitgestellt werden. Speziell in Kristallin- und Tongesteinen fehlen bereits generische endlagerrelevante Informationen zur Temperatur, zur Geologie, zu hydrochemischen Milieus und mikrobielle Besiedelungen.

Endlagerrelevante Eigenschaften von vorgesehenen und bereits in der allgemeinen Behälterkonzeption verwendeten Materialien müssen ebenfalls systematisch untersucht werden. Hierzu zählen das Kriechverhalten genauso wie das Korrosionsverhalten in wässrigen Lösungen mit und ohne mikrobielle Besiedelung in endlagerrelevanten Temperaturbereichen.

Für eine Beurteilung der vorhandenen TLB ist über die Materialforschung hinaus auch eine entsprechende Dokumentation und Auswertung über die inventarisierten Wärmeleistungen notwendig.

Als Ergebnis der Untersuchung stellt sich auch für die Übertragbarkeit möglicher Behälterkonzepte auf die potenziellen Wirtsgesteine in Deutschland die Bergbarkeit als eine weiter zu spezifizierende Anforderung dar. Für den **POLLUX®**-Behälter erscheint eine Bergbarkeit aufgrund der großen Wandstärken und der Auslegung als ausreichend abgeschirmter Behälter möglich, sofern entsprechende Nachweise erbracht werden können.

Ähnliches gilt für die langlebigen Behälterkonzepte **KBS-3** und **UOS**, wobei hier die für eine Handhabung nicht ausreichende Abschirmung beachtet werden muss. Zur Brennstabkokille **BSK** gibt es ebenfalls Studien für eine Bergbarkeit in Salz- und Tonformationen, allerdings sind hier auch noch technische Nachweise z. B. über den Zustand der Verrohrung zu führen.

6.5 Herleitung anforderungsgerechter generischer Behälterkonzepte

6.5.1 Methodik und Erstellung einer Lösungsmatrix

Im Arbeitspaket 3 wurde ein top-down-Ansatz für die Erstellung anforderungsgerechter Behälterkonzepte hergeleitet (siehe Kapitel 2 im dazugehörigen Bericht [4]). Als Erweiterung dieses Ansatzes wird im Kapitel 5 dieses Berichtes ein Lösungsmatrix-Ansatz (Tabelle 21) vorgeschlagen. Hierzu wurden die im Arbeitspaket 3 hergeleiteten wesentlichen Behälterfunktionen in Teilfunktionen untergliedert, deren Erfüllung durch die entsprechende Auslegung der Behälterkomponenten insgesamt eine Erfüllung der Behälterfunktionen durch das zu erstellende Behälterkonzept gewährleistet (Abbildung 34). Für die Erfüllung der Teilfunktionen stehen wissenschaftlich-technische Lösungsprinzipien zur Verfügung, die, geordnet nach Teilfunktionen und Behälterkomponenten, eine Lösungsmatrix ergeben. Eine abdeckende Verknüpfung der Lösungsprinzipien in dieser Lösungsmatrix ergibt demnach eine Kombination technischer Realisierungen für Behälterkomponenten zur Erfüllung der Behälterfunktionen, und damit insgesamt ein generisches Behälterkonzept.

Im Abschnitt 5.3 wurden Teilfunktionen und mögliche Lösungsprinzipien zusammengetragen und im Abschnitt 5.4 in einer exemplarischen Lösungsmatrix (Tabelle 22) zusammengefasst. Diese Zusammenstellung von Lösungsprinzipien ist im Abschnitt 5.4.2 auf die im Kapitel 4 betrachteten Behälterkonzepte angewendet worden.

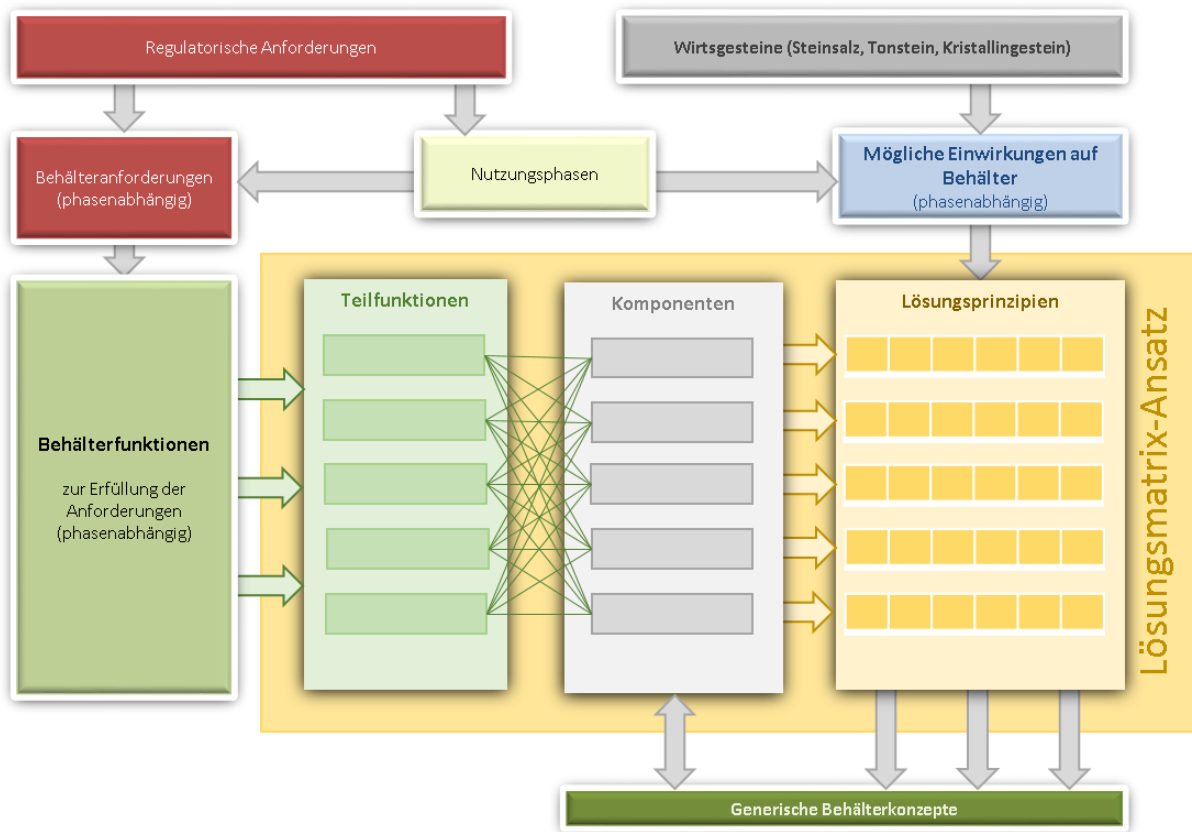


Abbildung 34: Der Lösungsmatrix-Ansatz als Erweiterung des top-down-Ansatzes zur Erstellung generischer Behälterkonzepte (vergl. Abbildung 17). Die Erstellung der Behälterkonzepte aus den Behälterfunktionen zur Erfüllung der Anforderungen unter Berücksichtigung der Einwirkungen auf die Endlagergebinde erfolgt (v.l.n.r.) durch die Aufteilung der Behälterfunktionen in Teilfunktionen (siehe Abschnitt 5.2), die Zuordnung von Teilfunktionen und Behälterkomponenten und die Sammlung von Lösungsprinzipien für die Teilfunktionen (Abschnitt 5.3). Eine Kombination von Lösungsprinzipien entsprechend den zu erwartenden Einwirkungen auf die Gebinde ergibt jeweils generische Behälterkonzepte. Eine exemplarische Lösungsmatrix ist in Tabelle 22 dargestellt.

6.5.2 Erstellung generischer Behälterkonzepte für die verschiedenen Wirtsgesteine

Durch eine geeignete und auf die zu erwartenden Einwirkungen im Endlagersystem angepasste Kombination verschiedener Lösungsprinzipien für jede der Teilfunktionen wurden exemplarische Konzeptskizzen für generische Endlagerbehälter in den verschiedenen Wirtsgesteinen erstellt. Dabei wurde anhand ausgewählter Lösungsprinzipien auch die Variabilität der Behälterskizzen gezeigt.

Die erstellten Behälterskizzen sind beispielhaft für den durch die technisch mögliche Bandbreite an Lösungsprinzipien für die Erfüllung der Behälterfunktionen aufgespannten Entwurfsraum.

6.5.2.1 Wirtsgesteinsübergreifende Betrachtungen

Im Rahmen des durch die in Tabelle 22 dargestellte Lösungsmatrix aufgespannten Entwurfsraumes wurden Betrachtungen geführt und entsprechende Vorfestlegungen getroffen, die für alle hier erstellten Behälterskizzen gelten:

Für den dichten Verschluss der Gebinde wird allgemein ein dicht verschweißter zylindrischer Behälter angenommen. Das dichte Verschweißen von Behältern ist internationaler Stand von Wissenschaft und Technik und in sämtlichen betrachteten Endlagerbehälterkonzepten das angewendete Lösungsprinzip. Die Grundform des Zylinders ist international gebräuchlich und bietet sowohl Vorteile in der Fertigung (Axialgeometrie) als auch im Lastabtrag.

Aufgrund der Betrachtungen zur Rückholbarkeit und Bergbarkeit von Endlagergebinden im Kapitel 6 des Berichtes zum Arbeitspaket 2 [3] wird allgemein ein robuster Behälter angenommen, der das vom Inventar ausgehende Strahlungsfeld selbst ausreichend abschirmt, um Transport- und Handhabungsmaßnahmen auch im Falle einer möglichen späteren Rückholung oder Bergung der Gebinde zu gewährleisten.

Aussagen zum Inventar werden im Rahmen der Erstellung der Behälterskizzen nicht gemacht. Mögliche Abfallformen – Brennelemente oder gezogene Brennstäbe aus Leistungsreaktoren, AWA-Kokillen und Brennelemente bzw. Brennstäbe aus Versuchs-, Prototyp- und Forschungsreaktoren – müssen aufgenommen werden; hier werden allerdings keine Festlegungen auf ein bestimmtes Inventar oder auf quantitative Grenzen für Masse, Aktivität oder Wärmeleistung des Behälterinventares vorgenommen. Das Inventar bleibt generisch.

Für die Handhabung der Gebinde ist die Verwendung von Handhabungshilfen möglich. Es wird, abhängig von der Gebindemasse, vorgeschlagen, Tragpilze (leichte Gebinde) bzw. Hinterschneidungen (mittelschwere Gebinde) am Behälterdeckel anzubringen, oder Tragzapfen (schwere Gebinde) am Behälterkörper zu befestigen. Auch die Verwendung von Tragringen ist möglich. Diese Handhabungshilfen sind in den Skizzen nicht dargestellt. In jedem Fall muss eine mögliche Eignung der Handhabungshilfen für Transport, Einlagerung und mögliche spätere Rückholung oder Bergung einzeln betrachtet werden.

6.5.2.2 Betrachtung der Wirtsgesteine

Im Rahmen der Herleitung generischer Behälterskizzen anhand der Behälterfunktionen und einer Auswahl möglicher technischer Lösungsprinzipien im Abschnitt 5.5 wurden für Kristallingestein und Steinsalz jeweils zwei mögliche Ausprägungen des Wirtsgesteines unterschieden (mit und ohne ewG bzw. mit und ohne freie Lösungen). Dadurch ergeben sich insgesamt fünf betrachtete Wirtsgesteins-Typen, für die Behälterkonzepte skizziert worden sind. Der in den drei Wirtsgesteinen bzw. in den fünf Wirtsgesteinstypen jeweils notwendige Umfang, in welchem die Endlagergebinde die im Arbeitspaket 3 hergeleiteten grundlegenden Behälterfunktionen erfüllen müssen, ist nach den Überlegungen im Abschnitt 5.5 und analog zur Herleitung der grundlegenden generischen Behälterfunktionen im Abschnitt 2.4 des Berichtes zum Arbeitspaket 3 [4] in Tabelle 26 zusammengefasst.

6.5.2.3 Generische Behälterkonzepte für kristalline Wirtsgesteine

In kristallinen Wirtsgesteinen muss aufgrund vorhandener wässriger Lösungen ein ausreichender Korrosionsschutz vorhanden sein. Für kristalline Wirtsgesteine ohne nachgewiesenen ewG muss ein sicherer Einschluss der Abfälle über den gesamten Nachweiszeitraum gewährleistet werden; hier wird ein Doppelhüllenbehälter vorgeschlagen, der aus einem robusten inneren Behälter für die mechanische Stabilität der Gebinde und eine massive äußere Hülle als Korrosionsschutz besteht (Tabelle 27, obere Reihe). Aufgrund der Auslegung als Korrosionsbarriere muss die äußere Hülle bereits dicht verschweißt werden. Für kristalline Wirtsgesteine mit nachgewiesenem ewG muss ebenfalls ein Korrosionsschutz vorgesehen sein, allerdings wird aufgrund der auf die konzeptabhängig zu quantifizierende Behälterlebensdauer beschränkten Einschlussfunktion eine äußere Hülle aus Edelstahl und ggfs. eine zusätzliche äußere Beschichtung vorgeschlagen (Tabelle 27, 2. Reihe von oben). Die Funktionen der Temperaturbegrenzung und des Kritikalitätsausschlusses werden wesentlich durch die Kontrolle und Begrenzung des Inventars erfüllt, wobei die zugrunde

gelegte, für Transport- und Handhabungsmaßnahmen ausreichende Abschirmwirkung zu beachten ist. Die Gasproduktion im Endlagersystem wird durch die Begrenzung der Korrosion sowie die Anordnung möglicher organischer Materialien innerhalb der Korrosionsbarriere begrenzt.

6.5.2.4 Generische Behälterkonzepte für das Wirtsgestein Ton

Das Wirtsgestein Tonstein ist allgemein wasserhaltig, aber nicht wasserführend. Dementsprechend muss für die Gewährleistung des sicheren Einschlusses und einer möglichen späteren Rückholbarkeit bzw. Bergbarkeit der Gebinde auch hier ein ausreichender Korrosionsschutz bestehen. Im Wesentlichen entsprechen die Behälterskizzen für das Wirtsgestein Tonstein damit den Behälterskizzen für kristalline Wirtsgesteine mit nachgewiesenem ewG, wobei die zusätzliche Beschichtung mit korrosionsresistentem Material optional ist (Tabelle 27, 2. Reihe von oben) oder entfallen kann (Tabelle 27, 3. Reihe von oben). Auch hier wird die mechanische Stabilität durch einen robusten inneren Behälter gewährleistet und die Korrosionsbarriere als eine dicht verschweißte äußere Hülle vorgeschlagen. Temperaturbegrenzung und Kritikalitätsausschluss erfolgen auch hier im Rahmen der durch die Auslegung der Gebinde auf eine für Handhabung und Transport ausreichende Abschirmwirkung gegebenen Randbedingungen durch die Kontrolle und Dimensionierung der Beladung. Die Begrenzung der Gasproduktion erfolgt durch die Begrenzung der Korrosion sowie die Anordnung aller möglicher organischer Materialien innerhalb der Korrosionsbarriere.

	Wirtsge- steinstyp	Kristallingestein		Tonstein	Steinsalz
		ohne ewG	mit ewG		
		mit Anwesenheit freier Lösungen			
Behälterfunktionen	sicherer Einschluss	über den gesamten Nachweiszeitraum zu gewährleisten	über einen konzeptabhängig begrenzten Zeitraum zu gewährleisten (Behälterlebensdauer); mindestens bis 500 Jahre nach dem Verschluss des Endlagers (Bergbarkeit)		
	Abschirmung	ausreichend für Transport und Handhabung			
		durch den Behälter bis 500 Jahre nach dem Verschluss des Endlagers zu gewährleisten (Bergbarkeit)			
	Kritikalitäts-ausschluss	durch die Gebinde über die konzeptabhängige Behälterlebensdauer zu gewährleisten			
	Temperaturbegrenzung				
	Begrenzung von Korrosion und Gasproduktion	Begrenzung von Korrosion			Korrosion vernachlässigbar
		Begrenzung chemischer, thermischer und radiolytischer Gasproduktion			Begrenzung thermischer und radiolytischer Gasproduktion
Handhabbarkeit	durch den Behälter bis 500 Jahre nach dem Verschluss des Endlagers zu gewährleisten (Bergbarkeit)				
Abschnitt		5.5.2		5.5.3	5.5.4
Behälterskizzen		Abbildung 25	Abbildung 26	Abbildung 27	Abbildung 28

Tabelle 26: Für die drei potenziellen Wirtsgesteine in Deutschland wurden fünf mögliche Typen betrachtet, für die generische Behälterskizzen erstellt worden sind. Die Tabelle enthält die hier berücksichtigten grundlegenden Behälterfunktionen sowie Verweise auf die jeweiligen Abschnitte und Abbildungen im Bericht.

6.5.2.5 Generische Behälterkonzepte für das Wirtsgestein Steinsalz

Für die Endlagerung im Wirtsgestein Steinsalz wurde unterschieden zwischen Wirtsgesteinen, in denen eine begrenzte Korrosion durch den Einbruch von Lauge in die Einlagerungsbereiche möglich ist (*mit Korrosion*) und Wirtsgesteine, in denen das Eindringen wässriger Lösungen in die Einlagerungsbereiche ausgeschlossen werden kann (*ohne Korrosion*). Durch die gegenüber Tonstein ähnlichen Einwirkungen (vergl. Tabelle 5 und Tabelle 24) und die Grundannahme eines nachgewiesenen ewG im Wirtsgestein Salz ist für *Steinsalz mit Korrosion* das für Tonstein skizzierte generische Behälterkonzept (Tabelle 27, 3. Reihe von oben) anwendbar. Für *Steinsalz ohne Korrosion* entfällt die Notwendigkeit einer spezialisierten Korrosionsbarriere, womit neben den bereits betrachteten Doppelhüllenbehälter auch robuste Behälter ohne äußere Hülle möglich sind. Da der dichte Verschluss durch Verschweißen erreicht werden soll, ergeben sich exemplarisch Kombinationen von Stahl- und Eisenbehältern, in denen ein massiv stählerner Behälter oder ein Behälter mit stählerner äußerer oder innerer Hülle die mechanische Stabilität gewährleistet (Tabelle 27, 5. Reihe von oben). Bei massiv eisernen Behältern (neben massiv stählernen Behältern in Tabelle 27, 4. Reihe von oben) ist der dichte Verschluss über die gesamte konzeptabhängige Behälterlebensdauer nachzuweisen. Abschirmung und mechanische Stabilität werden auch hier durch den massiven Behälterkörper gewährleistet, während eine Kontrolle und Begrenzung der Beladung wesentliches Lösungsprinzip für die Temperaturbegrenzung und den Kritikalitätsausschluss ist. Die Gasproduktion wird durch die Vermeidung organischer Materialien bzw. eine Minimierung derer Zersetzungsprozesse begrenzt.

			Lösungsprinzip → B1.3 (siehe Tabelle 22) (Abschirmung von Neutronen)			
			ohne Moderatormaterialien		mit Moderatormaterialien	
Material des Innenbehälters			Gussstahl	Gusseisen	Gussstahl	Gusseisen
Skizzen möglicher Behälterkonzepte für die Endlagerung im Wirtsgestein...	Kristallin	ohne ewG				
		mit ewG				
	Tonstein					
	Steinsalz	mit Korrosion				
		ohne Korrosion				

Alle Behälterskizzen gehen von robusten integralen Behälterkonzepten aus, die für Transport und Handhabung bis einschließlich einer möglichen späteren Bergung der Gebinde ausreichend abgeschirmt sein sollen.

Farblegende		Gusseisen		(Guss-)Stahl		Edelstahl		Korrosionsschutz (Kupfer, Titan, Nickellegierung)
		Inventar		Moderatorstab (als schematisches Beispiel für Moderatorelemente)				

Tabelle 27: Zusammenstellung der im Abschnitt 5.5 erstellten Behälterskizzen, nach zugrunde gelegten Wirtsgesteinstypen und Materialvariationen kategorisiert.

6.5.2.6 Optimierung von Behälterkonzepten

Als Anschlussbetrachtung zu den erstellten Behälterskizzen wurden anhand einer Auswahl verwendeter Lösungsprinzipien generische Betrachtungen zur Optimierung erstellter generischer Behälterkonzepte angestellt. Wesentlich für die Entwicklung generischer Behälterkonzepte, und für deren Weiterentwicklung zu wirtsgesteins- und standortspezifischen Behälterkonzepten, ist eine fortschreitende Einengung des möglichen Entwurfsraumes aufgrund einer Gewichtung und Priorisierung der Behälterfunktionen. Deren Erfüllung stellt jeweils eine Priorisierung von Optimierungszielen dar. Diskutierte Optimierungsprozesse umfassen die Materialwahl, das Inventar (Menge und Form) sowie, als Beispiele, die Verwendung von Moderatormaterialien und die Dimensionierung von Inventar und Behälterwand unter Berücksichtigung der Funktionen Temperaturbegrenzung und Abschirmung. All diese Betrachtungen werden hier nur abstrakt geführt und ohne jegliche im Rahmen dieses Vorhabens nicht durchführbare Quantifizierung.

Eine Gewichtung oder Priorisierung der Behälterfunktionen und ihrer Teilfunktionen sowie eine definitive Festlegung auf Lösungsprinzipien ist im Rahmen des Vorhabens nicht durchgeführt worden. Diese grundlegenden Aufgaben können nur von der für die Behälterentwicklung verantwortlichen Vorhabenträgerin im deutschen Endlagerprogramm oder in ihrem Auftrag erfüllt werden, in Bezug auf die zu erstellenden Sicherheitsnachweise für relevante Endlagerkonzepte und in Abstimmung mit den verantwortlichen Genehmigungsbehörden.

7 Literaturverzeichnis

- [1] W. Bollingerfehr, H. Völzke, A. Wunderlich, C. Herold, S. Prignitz, D. Wolff und T. Orellana Pérez, „Anforderungen und Konzepte für Behälter zur Endlagerung von Wärme entwickelnden radioaktiven Abfällen und ausgedienten Brennelementen in Steinsalz, Tonstein und Kristallingestein (KoBrA). Synthesebericht,“ BGE TECHNOLOGY GmbH und BAM, Peine und Berlin, 2020.
- [2] C. Herold, H. Völzke, T. Orellana Pérez und D. Wolff, „FuE-Vorhaben "KoBrA" - Bericht zum Arbeitspaket 1: Nationaler und Internationaler Stand zu bereits existierenden Anforderungen und Konzepten für Endlagerbehälter und Zusammenstellung sicherheitsrelevanter Behältereigenschaften,“ Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin, 2020.
- [3] S. Prignitz, W. Bollingerfehr und A. Wunderlich, „FuE-Vorhaben "KoBrA" - Bericht zum Arbeitspaket 2: Behälterrelevante Randbedingungen und Beanspruchungen in den drei potenziellen Wirtsgesteinen Salz, Tonstein und Kristallin,“ BGE TECHNOLOGY GmbH, Peine, 2020.
- [4] A. Wunderlich, W. Bollingerfehr, S. Prignitz, H. Völzke, C. Herold, D. Wolff und T. Orellana Pérez, „FuE-Vorhaben "KoBrA" - Bericht zum Arbeitspaket 3: Herleitung und Zusammenstellung der Anforderungen an Endlagerbehälter für ein HAW-Endlager in den drei potenziellen Wirtsgesteinen Steinsalz, Tonstein und Kristallingestein,“ BGE TECHNOLOGY GmbH, Peine, 2020.
- [5] Deutscher Bundestag, „Standortauswahlgesetz vom 5. Mai 2017 (BGBl. I S. 1074), das zuletzt durch Artikel 2 Absatz 16 des Gesetzes vom 20. Juli 2017 (BGBl. I S. 2808) geändert worden ist,“ in *Bundesgesetzblatt Jahrgang 2017 Teil I Nr. 26*, Bonn, Bundesanzeiger Verlag, 2017, pp. 1074-1102.
- [6] P. Poškas, A. Brazauskaitė, A. Šmaižys, R. Zujus, E. Narkūnas, R. Kilda und A. Sirvydas, „Investigations of Possibilities to Dispose of Spent Nuclear Fuel in Lithuania: A Model Case. Volume 2: Concept of Repository in Crystalline Rocks,“ Radioactive Waste Management Agency RATA, Lithuanian Energy Institute, Vilnius, 2005.
- [7] Kärnbränslesäkerhet, „Handling and Final Storage of Unreprocessed Spent Nuclear Fuel. Volume II - Technical,“ KBS, Stockholm, 1978.
- [8] SKB, „SKB-TR-93-04: Project on Alternative Systems Study (PASS) - Final Report,“ SKB, Stockholm, 1992.
- [9] L. Werme und J. Eriksson, „SKB-TR-95-02: Copper canister with cast inner component. Amendment to project on Alternative Systems Study (PASS), SKB TR 93-04,“ SKB, Stockholm, 1995.
- [10] SKB, „SKB-TR-10-14: Design, production and initial state of the canister,“ SKB, Stockholm, 2010.
- [11] H. Raiko, R. Sandström, H. Rydén und M. Johansson, „SKB-TR-10-28: Design analysis report for the canister,“ SKB, Stockholm, 2010.

- [12] H. Raiko, „Posiva-2012-13: Canister Design 2012,“ Posiva Oy, Olikluoto, 2013.
- [13] CTECH Radioactive Materials Management, „Conceptual Design for a Deep Geologic Repository for Used Nuclear Fuel,“ Ontario Power Generation, New Brunswick Power, Hydro-Québec and Atomic Energy of Canada Limited, Ontario, 2002.
- [14] C. Hatton, „Development of the Canadian Used Fuel Repository Engineered Barrier System,“ in *15th International High-Level Radioactive Waste Management Conference (IHLRWM 2015)*, Charleston, 2015.
- [15] D.-K. Cho, Y. Lee, J.-Y. Lee und J. Choi, „Characteristics of a Geological Disposal System for the Increasing Burn-up of Spent Nuclear Fuel in Korea,“ *Journal of Nuclear Science and Technology* 44, pp. 1306-1316, 01 05 2007.
- [16] H.-J. Choi, J. Y. Lee und J. Choi, „Development of Geological Disposal Systems for Spent Fuels and High-Level Radioactive Wastes in Korea,“ *Nuclear Engineering and Technology* 45, pp. 29-40, 09 07 2012.
- [17] H.-J. Choi, M. Lee und J. Y. Lee, „Preliminary conceptual design of a geological disposal system for high-level wastes from the pyroprocessing of PWR spent fuels,“ *Nuclear Engineering and Design* 241, pp. 3348-3356, 03 06 2011.
- [18] I. Pospíšková, „Czech Disposal Canister Programme,“ in *IGD-TP*, Cordoba, 2016.
- [19] I. Pospisková, D. Dobrev, M. Kouril, J. Stoullil, D. Noviková, P. Kotnour und O. Matal, „Czech national programme and disposal container concept,“ *Corrosion Engineering, Science and Technology* 52, pp. 6-10, 22 02 2017.
- [20] A. Baksay, K. Benedek, B. Molnár, P. Molnár, B. Nös und G. Tungli, „Current Status of Geological Disposal Projects in Hungary,“ in *International Approaches for Deep Geological Disposal of Nuclear Waste: Geological Challenges in Radioactive Waste Isolation. Fifth Worldwide Review*, 2016, pp. 10.1-10.21.
- [21] D. Kinet, K. Chah, A. Gusarov, A. Faustov, L. Areias, I. Troullinos, P. v. Marcke, B. Craeye, E. Coppens, D. Raymaekers und P. Mégret, „Proof of Concept for Temperature and Strain Measurements With Fiber Bragg Gratings Embedded in Supercontainers Designed for Nuclear Waste Storage,“ *IEEE Transactions on Nuclear Science* 63, pp. 1955-1962, 21 06 2016.
- [22] Andra, „Point d’avancement des études sur le stockage de combustibles usés (présentation GT PNGMDR),“ Andra, Châtenay-Malabry, 2015.
- [23] L. H. Johnson und F. King, „NTB-02-11: Canister Options for the Disposal of Spent Fuel,“ Nagra, Wettingen, 2003.
- [24] N. Diomidis, L. H. Johnson, P. Bastid und C. Allenb, „Design development of a copper-coated canister for the disposal of spent fuel in a deep geological repository in Opalinus Clay,“ *Corrosion Engineering, Science and Technology* 52, pp. 31-39, 26 01 2017.
- [25] S. Holdsworth, T. Graule und E. Mazza, „NAB-14-90: Feasibility evaluation study of candidate canister solutions for the disposal of spent nuclear fuel and high level waste. A status review,“ Nagra, Wettingen, 2014.

- [26] Deutsche Gesellschaft für Wiederaufarbeitung von Kernbrennstoffen mbH, „POLLUX-System: Beschreibung. Teil A: Übergeordnete Beschreibung,“ DWK, Hannover, 1987.
- [27] Deutsche Gesellschaft für Wiederaufarbeitung von Kernbrennstoffen, „Konzeptbeschreibung POLLUX-8-DWR-MOX-BE,“ DWK, Hannover, 1987.
- [28] Deutsche Gesellschaft für Wiederaufarbeitung von Kernbrennstoffen, „Konzeptbeschreibung POLLUX-24-SWR-BE,“ DWK, Hannover, 1988.
- [29] W. Filbert, P. Amelung, E. Biurrun, W. Bollingerfehr, N. Müller-Hoeppe, J. Ziegenhagen, J. Behrens, L. Fleckenstein, M. Hampe, M. Khamis, J. Kutowski, N. Niehues, T. Schwarz, B. Kienzler, A. Bauer, A. Loida, V. Metz, R. Kilger, E. F. Moser und B. Gmal, „Gegenüberstellung von Endlagerkonzepten in Salz und Tongestein (GEIST). Abschlussbericht - Hauptband,“ DBE TECHNOLOGY, Peine, 2004.
- [30] W. Bollingerfehr, W. Filbert, S. Dörr, P. Herold, C. Lerch, P. Burgwinkel, F. Charlier, B. Thomaske, G. Bracke und R. Kilger, „GRS-281: Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben (VSG). Bericht zum Arbeitspaket 6 - Endlagerauslegung und -optimierung,“ GRS, Köln, 2012.
- [31] S. Dörr, W. Bollingerfehr, W. Filbert und M. Tholen, „Status quo der Lagerung ausgedienter Brennelemente aus stillgelegten / rückgebauten deutschen Forschungsreaktoren und Strategie (Lösungsansatz) zu deren künftigen Behandlung / Lagerung (LABRADOR). Abschlussbericht,“ DBE TECHNOLOGY, Peine, 2011.
- [32] N. Bertrams, P. Herold, M. Herold, J. Krone, A. Lommerzheim, S. Prignitz und E. S. Kuate, „Entwicklung eines technischen Konzeptes für ein generisches Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle und ausgediente Brennelemente im Kristallingestein in Deutschland (KONEKD) - Abschlussbericht,“ DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine, 2017.
- [33] W. Filbert, M. Breustedt, S. Dörr, P. Herold, C. Lerch, J. Wolf, D. Ullmann, F. Kristek und W. Sindern, „DIREGT III (Direkte Endlagerung von Transport- und Lagerbehältern bis 160 Mg): Abschlussbericht,“ DBE TECHNOLOGY, Peine, 2014.
- [34] M. Jobmann, A. Bebiolka, S. Jahn, A. Lommerzheim, J. Maßmann, A. Meleshyn, S. Mrugalla, K. Reinhold, A. Rübel, L. Stark und G. Ziefler, „Projekt ANSICHT - Sicherheits- und Nachweismethodik für ein Endlager im Tongestein in Deutschland. Synthesebericht,“ Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, Berlin, 2017.
- [35] M. Jobmann, D.-A. Becker, J. Hammer, S. Jahn, A. Lommerzheim, N. Müller-Hoeppe, U. Noseck, J. Krone, J. R. Weber, A. Weitkamp und J. Wolf, „Projekt CHRISTA: Machbarkeitsuntersuchung zur Entwicklung einer Sicherheits- und Nachweismethodik für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle im Kristallingestein in Deutschland,“ DBE TECHNOLOGY, Peine, 2016.
- [36] M. Pöhler, P. Amelung, W. Bollingerfehr, H. J. Engelhardt, W. Filbert und M. Tholen, „Referenzkonzept für ein Endlager für radioaktive Abfälle in Tongestein (ERATO). Abschlussbericht,“ DBE TECHNOLOGY, Peine, 2010.
- [37] Radioactive Waste Management (RWM), „Geological Disposal: Generic Specification for waste packages containing high heat-generating waste,“ RWM, Didcot, 2016.

- [38] R. P. Rechard und M. D. Voegelé, „Evolution of repository and waste package designs for Yucca Mountain disposal system for spent nuclear fuel and high-level radioactive waste,“ *Reliability Engineering and System Safety* 122, pp. 53-73, 18 07 2013.
- [39] Energy Solutions, „DoE Advisory and Assistance Contract. Task Order 12: Standardized Transportation, Ageing and Disposal Canister Feasibility Study,“ Energy Solutions, 2013.
- [40] STEAG Kernenergie GmbH, „NTB-84-05: Behälter aus Aluminiumoxid für die Endlagerung von hochaktiven Abfällen,“ Nagra, Baden/Schweiz, 1984.
- [41] Andra, „Le scellement par micro-ondes,“ *Le journal de l'Andra* 24, p. 10, 2016.
- [42] I. Pospisková, A. Vokál und L. Vondrovic, „Medium-Term Plan for the Research and Development of Activities Required for DGR Siting in the Czech Republic in the Period 2015-2025,“ SÚRAO, Prag, 2015.
- [43] NWMO, „NWMO-TR-2013-07: Postclosure Safety Assessment of a Used Fuel Repository in Sedimentary Rock. Pre-Project Report,“ NWMO, Toronto, 2013.
- [44] ONDRAF/NIRAS, „NIROND-TR-2013-12: ONDRAF/NIRAS Research, Development and Demonstration (RD&D) Plan for the geological disposal of high-level and/or long-lived radioactive waste including irradiated fuel if considered as waste,“ NIROND, Brüssel, 2013.
- [45] Andra, „Dossier 2005 Argile. Synthesis (version Anglaise) - Evaluation of the feasibility of a geological repository in an argillaceous formation,“ Andra, Châtenay-Malabry, 2005.
- [46] J. Hernelind, „TR-10-34: Modelling and analysis of canister and buffer for earthquake induced rock shear and glacial load,“ SKB, Stockholm, 2010.
- [47] Andra, „Stockage réversible profond - Options de Sûreté du Stockage en Formation Géologique Profonde,“ Andra, Bure, 2009.
- [48] J. Mönig, D. Buhmann, A. Rübel, J. Wolf, B. Baltes, F. Peiffer und K. Fischer-Appelt, „Grundzüge des Sicherheits- und Nachweiskonzeptes. Bericht zum Arbeitspaket 4 (Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben),“ GRS, Köln, 2011.
- [49] SKB, „SKB-TR-09-22: Design premises for a KBS-3V repository based on results from the safety assessment SR-Can and some subsequent analyses,“ SKB, Stockholm, 2009.
- [50] M. Gobien, F. Garisto, E. Kremer und C. Medri, „NWMO-TR-2016-10: Sixth Case Study: Reference Data and Codes,“ NWMO, Toronto, 2016.
- [51] SKB, „TR-06-09: Long-term safety for KBS-3 repositories at Forsmark and Laxemar – a first evaluation. Main Report of the SR-Can project,“ SKB, Stockholm, 2006.
- [52] T. Beuth, G. Bracke, D. Buhmann, C. Dresbach, S. Keller, J. Krone, A. Lommerzheim, J. Mönig, S. Mrugalla, A. Rübel und J. Wolf, „GRS-284: Szenarienentwicklung: Methodik und Anwendung. Bericht zum Arbeitspaket 8 (Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben),“ GRS, Köln, 2012.

- [53] Posiva Oy, „POSIVA-2012-12: Safety Case for the Disposal of Spent Nuclear Fuel at Olkiluoto. Synthesis 2012,“ Posiva Oy, Olkiluoto, 2012.
- [54] Posiva Oy, „POSIVA-2014-03: Safety Case for the Disposal of Spent Nuclear Fuel at Olkiluoto. FEP Screening and Processing,“ Posiva Oy, Olkiluoto, 2014.
- [55] SKB, „SKB-TR-10-13: Spent nuclear fuel for disposal in the KBS-3 repository,“ SKB, Stockholm, 2010.
- [56] SKB, „SKB-R-06-38: Site descriptive modelling Forsmark stage 2.1. Feedback for completion of the site investigation including input from safety assessment and repository engineering,“ SKB, Stockholm, 2006.
- [57] B. Pastina und P. Hellä, „POSIVA-2010-01: Models and Data Report 2010,“ Posiva Oy, Olkiluoto, 2010.
- [58] J. Lee, D. Cho, H. Choi und J. Choi, „Concept of a Korean Reference Disposal System for Spent Fuels,“ *Journal of Nuclear Science and Technology* 44, pp. 1565-1573, 07 08 2007.
- [59] L. Areias, B. Craeye, G. d. Schutter, H. v. Humbeeck, W. Wacquier, L. Villers und A. v. Cotthem, „Half-Scale Test: An Important Step to Demonstrate the Feasibility of the Belgian Supercontainer Concept for Disposal of HLW,“ in *Proceedings of the 13th International Conference on Environmental Remediation and Radioactive Waste*, Tsukuba, 2010.
- [60] Nirex, „Nirex Report N/124: Specification for Waste Packages Containing Vitrified High Level Waste and Spent Nuclear Fuel,“ Nirex, Didcot, 2005.
- [61] P. Hoth, H. Wirth, K. Reinhold, V. Bräuer, P. Krull und H. Feldrappe, „Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen Deutschlands: Untersuchung und Bewertung von Tongesteinsformationen,“ BGR, Hannover, 2007.
- [62] Deutsche Gesellschaft für Wiederaufarbeitung von Kernbrennstoffen mbH, „Planungsvorgaben zum POLLUX-Behälter,“ DWK, Hannover, 1986.
- [63] J. Noronha, „APM-REP-00440-0015 R001: Deep Geological Repository Conceptual Design Report Crystalline / Sedimentary Rock Environment,“ NWMO, Toronto, 2016.
- [64] O. Wantz, „A Study of In-Package Nuclear Criticality in Possible Belgian Spent Nuclear Fuel Repository Designs (Dissertation),“ Université Libre de Bruxelles, Brüssel, 2005.
- [65] M. Stein, „NAB-14-104: Erläuterungen zur Verpackung radioaktiver Abfälle im Endlagerbehälter,“ Nagra, Wettingen, 2014.
- [66] W. Bollingerfehr, W. Filbert, M. Pöhler, M. Tholen und J. Wehrmann, „Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine sicherheitliche Bewertung von Endlagern für HAW (ISIBEL). Bericht AP 1.2 - Konzeptionelle Endlagerplanung und Zusammenstellung des endzulagernden Inventars,“ DBE Technology GmbH, Peine, 2008.

- [67] L. F. Auqué, M. J. Gimeno, J. B. Gómez, I. Puigdomenech, J. Smellie und E.-L. Tullborg, „TR-06-31: Groundwater chemistry around a repository for spent nuclear fuel over a glacial cycle. Evaluation for SR-Can,“ SKB, Stockholm, 2006.
- [68] Nagra, „NTB-02-05: Project Opalinus Clay. Safety Report. Demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and long-lived intermediate-level waste (Entsorgungsnachweis),“ Nagra, Wettingen, 2002.
- [69] B. Kienzler und A. Loida, „FZKA-6651: Endlagerrelevante Eigenschaften von hochradioaktiven Abfallprodukten. Charakterisierung und Bewertung. Empfehlung des Arbeitskreises HAW-Produkte,“ KIT, Karlsruhe, 2001.
- [70] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU), „Verordnung über Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle (Endlagersicherheitsanforderungsverordnung – EndlSiAnfV). Verordnungsentwurf mit Stand vom 06.04.2020,“ BMU, Berlin, 2020.
- [71] N. C. Garisto, W. Newmyer und A. Ho, „NWMO-2014-08: Criticality Safety Computations for Spent CANDU Fuel in a Deep Geologic Repository,“ NWMO, Toronto, 2014.
- [72] G. Radulescu und J. C. Wagner, „Burn-up Credit Criticality Safety Benchmark - Phase VII,“ OECD-NEA, Issy-les-Moulineaux, 2012.
- [73] Radioactive Waste Management, „NDA Report DSSC/458/01: Geological Diposal. Criticality Safety Status Report,“ RWM, Didcot, 2016.
- [74] L. Agrenius, „TR-02-17: Criticality safety calculations of storage canisters,“ SKB, Stockholm, 2002.
- [75] M. Anttila, „POSIVA-WR-2005-13: Criticality Safety Calculations for Three Types of Final Disposal Canisters,“ Posiva Oy, Olkiluoto, 2005.
- [76] Czech State Office for Nuclear Safety, „Regulation No. 195/1999 Sb. of the State Office for Nuclear Safety of August 21, 1999 on Requirements on Nuclear Installations for Assurance of Nuclear Safety, Radiation Protection and Emergency Preparedness,“ pp. 1-24, 21 08 1999.
- [77] Czech The State Office for Nuclear Safety, „Decree No. 379 of 7th November 2016 concerning the approval of some products in the field of peaceful use of nuclear energy and ionising radiation and the carriage of radioactive or fissile material,“ pp. 1-101, 7 11 2016.
- [78] Canadian Nuclear Safety Commission CNSC, *RD-327: Nuclear Criticality Safety*, Ottawa: CNSC, 2010.
- [79] U.S. DoE - Office of Civilian Radioactive Waste Management, „DOE/RW-0539-1: Yucca Mountain Science and Engineering Report. Technical Information Supporting Site Recommendation Consideration (Revision 1),“ U. S. Department of Energy, Las Vegas, 2002.

- [80] R. Patel, C. Punshon, J. Nicholas, P. Bastid, R. Zhou, C. Schneider, N. Bagshaw, D. Howse, E. Hutchinson, R. Asano und F. King, „NTB-12-06: Canister Design Concepts for Disposal of Spent Fuel and High Level Waste,“ Nagra, Wettingen, 2012.
- [81] Andra, „Dossier d'Options de Sûreté Partie Exploitation,“ Andra, Châtenay-Malabry, 2016.
- [82] M. Jobmann, L. Uhlig, P. Amelung, D. Billaux, M. Polster, H. Schmidt und L. Uhlig, „Untersuchungen zur sicherheitstechnischen Auslegung eines generischen Endlagers im Tonstein in Deutschland (GENESIS). Abschlussbericht,“ DBE TECHNOLOGY, Peine, 2007.
- [83] Reaktor-Sicherheitskommission, „RSK – Stellungnahme "Strahlenschäden im Steinsalz" vom 09.03.2006 (391. Sitzung),“ RSK-Geschäftsstelle, Bonn, 2006.
- [84] EURIDICE, „ESV Euridice Gie - European Underground Research Infrastructure for Disposal of nuclear waste in Clay Environment,“ Euridice, Mol, 2007.
- [85] SKB, „SKB-TR-10-46: Fuel and canister process report for the safety assessment SR-Site,“ SKB, Stockholm, 2010.
- [86] K. Ikonen, „Posiva-WR-2006-19: Fuel Temperature in Disposal Canisters,“ Posiva Oy, Olkiluoto, 2006.
- [87] H. Kim, O. J. Kwon, G.-U. Kang und D.-G. Lee, „Comparisons of prediction methods for peak cladding temperature and effective thermal conductivity in spent fuel assemblies of transportation/storage casks,“ *Annals of Nuclear Energy* 71, pp. 427-435, 16 05 2014.
- [88] J. Lee, W. C. K. Bang, K. Seo und S. Yoo, „Thermal-fluid flow analysis and demonstration test of a spent fuel storage system,“ *Nuclear Engineering and Design* 239, pp. 551-558, 11 12 2008.
- [89] IAEA, „TECDOC-1343: Spent fuel performance assessment and research,“ IAEA, Wien, 2003.
- [90] R. Guo, „NWMO-TR-2015-06: Thermal Modelling of a Mark II Container,“ NWMO, Toronto, 2015.
- [91] ONDRAF/NIRAS, „NIROND-2001-05-E: Technical overview of the SAFIR 2 report,“ ONDRAF/NIRAS, Brüssel, 2001.
- [92] Radioactive Waste management, „NDA Report DSSC/451/01: Geological Disposal: Waste Package Evolution Status Report,“ NDA, Didcot, 2016.
- [93] U.S. NRC Office of Nuclear Material Safety and Safeguards, „NUREG-1536: Standard Review Plan for Spent Fuel Dry Storage Systems at a General License Facility. Final Report,“ U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, D.C., 2010.
- [94] NWMO, „NWMO-TR-2012-16: Used Fuel Repository Conceptual Design and Postclosure Safety Assessment in Crystalline Rock. Pre-Project Report,“ NWMO, Toronto, 2012.

- [95] W. Bollingfehr, W. Filbert, C. Lerch und M. Tholen, „GRS-272: Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben (VSG). Bericht zum Arbeitspaket 5 - Endlagerkonzepte,“ GRS, Köln, 2012.
- [96] L. Werme, „SKB-TR-98-08: Design premises for canister for spent nuclear fuel,“ SKB, Stockholm, 1998.
- [97] Energy Solutions, „DoE Advisory and Assistance Contract. Task Order 18: Generic Design for Small Standardized Transportation, Aging and Disposal Canister Systems. Updated Final Report,“ Energy Solutions, 2015.
- [98] WEKA Media GmbH & Co. KG, „7.5. Vorschriften für die Be- und Entladung und für die Handhabung - Sonderregelungen CV33/CW33,“ in *Gefahrgutrecht Straße/Schiene: ADR/RID 2019 + Nationale Vorschriften*, Kissing, WEKA Media GmbH & Co. KG, 2019, pp. 1686-1691.
- [99] M. J. White und D. Hutchinson, „Generic Specification for Waste Packages Containing High Heat Generating Waste: Impact of Geological Disposal Concepts on Packaging Criteria,“ Galson Sciences Ltd., Rutland, 2013.
- [100] WEKA Media GmbH & Co. KG, „6.4. Vorschriften für den Bau, die Prüfung und die Zulassung von Versandstücken für radioaktive Stoffe sowie für die Zulassung solcher Stoffe,“ in *Gefahrgutrecht Straße/Schiene. ADR/RID 2019 + Nationale Vorschriften*, Kissing, WEKA Media GmbH & Co. KG, 2019, pp. 1401-1432.
- [101] GNS Gesellschaft für Nuclearservice mbH, *Produktinformation CASTOR(R) HAW28M*, Essen: GNS, 2019.
- [102] M. Lahti, „Towards Implementation of the Spent Nuclear Fuel Repository in Finland,“ in *International Approaches for Deep Geological Disposal of Nuclear Waste: Geological Challenges in Radioactive Waste Isolation. Fifth Worldwide Review*, 2016, pp. 7.1-7.12.
- [103] Deutscher Bundestag, „Strahlenschutzgesetz vom 27. Juni 2017 (BGBl. I S. 1966), das zuletzt durch Artikel 11 des Gesetzes vom 12. Dezember 2019 (BGBl. I S. 2510) geändert worden ist,“ *Bundesgesetzblatt I Nr. 42*, pp. 1966-2067, 03 07 2017.
- [104] Czech State Office for Nuclear Safety, „Implementing Decree No. 422 of 14th December 2016 on Radiation Protection and Security of a Radioactive Source,“ pp. 1-321, 14 12 2016.
- [105] Schweizerischer Bundesrat, „Strahlenschutzverordnung (StSV) vom 26. April 2017 (Stand am 1. Februar 2019),“ *Landesrecht, Abschnitt 81 - Gesundheit/ AS2017*, p. 4261, 01 01 2018.
- [106] Secretary of State, „The Ionising Radiations Regulations 2017 (2017 No. 1075),“ 27 11 2017. [Online]. Available: <http://www.legislation.gov.uk/ukSI/2017/1075/contents/made>. [Zugriff am 10 02 2020].
- [107] Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN), „Projet de stockage Cigéo - Examen du Dossier d'Options de Sûreté. Tome 1,“ IRSN, Fontenay-aux-Roses, 2017.

- [108] U. S. Nuclear Waste Technical Review Board, „Survey of National Programs for Managing High-Level Radioactive Waste and Spent Nuclear Fuel: Update,“ U.S. NWTRB, Arlington, Virginia, 2016.
- [109] Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI), „Spezifische Auslegungsgrundsätze für geologische Tiefenlager und Anforderungen an den Sicherheitsnachweis,“ ENSI, Villigen, 2009.
- [110] Nagra, „entsorgungsprogramm 2016. daran arbeiten wir,“ Nagra, Wettingen, 2016.
- [111] J. Avolahti, „Policy Perspective on R&R in the Finnish Context,“ in *Reversibility and Retrievability in Planning for Geological Disposal of Radioactive Waste. Proceedings of the “R&R” International Conference and Dialogue*, Reims, OECD-NEA, 2010, pp. 27-28.
- [112] A. Gerhardsson, „Reversibility and Retrievability – The Swedish View,“ in *Reversibility and Retrievability in Planning for Geological Disposal of Radioactive Waste. Proceedings of the “R&R” International Conference and Dialogue*, Reims, OECD-NEA, 2010, pp. 45-47.
- [113] O. Kristensson und L. Börgesson, „TR-14-19: Canister Retrieval Test. Final report,“ SKB, Stockholm, 2015.
- [114] Geschäftsstelle der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe, „Anhörung „Rückholung/Rückholbarkeit hoch radioaktiver Abfälle - aus einem Endlager, Reversibilität von Entscheidungen“. Präsentation zum Kurzvortrag von MSc Erik Setzman, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co., Stockholm, Schweden,“ in *16. Sitzung der Kommission am 2. Oktober 2015*, Berlin, 2015.
- [115] Nuclear Decommissioning Authority, „NDA/RWMD/031: Geological Disposal: Package evolution status report,“ NDA, Didcot, 2010.
- [116] C.-G. Andersson, „SKB-TR-02-07: Development of fabrication technology for copper canisters with cast inserts,“ SKB, Stockholm, 2002.
- [117] C.-G. Andersson, P. Eriksson, M. Westman und G. Emilsson, „SKB-TR-04-23: Status report, canister fabrication,“ SKB, Stockholm, 2004.
- [118] SKB, „SKB-TR-06-22: Fuel and canister process report for the safety assessment SR-Can,“ SKB, Stockholm, 2006.
- [119] J. Slovák, „Progress of the Czech Deep Geological Repository Program,“ in *International Approaches for Deep Geological Disposal of Nuclear Waste: Geological Challenges in Radioactive Waste Isolation. Fifth Worldwide Review*, 2016, pp. 6.1-6.17.
- [120] B. Craeye, G. d. Schutter, W. Wacquier, H. V. Humbeeck, A. v. Cotthem und L. Areias, „Closure of the concrete supercontainer in hot cell under thermal load,“ *Nuclear Engineering and Design* 241, pp. 1352-1359, 12 01 2011.
- [121] L. Wilk, „NWMO TR-2013-02: CANDU Fuel Burnup and Power Rating 2012 Update,“ NWMO, Toronto, 2013.

- [122] K.-F. Nilsson, F. Lofaj, M. Burström und C.-G. Andersson, „SKB-TR-05-18: Pressure tests of two KBS-3 canister mock-ups,“ SKB, Stockholm, 2005.
- [123] H. v. Humbeeck, W. Bastiaens, C. d. Bock und A. v. Cotthem, „Experimental Programme to Demonstrate the Viability of the Supercontainer Concept for HLW,“ in *International Conference of Underground Disposal Unit Design & Emplacement Processes for a Deep Geological Repository*, Prag, 2008.
- [124] M. Behler, M. Bock, R. Cannepín, B. Gmal, H. Herbert, R. Kilger, E.-F. Moser, J. Peschke, F. Rowold und M. Xie, „GRS-A-3707: Weiterführende Bearbeitung spezieller Themen im Rahmen generischer Sicherheitsanalysen zur Kritikalität von Kernbrennstoffen in der Nachverschlussphase eines geologischen Endlagers,“ GRS, Köln, 2013.
- [125] U.S. Nuclear Regulatory Council, „Safety Evaluation Report Related to Disposal of High-Level Radioactive Wastes in a Geologic Repository at Yucca Mountain, Nevada. Volume 1: General Information,“ U.S. NRC - Office of Nuclear Material Safety and Safeguards, Washington D.C., 2010.
- [126] F. Littmann, C. Clementi und L. Capineri, „Comparison of Tagging Technologies for Safeguards of Copper Canisters for Nuclear Spent Fuel,“ *Sensors* 18, pp. 929-945, 21 03 2018.
- [127] Entsorgungskommission (ESK), „EMPFEHLUNG der Entsorgungskommission - Anforderungen an Endlagergebinde zur Endlagerung Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle,“ ESK-Geschäftsstelle, Bonn, 2017.
- [128] E. P. Kremer, „Durability of the Canadian used fuel container,“ *Corrosion Engineering, Science and Technology* 52, pp. 173-177, 02 05 2017.
- [129] SKB, „TR-10-50: Radionuclide transport report for the safety assessment SR-Site,“ SKB, Stockholm, 2010.
- [130] O. Karnland, „POSIVA-98-01: Bentonite swelling pressure in strong NaCl solutions. Correlation of model calculations to experimentally determined data,“ Posiva Oy, Helsinki, 1998.
- [131] M. E. Elmashad und A. A. Ata, „Effect of seawater on consistency, infiltration rate and swelling characteristics of montmorillonite clay,“ *HBRC (Housing and Building National Research Center) Journal* 12, pp. 175-180, 02 12 2014.
- [132] G. Xiang, Y. Xu, F. Yu, Y. Fang und Y. Wang, „Prediction of Swelling Characteristics of Compacted GMZ Bentonite in Salt Solution Incorporating Ion-Exchange Reactions,“ *Clays and Clay Minerals* 67, pp. 163-172, 2019.
- [133] GNS Gesellschaft für Nuclearservice mbH, *Produktinformation CASTOR(R) V/19*, Essen: GNS, 2019.
- [134] GNS Gesellschaft für Nuclearservice mbH, *Produktinformation CASTOR(R) V/52*, Essen: GNS, 2019.
- [135] GNS Gesellschaft für Nuclearservice mbH, *Produktinformation CASTOR(R) MTR3*, Essen: GNS, 2019.

- [136] N. R. Smart, D. J. Blackwood und L. Werme, „TR-01-22: The anaerobic corrosion of carbon steel and cast iron in artificial groundwaters,“ SKB, Stockholm, 2001.
- [137] VDI-Fachbereich Produktentwicklung und Mechatronik, VDI 2222 Blatt 1: Konstruktionsmethodik - Methodisches Entwickeln von Lösungsprinzipien, Düsseldorf: VDI, 1997.
- [138] T. Hassel, A. Köhler und Ö. S. Kurt, „ENTRIA-Arbeitsbericht 16: Das ENCON-Behälterkonzept – Generische Behältermodelle zur Einlagerung radioaktiver Reststoffe für den interdisziplinären Optionenvergleich,“ Leibniz-Universität Hannover - Institut für Werkstoffkunde, Hannover, 2019.
- [139] N. Diomidis, „Disposal canister requirements in context of the Swiss geological repository concept,“ Nagra, Bern, 2015.
- [140] C.-G. Andersson, „SKB-TR-98-09: Test manufacturing of copper canisters with cast inserts,“ SKB, Stockholm, 1998.
- [141] Deutsche Gesellschaft für Wiederaufarbeitung von Kernbrennstoffen, „Auslegungsbericht POLLUX-8-DWR-BE,“ DWK, Hannover, 1987.
- [142] D. Emendörfer und K.-H. Höcker, Theorie der Kernreaktoren, Band 1: Der stationäre Reaktor, Mannheim: Bibliographisches Institut, 1982.
- [143] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, „Programm für eine verantwortungsvolle und sichere Entsorgung bestrahlter Brennelemente und radioaktiver Abfälle (Nationales Entsorgungsprogramm),“ BMUB, Berlin, 2015.
- [144] Andra, „Stockage réversible profond: Options de Conception du Stockage en Formation Géologique profonde,“ Andra, Bure, 2009.
- [145] M. F. Ashby, Materials Selection in Mechanical Design (2nd edition), Oxford: Butterworth Heinemann, 1999.
- [146] C. Pereira, C. Velasquez, R. Sousa, A. Fortini, A. Costa, C. da Silva, M. Veloso, A. de Oliveira und F. de Carvalho, „Spent fuel criticality and compositions evaluation for long-term disposal in a generic cask,“ *Nuclear Engineering and Design* 275, pp. 168-178, 09 04 2014.
- [147] A. Vasiliev, J. Herrero, M. Pecchia, D. Rochman, H. Ferroukhi und S. Caruso, „Preliminary Assessment of Criticality Safety Constraints for Swiss Spent Nuclear Fuel Loading in Disposal Canisters,“ *materials* 12, pp. 494-523, 5 02 2019.