

Kommission
Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe
K-MAT 58

Gutachten

Flächenbedarf für ein Endlager für wärmeentwickelnde, hoch radioaktive Abfälle

*Verantwortung
für Generationen*
*Responsibility
for Generations*

DBETEC
DBE TECHNOLOGY GmbH

Inhaltsverzeichnis

	Blatt
Executive Summary	4
1 Auftrag und Zielstellung des Gutachtens	8
1.1 Eckpunkte zur Angebotseinholung	8
1.2 Ergänzung zu den Eckpunkten	9
2 Planungsgrundlagen	12
2.1 Endlagergebinderströme	12
2.2 Abfallmengengerüst, Zwischenlagerzeit und Einlagerungsabfolge	13
2.2.1 Abfallmengengerüst	13
2.2.2 Zwischenlagerzeit und Einlagerungsablauf	14
2.3 Thermische Auslegungsparameter	15
2.3.1 Geothermisches Temperaturfeld	16
2.3.2 Kontaktbereich Endlagerbehälter mit Wirtsgestein	16
2.3.3 Wärmeleistung der radioaktiven Abfälle und ausgedienten Brennelemente	16
2.4 Sicherheitsabstände	19
2.5 Mindestpfeilerbreiten	20
2.6 Infrastrukturbereiche	21
2.7 Randbedingungen bei der Planung der Einlagerungsfelder	21
3 Berechnung der erforderlichen Endlagerflächen	23
3.1 Endlagervariante Salz: 200° C Auslegungstemperatur	23
3.1.1 Sonstige Annahmen und Randbedingungen	23
3.1.2 Berechnungsprogramm	30
3.1.3 Berechnungsmodell	30
3.1.4 Ergebnisse der thermischen Auslegung	31
3.1.5 Planung der Einlagerungsfelder	35
3.2 Endlagervariante Salz: 100° C Auslegungstemperatur	37
3.2.1 Sonstige Annahmen und Randbedingungen	38
3.2.2 Berechnungsprogramm	44
3.2.3 Berechnungsmodell	44
3.2.4 Ergebnisse der thermischen Auslegung	45
3.2.5 Planung der Einlagerungsfelder	50

3.3	Endlagervariante Tonstein: 100 °C Auslegungstemperatur	52
3.3.1	Sonstige Annahmen und Randbedingungen	53
3.3.2	Berechnungsprogramm	58
3.3.3	Berechnungsmodell	58
3.3.4	Ergebnisse der thermischen Auslegung	59
3.3.5	Planung der Einlagerungsfelder	63
3.4	Endlagervariante Granit 100°C Auslegungstemperatur	65
3.4.1	Sonstige Annahmen und Randbedingungen	66
3.4.2	Berechnungsprogramm	71
3.4.3	Berechnungsmodell	72
3.4.4	Ergebnisse der thermischen Auslegung	73
3.4.5	Planung der Einlagerungsfelder	77
4	Vergleichende Gegenüberstellung der berechneten Gesamtendlagerflächen	80
5	Literatur	82
6	Abbildungsverzeichnis	85
7	Tabellenverzeichnis	88
8	Abkürzungsverzeichnis	90
9	Anlagenverzeichnis	92

Executive Summary

Die DBE TECHNOLOGY GmbH wurde vom Deutschen Bundestag mit Schreiben vom 14.12.2015 beauftragt, die Fragestellung "Flächenbedarf für ein Endlager für wärmeentwickelnde, hochradioaktive Abfälle" entsprechend vorgegebenen Eckpunkten und auf Grundlage des dazu vorgelegten Angebots und Exposés zu bearbeiten und ein Gutachten darüber zu schreiben.

DBE TECHNOLOGY GmbH war in der Lage, in der vorgegebene Zeit ein solches Gutachten anzufertigen, weil einerseits sehr umfangreiches, endlagerspezifisches Berechnungs- und Planungswissen im Unternehmen vorhanden ist und weil andererseits auf Erkenntnisse aus einer Reihe von bereits abgeschlossenen - im Wesentlichen vom BMWi geförderten - FuE-Vorhaben zur Auslegung von Endlagern für die drei Wirtsgesteine Salz, Ton und Granit zurückgegriffen werden konnte.

Im vorliegenden Gutachten wird auftragsgemäß dargestellt, wie der Flächenbedarf für ein Endlager für insbesondere wärmeentwickelnde hochradioaktive Abfälle und ausgediente Brennelemente für vier vorgegebene Endlagervarianten ermittelt wurde und welche Gesamtendlagerflächen dabei berechnet wurden.

Als Eckpunkte wurden im Auftrag vorgegeben:

- das Abfallvolumen entsprechend dem Programm für eine verantwortungsvolle und sichere Entsorgung bestrahlter Brennelemente und radioaktiver Abfälle "Nationales Entsorgungsprogramm (NaPro)",
- vier Endlagervarianten (Auslegungstemperaturen Salz 200°C und 100°C, Ton 100°C, Granit 100°C),
- modellhaft zylindrische, metallische Behälter jeweils mit dem Inventar eines derzeit üblichen Zwischenlagerbehälters,
- Bestimmung der anfallenden Nachzerfallswärme für die einzelnen Behälter in einer modellhaften Verteilung, die die Realität für die Fragestellung hinreichend genau abbildet,
- Einlagerungskonzept für die Wirtsgesteine Salz und Ton ist die einsöhlige Streckenlagerung; für das Wirtsgestein Granit ist (gemäß dem schwedischen Referenz-Einlagerungskonzept (KBS-3V)) die Einlagerung einzelner Behälter in vertikale Bohrlöcher vorgesehen,
- eine gleichmäßige und kontinuierliche Einlagerung der Behälter im Zeitraum von 2050 bis 2080 (30 Jahre Einlagerungsdauer).

Die auch im Gutachten beschriebene Vorgehensweise zur Lösung der Fragestellung bestand darin, in einem ersten Schritt die vorgegebenen Planungsgrundlagen zu prüfen und für die Aufgabenstellung zwingend notwendige Ergänzungen und Änderungen abzustimmen und zusammenzustellen. In einem zweiten Schritt wurden dann die gewählten Materialparameter für die Wirtsgesteine, für die Behälter und Versatzmaterialien sowie die Berechnungsprogramme, Berechnungsmodelle und die Ergebnisse der durchgeführten thermischen Berechnungen dargestellt. In einem dritten Schritt schließlich wurden die Teilflächen und Gesamtflächen für die vier Endlagervarianten berechnet. Dabei waren neben den thermisch bedingten und berechneten Behälter-, Strecken und Bohrlochabständen auch die bergbau-

lich und transport- und einlagerungstechnisch notwendigen Mindestabstände zu berücksichtigen. Darüber hinaus galt es die für die Errichtung, den Betrieb und den Verschluss des Endlagers notwendigen Flächen für Infrastrukturräume zu ermitteln und erforderliche Sicherheitsabstände zu thermisch empfindlichen geologischen Einheiten oder zu klüftigen und potenziell lösungsführenden Gesteinen und Nebengesteinen einzubeziehen.

Als ergänzende Planungsgrundlage wurde mit der Leitung der AG3 der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe vereinbart, zur besseren Vergleichbarkeit der berechneten Gesamtendlagerflächen eine einheitliche Teufe von 600 m für alle Endlagervarianten zu wählen. Wegen der bekannten Überschreitung der Auslegungstemperaturen von 100°C bei Verwendung von Behältern mit dem Inventar von Zwischenlagerbehältern wurden für jede Endlagervariante geeignete Behälter mit angepasstem Inventar gewählt, so dass im Ergebnis die geforderte Auslegungstemperatur eingehalten werden konnte. Nur für die Endlagervariante Salz 200° C konnten die Berechnungen und Planungen mit Transport- und Lagerbehältern (TLB) in horizontalen Einlagerungsbohrlöchern durchgeführt werden, ohne die Auslegungstemperatur zu überschreiten.

Bevor die thermischen Auslegungsberechnungen gestartet werden konnten, war es erforderlich, im Detail die verschiedenen Arten der Wiederaufarbeitungsabfälle und ausgedienten Brennelemente in sogenannte Endlagergebinderströme zu klassifizieren, die Endlagergebinder und Einlagerungskonzepte zu wählen, eine Reihenfolge der Einlagerung festzulegen und die Zwischenlagerzeiten bis zum Einlagerungsbeginn und über die mit 30 Jahren vorgegebene Betriebszeit zu bestimmen. Darüber hinaus wurden die Materialparameter für die drei Wirtsgesteine, die gewählten Endlagergebinder, den Versatz und das Puffermaterial recherchiert und festgelegt. Der geothermische Tiefengradient wurde für alle Wirtsgesteine einheitlich mit 3K/100 m Teufe gewählt, so dass im Einlagerungshorizont (600m Teufe) eine Gebirgstemperatur von 27°C vorherrscht. Die thermischen Berechnungen wurden mit Hilfe des Programms FLAC3D[®] in der Version 5.1 durchgeführt. Flac3D[®] ist ein Programm zur Berechnung von dreidimensionalen Multiphysics-Modellen auf der Basis der Finite-Differenzen-Methode. Damit können derzeit thermisch (T), mechanisch (M) und hydraulisch (H) gekoppelte Systeme modelliert und berechnet werden.

Die Ermittlung des Flächenbedarfs wurde getrennt für die vier vorgegeben Endlagervarianten durchgeführt. Dabei wurden jeweils Teilgrubengebäudeplanungen erstellt, die zum einen die Mindestbehälter-, Bohrloch- und Streckenabstände aus den thermischen Berechnungen, zum anderen aber auch die bergbaulich und transport- und einlagerungstechnisch notwendigen Mindestabstände berücksichtigen. Für alle drei Wirtsgesteine sind dabei u.a. Mindestpfeilerbreiten zwischen zwei benachbarten Einlagerungsstrecken bzw. Beschickungsstrecken zu beachten, die im Falle des Salzes der doppelten Streckenbreite und im Granit dem 2,5-fachen der Streckenhöhe entsprechen; bei Tonstein ist aufgrund seiner geringeren Festigkeit die 5-fache Streckenbreite dafür vorzusehen. Darüber hinaus wurden Flächen ermittelt, die für Infrastrukturräume zur Errichtung, zum Betrieb und zum Verschluss des Endlagers benötigt werden. Abschließend wurden aus den Sicherheitsabständen zu thermisch empfindlichen geologischen Einheiten oder zu klüftigen und potenziell lösungsführenden Gesteinen und Nebengesteinen die resultierenden Flächen abgeschätzt.

In der nachfolgenden Tabelle sind die Berechnungsergebnisse für den Gesamtflächenbedarf für die vier zu untersuchenden Endlagervarianten zusammengefasst.

Tabelle 0-1: Gesamtendlagerflächenbedarf

Endlagervariante Flächenermittlung	Salz 200°C	Salz 100°C	Tonstein 100°C	Granit 100°C
Erforderliche Pfeilerbreite zwischen Einlagerungsstrecken	2,0 x Breite der Strecke	2,0 x Breite der Strecke	5,0 x Breite der Strecke	2,5 x Höhe der Strecke
Erforderliche Endlagerfläche für Gebinde (m ²)	800.800	1.632.600	4.871.000	2.212.700
Erforderlicher Sicherheitsabstand (m)	50	50	40	100
Erforderliche Endlagerfläche aus Sicherheitsabstand (m ²)	228.000	401.200	1.082.000	1.026.000
Erforderliche Fläche für Infrastrukturbereich (m ²)	250.000	250.000	630.000	320.000
Gesamtendlagerfläche (m²)	1.278.800	2.283.800	6.583.000	3.558.700

Zum besseren Verständnis der berechneten Teil- und Gesamtendlagerflächen sind folgende Hinweise zu beachten. Der Flächenbedarf für Infrastrukturbereiche und Mindestabstände zwischen Einlagerungsstrecken wird im Wesentlichen durch die erforderliche Pfeilerbreite bestimmt. Diese ist wirtsgesteinsabhängig und zeigt für Kristallin und Steinsalz ähnliche Werte, für Tonstein deutlich höhere Beträge.

Die Gebirgstemperatur beträgt in der angenommenen Teufe von 600m rund 27°C. Das bedeutet, dass bei einer Auslegungstemperatur von 100°C die nutzbare Temperaturdifferenz 63 K beträgt, bei einer Auslegungstemperatur von 200°C jedoch 163 K. Damit steht für Salz bei 200°C Auslegungstemperatur im Vergleich eine um den Faktor von ca. 2,6 höhere aufnehmbare Temperaturdifferenz zur Verfügung. Dieser Effekt spiegelt sich in dem unterschiedlichen Flächenbedarf für Gebinde für die beiden Einlagerungsvarianten im Wirtsgestein Salz wider, wobei die höhere Wärmeleitfähigkeit des Salzes in der Endlagervariante Salz 100° C diesen Effekt teilweise ausgleicht.

Bei gleicher Auslegungstemperatur (100°C) ergibt sich der Unterschied im Gesamtflächenbedarf für die drei Endlagervarianten im Wesentlichen aus dem Einfluss der unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeit des Wirtsgesteins und des gewählten Versatzmaterials. So muss bei der Endlagervariante Granit 100° C Auslegungstemperatur die Pufferschicht von 0,35 m Bentonit mit der entsprechend reduzierten Wärmeleitfähigkeit berücksichtigt werden. Bei der Endlagervariante Ton 100°C Auslegungstemperatur ist zusätzlich der Einfluss der erforderli-

chen Pfeilerbreiten mit zu berücksichtigen. Für die Endlagervariante Salz 100°C sind diese beiden Effekte nicht zu berücksichtigen.

Als Planungsgröße im Rahmen des Standortauswahlverfahrens empfiehlt sich, die folgenden Gesamtendlagerflächen anzusetzen:

- Endlagervariante Salz; 200°C Auslegungstemperatur: 1,28 km²
- Endlagervariante Salz; 100°C Auslegungstemperatur: 2,28 km²
- Endlagervariante Ton; 100°C Auslegungstemperatur: 6,58 km²
- Endlagervariante Granit; 100°C Auslegungstemperatur: 3,56 km²

1 Auftrag und Zielstellung des Gutachtens

Die Kommission zur Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe hat ihre Arbeit im Mai 2014 gemäß dem Standortauswahlgesetz (StandAG) aufgenommen und soll ihren Abschlussbericht bis Ende Juni 2016 vorlegen, /StandAG 2013/. Die Arbeitsgruppen der Kommission werden wesentliche Teile des Abschlussberichtes erstellen. Die Arbeitsgruppe 3 (AG3) "Gesellschaftliche und technisch-wissenschaftliche Entscheidungskriterien sowie Kriterien für Fehlerkorrekturen" beschäftigt sich u. a. mit Entsorgungsoptionen und mit den Grundlagen für einen möglichen Vergleich von Endlagerkonzepten in verschiedenen Wirtsgesteinen. In diesem Zusammenhang stellt sich auch die Frage nach dem Flächenbedarf für ein Endlager für insbesondere wärmeentwickelnde hochradioaktive Abfälle und ausgediente Brennelemente. Die DBE TECHNOLOGY GmbH wurde vom Deutschen Bundestag mit Schreiben vom 14.12.2015 (s. Anlage 1) beauftragt, die Fragestellung "Flächenbedarf für ein Endlager für wärmeentwickelnde, hochradioaktive Abfälle" entsprechend den vorgegebenen Eckpunkten zur Angebotseinholung (s. Anlage 2) und dem eingereichten Exposé (s. Anlage 3) zu bearbeiten und ein Gutachten darüber zu schreiben.

1.1 Eckpunkte zur Angebotseinholung

In den Eckpunkten zur Angebotseinholung sind die Aufgabenstellung und das Ziel des Gutachtens formuliert. Demnach ist der Auftrag die Erstellung eines Gutachtens, in dem berechnet wird, welche Flächen für ein Endlager erforderlich sind, um in Deutschland angefallene und noch anfallende wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle und ausgediente Brennelemente aufzunehmen. Die wesentliche limitierende Größe ist dabei die maximale Temperatur die an der Kontaktfläche Endlagerbehälter/Wirtsgestein bzw. Endlagerbehälter/Bentonit auftritt. Die maximale Temperatur darf die Auslegungstemperatur nicht überschreiten.

Grundlage ist das Abfallvolumen entsprechend dem Programm für eine verantwortungsvolle und sichere Entsorgung bestrahlter Brennelemente und radioaktiver Abfälle "Nationales Entsorgungsprogramm (NaPro)" /BMUB 2015/. Insgesamt sind vier Endlagervarianten zu betrachten, die sich nach Wirtsgestein und Auslegungstemperatur unterscheiden, Tabelle 1-1.

Tabelle 1-1: Endlagervarianten

Endlagervariante	Wirtsgestein	Auslegungstemperatur [C°]
Salz 200	Salz	200
Salz 100	Salz	100
Ton 100	Tonstein	100
Granit 100	Granit	100

Es ist eine gleichmäßige und kontinuierliche Einlagerung der Behälter im Zeitraum von 2050 bis 2080 (30 Jahre Einlagerungsdauer) zugrunde zu legen.

Die anfallende Nachzerfallswärme ist für die einzelnen Behälter in einer modellhaften Verteilung zu bestimmen, die die Realität für die Fragestellung hinreichend genau abbildet (reale Abklingzeiten, Berücksichtigung besonderer Effekte, die zu besonders hoher oder niedriger Nachzerfallswärme bei bestimmten Gruppen von Behältern führen, z. B. MOX-Brennelemente oder HTR-Brennelemente).

Als Behälter können modellhaft zylindrische, metallische Behälter jeweils mit dem Inventar eines derzeit üblichen Zwischenlagerbehälters zugrunde gelegt werden.

Für die Wirtsgesteine Salz und Ton soll als Einlagerungskonzept die einsöhlige Streckenlagerung vorgesehen werden. Für das Wirtsgestein Granit soll das schwedische Referenz-Einlagerungskonzept (KBS-3V) vorgesehen werden, in dem ein Behälter pro vertikales Kurzbohrloch eingelagert werden soll.

1.2 Ergänzung zu den Eckpunkten

In der Angebotsphase wurden mit der Geschäftsstelle der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfälle Widersprüche in den Eckpunkten zur Angebotseinholung thematisiert und im Angebot und Exposé zum Gutachten geeignete Lösungsansätze vorgeschlagen. Nach Auftragserteilung wurde dazu mit der Leitung der AG3 Einvernehmen erzielt und dementsprechend folgende zusätzliche detaillierte Planungsrandbedingungen für das Gutachten festgelegt.

- Tabellarische Zusammenfassung (Tabelle 1-2) der wärmeentwickelnden radioaktiven Abfälle gemäß NaPro, ergänzt um die Nennung der entsprechenden Transport- und Zwischenlagerbehälter (TLB) so, wie sie auch in der vorläufigen Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben (VSG) /VSG AP5 2011/ angesetzt wurden.
- Für alle vorgegebenen Endlagervarianten wird festgelegt, dass die "kleinen" TLB CASTOR[®] THTR/AVR, CASTOR[®] KNK und CASTOR[®] MTR2 aufgrund ihrer geringen Wärmeentwicklung in horizontalen Strecken des Endlagerbergwerkes eingelagert werden (Streckenlagerung).
- Untersuchungen im Rahmen des industriegeförderten Projektes DIREGT (Direkte Endlagerung von Transport- und Lagerbehältern bis 160 t) /DIREGT 2016/ zeigten, dass eine Streckenlagerung von Transport- und Lagerbehältern mit ausgedienten Brennelementen im Wirtsgestein Salz bei einer Auslegungstemperatur von 200° C an der Kontaktfläche Endlagerbehälter/Wirtsgestein nicht möglich ist. Es wurde dort aber nachgewiesen, dass bei einer Einlagerung in horizontalen Kurzbohrlöchern die Auslegungstemperatur eingehalten werden kann. Dieses Einlagerungskonzept wird hier deshalb anstelle der vorgesehenen Streckenlagerung zugrunde gelegt.
- Für die Endlagervarianten Salz 100 und Ton 100 wird, wie vorgegeben, die Streckenlagerung zugrunde gelegt. Als Endlagergebäude werden POLLUX[®]-Behälter mit angepasstem Inventar zur Einhaltung des Temperaturkriteriums 100°C genutzt.

Tabelle 1-2: Abfallmengengerüst nach NaPro und VSG für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle und ausgediente Brennelemente

Abfallart		Endlagerbehälter	
		Bezeichnung	Anzahl
Ausgediente Brennelemente	DWR	CASTOR® V/19	736
	SWR	CASTOR® V/52	300
	WWER	CASTOR® 440/84	61
Summe aus Leistungsreaktoren		-	1097 ^{*)} (~ 1100 ^{**)})
CSD-V	AREVA NC (F)	CASTOR® HAW 20/28 CG CASTOR® HAW 28M TN 85 TS 28 V	108
	Sellafield Ltd. (UK) (UK-HAW)	CASTOR® HAW 28M	21
	VEK (D) (WAK-HAW)	CASTOR® HAW 20/28 CG	5
CSD-B	AREVA NC (F)	CASTOR® HAW 28M	5
CSD-C	AREVA NC (F)	CASTOR® HAW 28M	152
Summe Wiederaufarbeitungsabfälle		-	291
Ausgediente Brennelemente aus Versuchs- und Prototyp-KKWs und Forschungsreaktoren	AVR	CASTOR® THTR/AVR	152
	THTR		305
	KNK II		
	Otto-Hahn	CASTOR® KNK	4
	FRM II		30
	BER II	CASTOR® MTR 2	20
Summe		-	50 (53 ^{**)}) 511 (514 ^{**)})

^{*)} Quelle VSG

^{**)} Anfrage zum Gutachten

- Für die Endlagervariante Granit 100 wird das Konzept der Einlagerung von speziell angepassten Behältern in vertikale Bohrlöcher zugrunde gelegt, das auf der erprobten Einlagerungstechnik von Brennstabkokillen basiert.
- Aus Vergleichbarkeitsgründen wird die Teufenlage der einsöhligen Endlager für alle Endlagervarianten auf 600 m unter GOK festgelegt. Damit wird zum einen eine bessere Vergleichbarkeit des berechneten Flächenbedarfs hergestellt und zum anderen an international verfolgte Endlagerkonzepte angeknüpft. Auf die aus bergbaulichen, geomechanischen und geothermischen Gründen möglichen unterschiedlichen Teufenlagen wird hier bewusst verzichtet (Salzstock ca. 900 m Teufe, Tonstein und Kristallin ca. 500 bis 600 m).
- Für die zur Ermittlung der Endlagerfläche u. a. erforderlichen Streckenquerschnitte für Transport und Einlagerung wird die in Deutschland entwickelte und demonstrierte gleisgebundene Einlagerungstechnik für die Endlagervarianten Salz 200, Salz 100 und Granit 100 zugrunde gelegt. Für die Endlagervariante Ton 100 wird auf die im Vorhaben ERATO /ERATO 2010/ beschriebene Vorzugsvariante der Streckenlagerung mit der dafür geplanten Streckenbreite der Einlagerungsstrecke zurückgegriffen.

2 Planungsgrundlagen

Im vorliegenden Gutachten werden die Berechnung des Flächenbedarfs und die Ergebnisse für Endlager für insbesondere wärmeentwickelnde hochradioaktive Abfälle und ausgediente Brennelemente für die Wirtsgesteine Salz, Tonstein und Granit dargestellt. Dazu werden zunächst die über das Exposé hinausgehenden Planungsgrundlagen und Eingangsparameter zusammengestellt, die für die Berechnungen des Flächenbedarfs benötigt werden (s. Unterkapitel 2.1 bis 2.7).

2.1 Endlagergebündeströme

Das in der Tabelle 1-2 dargestellte Abfallmengengerüst wird für die nachfolgenden Planungen und Berechnungen entsprechend der Wärmeleistung der radioaktiven Abfälle und ausgedienten Brennelementen in sogenannte Endlagergebündeströme unterteilt:

- Endlagergebündestrom 1: Brennelemente aus AVR, THTR, KNK II, Otto-Hahn und BER II
- Endlagergebündestrom 2: Wiederaufarbeitungsabfälle und Brennelemente aus Leistungsreaktoren
 - Endlagergebündestrom 2.1: CSD-B und CSD-C
 - Endlagergebündestrom 2.2: WWER-Brennelemente
 - Endlagergebündestrom 2.3: CSD-V
 - Endlagergebündestrom 2.4: DWR- und SWR-Brennelemente
- Endlagergebündestrom 3: Brennelemente aus dem FRM II

Im Endlagergebündestrom 1 werden ausgediente Brennelemente aus Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken sowie Forschungsreaktoren zusammengefasst, die nur in einem geringen Umfang Wärme freisetzen. Für diese Abfallart kann ohne vorherige thermische Auslegungsberechnungen die Endlagerung in Strecken geplant werden, wobei nur bergbauliche und technische Mindestabstände einzuhalten sind.

Der Endlagergebündestrom 2 enthält die radioaktiven Abfälle aus der Wiederaufarbeitung und die ausgedienten Brennelemente der Leistungsreaktoren. Entsprechend der unterschiedlichen Wärmeleistung dieser Abfälle und Brennelemente erfolgt eine Unterteilung in vier Teilströme. Teilstrom 2.1 enthält wie der Endlagergebündestrom 1 Gebinde mit einer so geringen Wärmefreisetzung, dass die Einlagerungsgebinde ohne vorherige thermische Auslegungsberechnung unter Berücksichtigung der bergbaulichen und technischen Mindestabstände eingeplant werden kann. Im Unterschied zum Endlagergebündestrom 1, bei dem "kleine" Transport- und Lagerbehälter verwendet werden, kommen in Teilstrom 2.1 Kokillen zum Einsatz. Die mit CSD-B bezeichneten Kokillen enthalten verglaste Spülwässer aus der Wiederaufarbeitung; Kokillen der Bezeichnung CSD-C enthalten verpresste Strukturteile aus der Zerlegung der Brennelemente und technologische Abfälle aus der Wiederaufarbeitung.

Der Teilstrom 2.2 enthält die gezogenen Brennstäbe von Brennelementen aus Reaktoren russischer Bauart; der Teilstrom 2.3 die verglasten Spaltprodukte aus der Wiederaufarbeitung und der Teilstrom 2.4 die gezogenen Brennstäbe von Brennelementen aus Reaktoren westlicher Bauart. Für die Gebinde der Teilströme 2.2, 2.3 und 2.4 ist durch thermische Auslegungsberechnungen zu überprüfen, mit welchen Abständen sie eingelagert werden können.

Der Endlagergebindestrom 3 schließlich enthält die Brennelemente des Forschungsreaktors FRM-II. Dieser Gebindestrom wird vom Gebindestrom 1 getrennt, da die zeitlichen Bedingungen, unter denen diese Brennelemente anfallen, unklar sind, die Wärmeleistung jedoch nicht in jeder Endlagervariante unberücksichtigt bleiben kann.

Für das Gutachten wird angenommen, dass der Endlagergebindestrom 3 zuletzt eingelagert wird. Damit kann davon ausgegangen werden, dass zumindest eine Zwischenlagerzeit von fünf Jahren erzielt wird. Die Wärmeleistung der Gebinde ist dann vergleichbar mit denen im Endlagergebindestrom 1.

2.2 Abfallmengengerüst, Zwischenlagerzeit und Einlagerungsabfolge

2.2.1 Abfallmengengerüst

Für den zeitlich gestaffelten Anfall der Abfallmengen nach Tabelle 1-2 werden in Tabelle 2-1 die Daten der VSG /VSG AP3 2011/ verwendet, denen auch ein 30-jähriger Einlagerungsbetrieb (2050 - 2080) zugrunde liegt.

Tabelle 2-1: Anfall der Brennelemente und Kokillen (Stück) in Abhängigkeit von der Zeit sowie Zwischenlagerzeit bezogen auf eine Inbetriebnahme des Endlagers im Jahr 2050

Zwischenlagerzeit a	25 - 29 a	30 - 34 a	35 - 39 a	40 - 44 a	45 - 49 a	50 - 54 a	55 - 59 a ^{*1}	60 - 64 a ^{*2}
	01.01.20	01.01.15	01.01.10	01.01.05	01.01.00	01.01.95	01.01.90	01.01.85
Abfallart	31.12.2022 ^{*4}	31.12.19	31.12.14	31.12.09	31.12.04	31.12.99	31.12.94	31.12.89
CSD-V					500	360	1.310	1.565
CSD-B ^{*3}					19	14	50	58
CSD-C ^{*3}					550	395	1.445	1.714
DWR UO2	1.220	1.580	2.150	3.200	2.550	1.600	150	
DWR MOX	60	110	160	700	450	50		
SWR UO2	780	1.730	2.190	5.450	3.550	450	200	
SWR MOX	110		340	350	450			
WWER							5.050	

*1: Brennelemente mit höherem Alter sind subsumiert

*2: Kokillen mit höherem Alter sind mit enthalten

*3: Daten entsprechend NaPro

*4: Ausstieg aus der Kernenergie gemäß /AtG 2011/

2.2.2 Zwischenlagerzeit und Einlagerungsablauf

Für die Auslegungsberechnungen werden folgende Annahmen für den Einlagerungsablauf getroffen. Innerhalb der o. g. Zeitspanne von 30 Jahren erfolgt die Einlagerung der Endlagergebände mit einer gleichmäßigen und kontinuierlichen Rate über die gesamte Betriebsdauer. Wochenenden und Feiertage bleiben dabei unberücksichtigt. Zu einem Zeitpunkt erfolgt immer nur die Einlagerung eines Gebindestroms. Parallel laufende Einlagerungsströme werden in diesem Gutachten nicht betrachtet.

Die hier beschriebenen Endlagergebündeströme 1 bis 3 werden in der genannten Abfolge eingelagert, d. h., dass der Endlagergebündestrom 1 zuerst eingelagert wird und Strom 3 zuletzt. Auf Grundlage der Historie des Anfallens des Abfalls, s. Tabelle 2-1, und der Gebindeanzahl in den einzelnen Endlagergebündeströmen kann die Zwischenlagerzeit bestimmt werden.

In Abbildung 2.1 ist exemplarisch für die Endlagervariante Salz 200 der zeitliche Anfall der Abfälle und der Zeitraum der Einlagerung dargestellt. Für die Endlagervariante Salz 200 sind die zu berücksichtigenden wärmeentwickelnden Abfallarten und die Kokillenanzahl der Tabelle 1-2 zu entnehmen. Das in Tabelle 2-1 in Fünfjahresscheiben aufgelistete Abfallaufkommen wird zur feineren Unterteilung weiter auf Einjahresscheiben verteilt. Während die Wiederaufarbeitungsabfälle (Gebindestrom 2.1 und 2.3) diskontinuierlich entstanden sind und auch die ausgedienten Brennelemente der Leistungsreaktoren nicht gleichmäßig anfallen wird im Endlager von einem gleichmäßigen Einlagerungstakt ausgegangen. Daher wird die Einlagerung der einzelnen Endlagergebündeströme in Abbildung 2.1 als Gerade wiedergegeben. Die Zeitdauer für die Einlagerung der einzelnen Gebündeströme, das ist die Zeitdauer die von der Gerade überstrichen wird, ist proportional zur Gebindeanzahl.

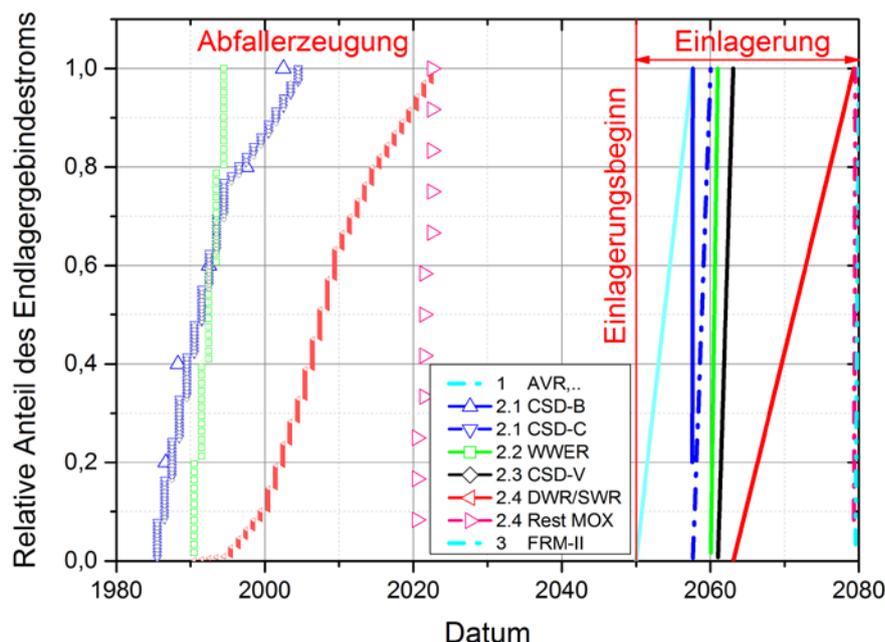


Abbildung 2.1: Zeitlicher Anfall und Einlagerung der Endlagergebündeströme, Salz 200

Die Differenz zwischen dem Zeitpunkt der Abfallerzeugung und der Einlagerung ergibt die Zwischenlagerzeit. Für die Gebindeströme mit stark wärmeentwickelnden Abfällen (das sind die Endlagergebindeströme 2.2, 2.3 und 2.4) ist die zeitliche Veränderung der Zwischenlagerzeit für die Endlagervariante Salz 200 in Abbildung 2.2 dargestellt. Die sägezahnartige Entwicklung in der Zwischenlagerzeit resultiert aus der Betrachtung von Einjahresscheiben bei der Abfallerzeugung und dem sehr viel kleinteiligeren Einlagerungstakt.

Die thermische Leistung eines beladenen Endlagergebindes hängt neben der Abfallart von der Zwischenlagerzeit ab, nach der das Gebinde eingelagert wird. Im Rahmen der vorliegenden Auslegung wird die Zwischenlagerzeit konservativ mit der für den jeweiligen Endlagergebindestrom geringsten Zwischenlagerzeit angenommen. Dadurch kann bei der Berechnung vereinfachend angenommen werden, dass alle Endlagergebinde pro Gebindestrom die gleiche thermische Leistung haben. Bei späteren detaillierten Endlagerplanungen würde sich durch die exakte Betrachtung der Leistung jedes Endlagergebindes Optimierungsmöglichkeiten hinsichtlich des Flächenbedarfs ergeben.

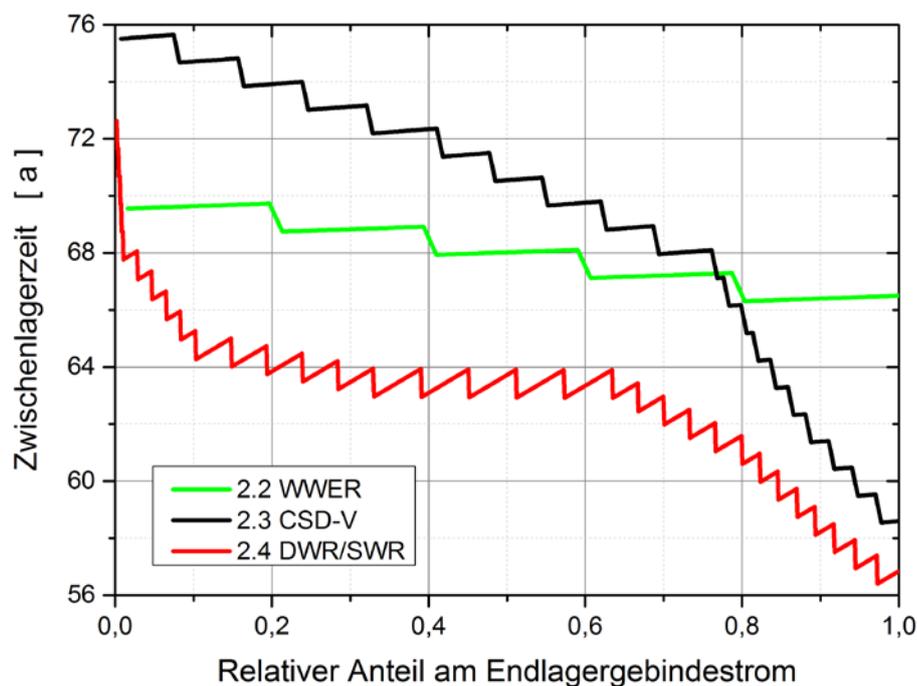


Abbildung 2.2: Zwischenlagerzeit der Endlagergebindeströme mit stark wärmeentwickelndem Abfall und ausgedienten Brennelementen, Salz 200

2.3 Thermische Auslegungsparameter

Die technische Planung eines Endlagers für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle und ausgediente Brennelemente erfordert die Berücksichtigung von thermischen Parametern. Das ist zum einen das natürliche Temperaturfeld in der Tiefe des Einlagerungsbereiches des Endlagerbergwerkes und zum anderen die Wärmeleistung der endzulagernden radioaktiven Abfälle und ausgedienten Brennelemente.

2.3.1 Geothermisches Temperaturfeld

Übergreifend über alle Endlagervarianten wird für die Einlagerungssohle eine Teufe von 600 m angenommen und ein entsprechender geothermischer Temperaturgradient von 3 K/100m. Die mittlere Oberflächentemperatur beträgt in Deutschland 8,2°C. In 600 m Teufe wird daher die Gebirgstemperatur mit 27°C angesetzt.

2.3.2 Kontaktbereich Endlagerbehälter mit Wirtsgestein

Die Behälteroberfläche ist die Kontaktfläche zwischen dem heißen, eingelagerten Behälter und dem thermisch auslegungsbestimmenden umgebenden Wirtsgestein bzw. verfüllten Material. Bei der Endlagervariante Salz 200 ist vorgesehen, dass der Behälter vollständig von Salzgrus umgeben ist. Bei der Variante Salz 100 liegt der Behälter in einer ausgefrästen Mulde auf der Streckensohle, so dass sich ein Teil der Behälteroberfläche im Kontakt mit dem Wirtsgestein Salz befindet, der überwiegende Teil jedoch von Salzgrus, dem Verfüllmaterial der Strecke, umgeben ist. In der Endlagervariante Ton 100 liegen die Behälter auf einem verlorenen Schlitten oberhalb der Sohle und es erfolgt eine Resthohlraumverfüllung mit Bentonitpellets. Bei der Endlagervariante Granit 100 werden die Behälter in vertikalen Bohrlöchern von Bentonit umgeben.

2.3.3 Wärmeleistung der radioaktiven Abfälle und ausgedienten Brennelemente

Für die Abfallarten des in Tabelle 1-2 aufgeführten Abfallmengengerüsts wird die anfallende Nachzerfallswärme entsprechend den in /VSG AP3 2011/ beschriebenen Abbrandberechnungen bestimmt. Die Abbrandberechnungen wurden für jeweils eine charakteristische Nachzerfallswärme pro Abfallart durchgeführt. Unterschiede, die sich aus Abbrand oder aus der Anreicherung der Brennelemente ergeben, bleiben unberücksichtigt. Die in Tabelle 2-2 aufgeführten Werte wurden im Gutachten entsprechend berücksichtigt.

Tabelle 2-2: Spezifikation der berücksichtigten Brennelemente /VSG AP3 2011/

Brennstoffart	Reaktortyp	Anteil/Anreicherung		Abbrand
		Element/Nuklid	[%]	GWd/tSM
UO ₂	DWR	U-235	4,4	55
MOX ²	DWR	Pu-tot	8,6	55
		Natururan	91,4	
UO ₂	SWR	U-235	3,5	50
MOX ²	SWR	Pu-tot	6,3	50
		Natururan	93,6	
UO ₂	WWER (KGR)	U-235	3,6	30
UO ₂	WWER (KKR)	U-235	2,0	20

In Abbildung 2.3 ist jeweils die Wärmeleistung der einzelnen Referenzbrennelemente gemäß Tabelle 2-2 dargestellt. Bei den Brennelementen der WWER-Reaktoren wird wegen der deutlichen Unterschiede in Anreicherung und Abbrand nach Kraftwerken unterschieden (Kernkraftwerk Greifswald (KGR) und Kernkraftwerk Rheinsberg (KKR)). Zusätzlich ist die Wärmeleistung einer Kokille (CSD-V) mit verglasten Spaltprodukten aus der Wiederaufarbeitung dargestellt.

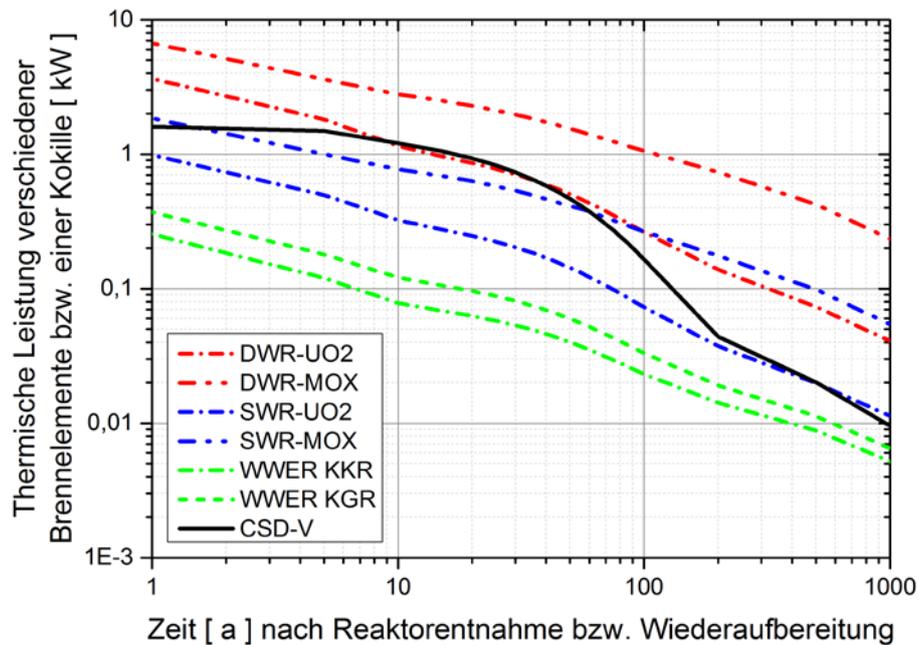


Abbildung 2.3: Wärmeleistung einzelner Brennelemente aus Leistungsreaktoren (DWR, SWR und WWER) sowie einer einzelnen Kokille mit verglastem Abfall (CSD-V) in Abhängigkeit von der Zeit

Zusätzlich zu den Wärmeleistungen der in Tabelle 2-2 genannten Brennelemente sind in /VSG AP3 2011/ auch die Wärmeleistungen für die Gebinde der weiteren in Tabelle 1-2 genannten Abfallströme bestimmt. Es sei darauf hingewiesen, dass in Abbildung 2.4 und in Abbildung 2.5 im Unterschied zur Darstellung in Abbildung 2.3 nicht die thermische Leistung eines einzelnen Brennelementes, sondern die eines beladenen Endlagerbehälters gezeigt ist.

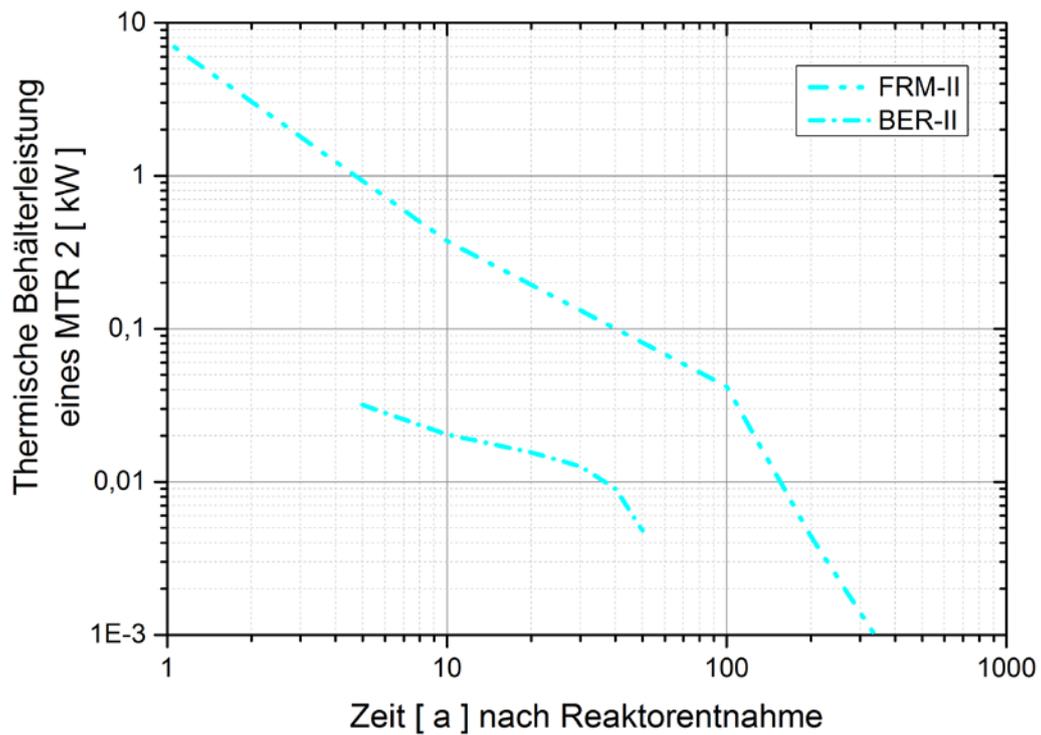


Abbildung 2.4: Wärmeleistung eines CASTOR MTR2 in Abhängigkeit von der Zeit, beladen mit Brennelementen des Forschungsreaktors FRM-II sowie BER-II

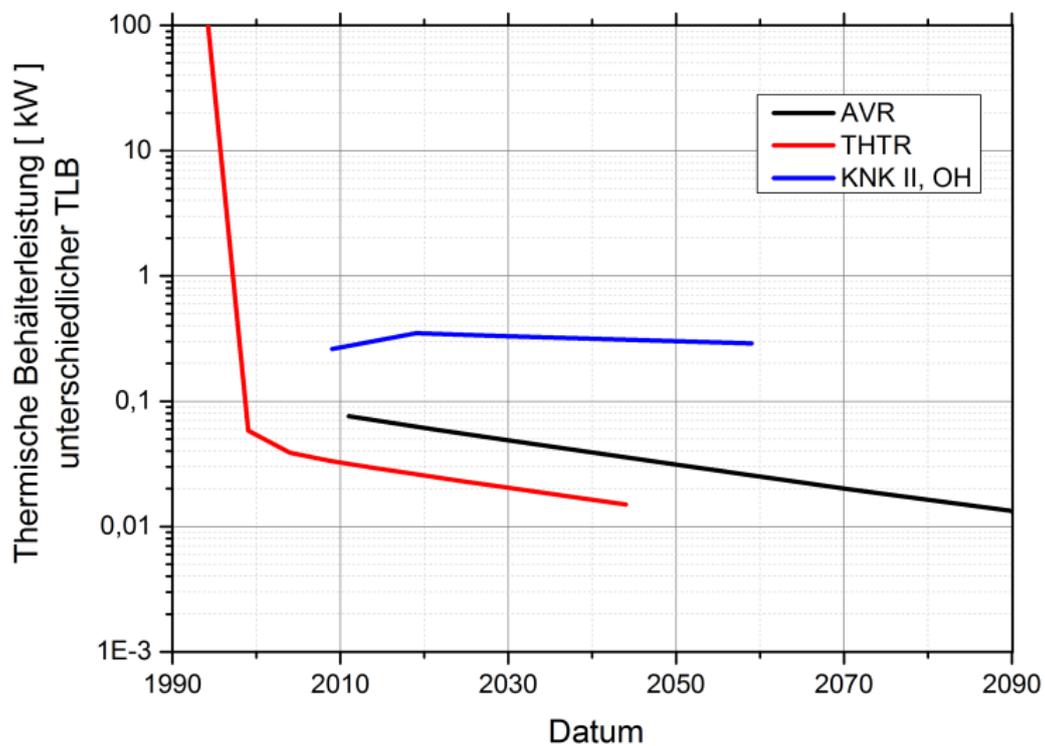


Abbildung 2.5: Wärmeleistung unterschiedlicher TLB beladen mit Brennelementen aus Forschungs- und Prototypreaktoren in Abhängigkeit von der Zeit

Thermische Leistung eines Modellbrennelementes

In Abbildung 2.3 ist die Wärmeleistung unterschiedlicher Brennelemente dargestellt. Diese Leistungsentwicklung entstammt OREST-Berechnungen /VSG AP3 2011/ für entsprechende Referenzbrennelemente. Der den OREST-Berechnungen zugrunde liegende Nuklidvektor ist für die in diesem Gutachten durchzuführenden thermischen Berechnungen jedoch zu lang und wird daher durch einen auf fünf Pseudonuklide verkürzten Vektor angenähert. Ein Brennelement mit derart approximiertem Verhalten wird zur Unterscheidung gegenüber dem Referenzbrennelement als Modellbrennelement bzw. im Folgenden nur noch als Brennelement (BE) bezeichnet. Im Unterschied zur OREST-Berechnung repräsentieren die Pseudonuklide keine realen Nuklide, sondern approximieren die thermische Leistung des Brennelementes. Stellvertretend für die unterschiedlichen Modellbrennelemente ist in Abbildung 2.6 die Approximation des DWR-UO₂-Modellbrennelementes gezeigt. Der relative Fehler bei dieser Abschätzung liegt in dem auslegungsrelevanten Zeitbereich, das ist der Zeitbereich bis 500 a nach Reaktorentnahme, bei unter 1 % und wächst erst zum Ende dieses Zeitbereich von 100.000 Jahren auf bis zu 4 % an.

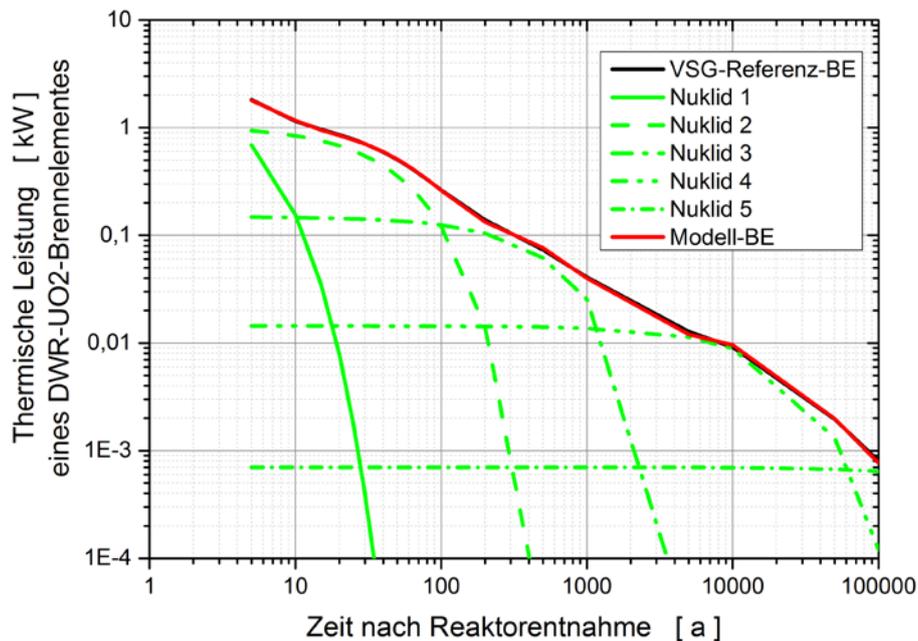


Abbildung 2.6: Approximation des DWR-UO₂-Referenzbrennelementes /VSG AP3 2011/ durch ein Pseudospektrum von fünf Nukliden

2.4 Sicherheitsabstände

Im Folgenden werden relevante Sicherheitsabstände zwischen dem Einlagerungsbereich im Endlager und thermisch empfindlichen geologischen Einheiten oder klüftigen und potenziell lösungsführenden Gesteinen und Nebengesteinen für einzelne Endlagervarianten aufgeführt. Diese Sicherheitsabstände werden bei der Gesamtendlagerflächenberechnung berücksichtigt.

Endlagervariante Salz 200 und Salz 100

Im Rahmen der vorläufigen Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben /VSG AP6 2012/ wurde zum Schutz von möglicherweise temperaturempfindlichen geologischen Einheiten oder klüftigen und potentiell lösungsführenden Gesteinen und Nebengesteinen vor zu hohen thermischen Einwirkungen ein Sicherheitsabstand von 50 m festgelegt und durch thermische Auslegungsrechnungen überprüft und bestätigt. Dieser Sicherheitsabstand wird – vereinfachend auch für die Endlagervariante Salz 100 – hier im Gutachten zugrunde gelegt.

Endlagervariante Ton 100

In dem Bericht /NAGRA 2002/ wird für das Opalinustonprojekt ein (nicht zwingend geradliniger) Transportpfad von 50 m durch die Wirtgesteinsbarriere angenommen, mindestens jedoch von 40 m, was auch der Dicke des Schachtverschlusses entspricht. Im Sinne der Vergleichbarkeit wurden die 40 m als erforderlicher Sicherheitsabstand in diesem Gutachten ebenfalls angenommen.

Endlagervariante Granit 100

In dem Bericht /SKB 2009/ wird von einem Sicherheitsabstand von 100 m zu Störungszonen ausgegangen. Dieser Wert wird hier ebenfalls angesetzt.

2.5 Mindestpfeilerbreiten

Zur Ermittlung der Mindestpfeilerbreiten zwischen Auffahrungen aus bergbaulicher Sicht, werden zur Abschätzung Faustformeln genutzt. Wird die Endlagerplanung umgesetzt, ist die mechanische Stabilität der Pfeiler unter Berücksichtigung aller Randbedingungen numerisch nachzuweisen.

Endlagervariante Salz 200 und Salz 100; Faustregel: doppelte Streckenbreite

Diese Faustregel stammt aus der Elastizitätstheorie und bezieht sich nicht auf die mechanische Festigkeit des Pfeilers. Sie beruht auf der Aussage, dass Störungen aus Gleichgewichtsgründen (z. B. Auflockerungen, Löser) sich nicht gegenseitig beeinflussen, wenn ihr Abstand dem doppelten Durchmesser entspricht /Mehlhorn 1996/. Dieser Ansatz wird im Gutachten gewählt.

Endlagervariante Ton 100; Faustregel: fünffache Streckenbreite

Diese Faustregel gilt für den Tonstein Callovo-Oxfordien in ca. 500 m Teufe. Ein nach dieser Faustregel bemessener Pfeiler kann die mechanischen Lasten zerstörungsfrei tragen. Eine Übertragbarkeit auf andere Tonformationen bzw. größere Teufen unter Berücksichtigung eines höheren Gebirgsdruckes ist zu überprüfen /GAIYA 2012/. Für dieses Gutachten wird die beschriebene Faustregel genommen.

Endlagervariante Granit 100; Faustregel: Verhältnis Pfeilerbreite zu Pfeilerhöhe $\geq 2,5$

Für Hartgestein gibt es eine Reihe empirischer Formeln zur Bemessung von Pfeilern. Es hat sich gezeigt, dass Pfeiler in den untersuchten Stichproben nur versagen, wenn ihr Verhältnis von Breite zu Höhe den Wert von 2,5 unterschreitet /Martin 2000/. Für die in einem Endlager zu erwartenden Dimensionen von Streckendurchmessern (max. 10 m) und Pfeilerlängen (mind. 100 m) ist die mechanische Pfeilerstärke dem auflastenden Druck bei Beachtung des oben genannten Kriteriums gewachsen. Deshalb wird dieser Ansatz dem Gutachten zugrunde gelegt.

2.6 Infrastrukturbereiche

Grundsätzlich beinhaltet der Infrastrukturbereich eines Endlagers diverse Funktionsräume, die im Falle eines Endlagers für radioaktive Abfälle aufgrund der notwendigen Trennung des Grubengebäudes in Kontroll- und Überwachungsbereich doppelt vorhanden sind. Der Einlagerungsbereich ist mit seinen erforderlichen technischen und bergbaulichen Einrichtungen dem Kontrollbereich zuzuordnen und der Auffahrungsbereich mit seinen technischen und bergbaulichen Einrichtungen im Überwachungsbereich angeordnet. Diese Funktionsräume dienen z. B. als

- Elektro- und Mechanik-Werkstatt, Magazine
- Aufenthaltsräume
- Abstellplätze für gleisgebundene und gleislose Fahrzeugen
- Kfz-Werkstatt
- E-Lok-Werkstatt
- Elektrischer Versorgungsraum
- Funktionsräume des Strahlenschutzes

Ausgehend von den Ergebnissen des Arbeitspaketes 5 "Endlagerkonzepte" der Vorläufigen Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben (VSG) /VSG AP5 2011/ beträgt die von den Schächten und den Infrastrukturbereichen eingenommene horizontale Fläche etwa 0,25 km². Dieser Wert wird für das Gutachten für die Endlagervarianten Salz 200 und Salz 100 übernommen. Für die Wirtsgesteine Ton und Granit werden diese Flächen separat ermittelt (s. Kapitel 3.3.5 und Kapitel 3.4.5).

2.7 Randbedingungen bei der Planung der Einlagerungsfelder

Die Planung der Einlagerungsfelder (eine oder mehrere Strecken oder Bohrlöcher mit Endlagergebinden) erfolgt in Reihenfolge der Endlagergebindeströme 1 bis 3. Die Auslegung der Felder für die Endlagergebindeströme 1 und 3 erfolgt aufgrund der geringen Wärmeentwicklung der Endlagergebinde für das Einlagerungskonzept Streckenlagerung auf der Basis einlagerungstechnischer und bergbaulicher Anforderungen. Die einlagerungstechnischen Anforderungen werden durch die Maschinengeometrien der Transport- und Einlagerungstechnik und die zugehörigen Sicherheitsabstände nach Unfallverhütungsvorschriften (UVV)

bestimmt. Als bergbauliche Anforderung ist hier die mindestens einzuhaltende Pfeilerbreite zwischen zwei Strecken auslegungsbestimmend.

Für die Endlagergebindeströme 2.1 bis 2.4 ist aufgrund der Wärmeleistung und der Einlagerungstechnik bei den einzelnen Endlagervarianten die Planung der Einlagerungsfelder detailliert durchzuführen.

Grundsätzlich ist bei der Streckenlagerung von Endlagergebänden zwischen den Behältern ein einlagerungstechnischer Mindestabstand von 1 m einzuhalten. Bei der horizontalen Bohrlochlagerung von Transport- und Lagerbehälter (TLB) ist ein einlagerungstechnischer Mindestabstand von 20 m zwischen den Bohrlöchern einzuhalten.

3 Berechnung der erforderlichen Endlagerflächen

Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse der Berechnung der Endlagerflächen dargestellt. In einem ersten Schritt wird für die mit wärmeentwickelnden Abfällen und ausgedienten Brennelementen beladenen Endlagerbehälter eine thermische Charakteristik ermittelt. Diese thermische Charakteristik ist erforderlich, um in einem zweiten Schritt die thermische Auslegung, d. h. die Berechnung der erforderlichen Behälter- und Streckenabstände, unter Berücksichtigung unterschiedlicher Behälterbeladungen vornehmen zu können. Auf Grundlage dieser Ergebnisse erfolgt in einem dritten Schritt die Berechnung der für diese Abfallarten erforderlichen Endlagerfläche. Zusätzlich wird der Flächenbedarf für Endlagergebäude mit gering wärmeentwickelnden Abfällen ermittelt. Basis dafür sind maschinentechnische und bergbauliche Anforderungen. Schließlich wird der Flächenbedarf für die Infrastrukturbereiche bestimmt sowie relevante, erforderliche Sicherheitsabstände zu Nebengesteinen angegeben und der hieraus resultierende Flächenbedarf errechnet. Die Summe der Teilflächen ergibt den Gesamtflächenbedarf für eine Endlagervariante.

3.1 Endlagervariante Salz: 200° C Auslegungstemperatur

Untersuchungen im Rahmen des von der Industrie geförderten Projektes DIREGT (Direkte Endlagerung von Transport- und Lagerbehälter (TLB) bis 160 t) /DIREGT 2016/ zeigten, dass bei der Streckenlagerung von TLB mit ausgedienten Brennelementen die Einhaltung der Auslegungstemperatur von 200°C aufgrund der hohen Wärmeleistung eines vollständig beladenen TLB nicht möglich ist. Es wurde aber rechnerisch nachgewiesen, dass eine Einlagerung der TLB einzeln in horizontalen Kurzbohrlöchern unter Einhaltung der 200°C Temperaturgrenze möglich ist, wenn der mit Salzgrus zu verfüllende Ringraum um die Behälter klein ist. Die erforderliche Endlagerfläche für das Wirtsgestein Salz bei einer Auslegungstemperatur von 200°C wird daher für diese, gegenüber der in den Eckpunkten vorgegebenen Streckenlagerung abweichende Einlagerungsvariante berechnet.

3.1.1 Sonstige Annahmen und Randbedingungen

Einlagerungsgeometrie

Die Einlagerungsgeometrie eines TLB in einem horizontalen Kurzbohrloch ist in Abbildung 3.1 schematisch dargestellt. Die TLB (CASTOR®-Behälter) werden mit einer Schubvorrichtung in vorher passend für den Behälter hergestellte kurze Bohrlöcher gedrückt. Wesentliches Merkmal dieses Konzeptes ist der nur wenige Zentimeter breite Ringraum, der zwischen dem Behälter und dem Wirtsgestein Salz besteht. Dieser Ringraum wird nach der Einlagerung des Behälters mit Salzgrus verfüllt, wodurch insgesamt eine gute Ableitung der Zerfallswärme erfolgt. Eine Modifikation hat sich im Rahmen der Weiterentwicklung dieses Einlagerungskonzeptes im Bereich Gleiteinrichtung ergeben /DIREGT 2016/. Hier ist für die Schubvorrichtung unterhalb der Gleitsteine ein vertiefter Ausschnitt erforderlich, der nach Einlagerung des Behälters im unteren Teil mit Salzformsteinen, im oberen Teil mit Salzgrus verfüllt wird. Wie im Zusammenhang mit der Einlagerung in Kapitel 3.1.5, Abbildung 3.9,

noch gezeigt werden wird, gelten für die Einlagerungsgeometrie eines TLB Symmetriebedingungen, d.h. ein Einlagerungsfeld enthält eine große Anzahl in dieser Form eingelagerte Endlagergebände. Entsprechend wiederholt sich die in Abbildung 3.1 dargestellte Struktur.

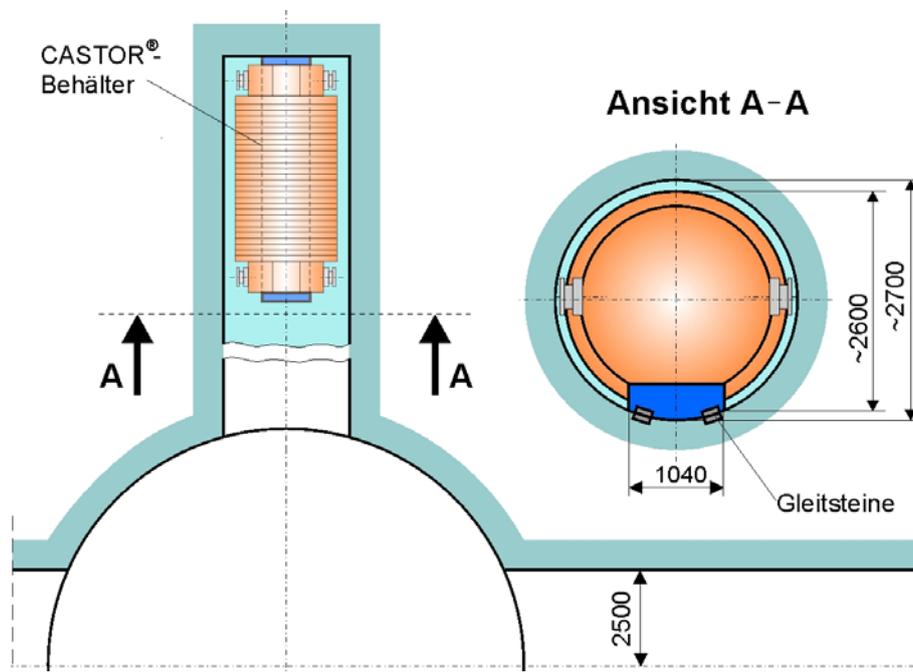


Abbildung 3.1: Einlagerungsschema von TLB in horizontalen Kurzbohrlöchern, Salz 200

Endlagergebindetypen

Bei der Endlagervariante Salz 200 werden die radioaktiven Abfälle aus der Wiederaufarbeitung und die ausgedienten Brennelemente aus den Leistungsreaktoren in TLB eingebracht und in horizontalen Kurzbohrlöchern eingelagert. Die ausgedienten Brennelemente aus den Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken werden in CASTOR®-Behältern, z. B. CASTOR® MTR2, in horizontalen Strecken eingelagert. Dabei ergeben sich auf Basis der nacheinander erfolgenden Einlagerung die in Tabelle 3-1 aufgeführten Endlagergebändeströme.

Behälterabmessungen und Behältermindestabstände

Die Abmessungen der Endlagerbehälter variieren aufgrund der Art und Menge der aufzunehmenden Brennelemente bzw. Kokillen und der jeweils erforderlichen Abschirmungen. In Tabelle 3-2 sind die in der Auslegungsberechnung verwendeten Behälterabmessungen zusammengestellt. Als Korb ist dabei der innere Behälterteil bezeichnet, in dem die Brennelemente bzw. Kokillen platziert werden. Der äußere Behälterteil dient vorrangig der mechanischen Stabilität und der Abschirmung. Bei dem Behälterdurchmesser ist zusätzlich zu dem in den Berechnungen verwendeten Behälterdurchmesser in Klammern der Außendurchmesser der Behälter einschließlich Kühlrippen angegeben. Der Einfluss der Kühlrippen wurde in den

Tabelle 3-1: Gebindetyp und Einlagerungsform der Endlagergebündelströme, Salz 200

Endlagergebündelstrom	Gebindetyp	Einlagerungsform
Endlagergebündelstrom 1	CASTOR® THTR/AVR, KNK und MTR2 (mit BER II-BE)	Strecken
Endlagergebündelstrom 2.1	TLB (mit CSD-B und CSD-C)	horizontale Kurzbohrlöcher
Endlagergebündelstrom 2.2	CASTOR® 440/84 (mit WWER-BE)	horizontale Kurzbohrlöcher
Endlagergebündelstrom 2.3	TLB (mit CSD-V)	horizontale Kurzbohrlöcher
Endlagergebündelstrom 2.4	CASTOR® V/19 (mit DWR-BE) und CASTOR® V/52 (mit SWR-BE)	horizontale Kurzbohrlöcher
Endlagergebündelstrom 3	CASTOR® MTR2 (mit FRM II-BE)	Strecken

Auslegungsberechnungen vernachlässigt, da bereits in /DIREGT I/ gezeigt wurde, dass sich bei der Einlagerung der TLB entsprechend der Endlagervariante Salz 200 kein maßgeblicher Einfluss der Kühlrippen mehr zeigt. Die Modellierung kann daher an dieser Stelle vereinfacht werden.

Tabelle 3-2: Behälterabmessungen, Salz 200

Salz 200	Behälter			Korb	
	Beladung	Länge [m]	Durchmesser [m] in Berech.	Länge [m]	Durchmesser [m]
WWER	84	4,08	2,54 (2,66)	3,12	1,79
CSD-V	28	5,80	2,23 (2,43)	5,10	1,35
DWR+SWR	19	5,87	2,316 (2,436)	4,97	1,48

In Kapitel 2 wurden für die einzelnen Wirtsgesteine Kriterien zur Bestimmung einer Mindestpfeilerbreite aufgeführt. Zusätzlich existieren Anforderungen aus dem Einsatz der Maschinenteknik. Werden diese Anforderungen auf die Endlagervariante Salz 200 angewendet, ergeben sich die in Tabelle 3-3 aufgeführten Abstände. Der Mindestabstand zwischen den Bohrlöchern resultiert aus der Maschinenteknik in Verbindung mit der minimalen Offenhaltungszeit eines unverfüllten Bohrlochs. Der Abstand zwischen Streckenmitte und dem Behälter ist das Ergebnis der Streckendimensionierung am Einlagerungsort und des Schüttwinkels des Versatzmaterials Salzgrus, der sich bei der Verfüllung des Ringraums um den Behälter ergibt. Der Mindestabstand hinter den Behältern, bei dem es sich um den Steinsalzpfeiler zwischen den Behältern handelt, die aus benachbarten Strecken eingelagert werden, resultiert aus dem großen Bohrlochdurchmesser.

Tabelle 3-3: Mindestabstände zwischen stark wärmeentwickelnden Behältern, Salz 200

Salz 200	Bohrung Durchmesser [m]	Mindestabstände [m]		
		zw. Bohrlöchern	Streckenmitte und Behälter	hinter Behälter
WWER	2,78	20,00	9,25	5,56
CSD-V	2,60	20,00	9,25	5,20
DWR+SWR	2,55	20,00	9,25	5,10

Behälterbeladung und Wärmeleistung der Endlagergebäude

Wegen ihrer hohen Wärmeleistung stellt der Umgang mit MOX-Brennelementen eine Herausforderung dar. Bei gleichem Reaktortyp weisen MOX-Brennelemente im thermisch auslegungsbestimmenden Zeitbereich zwischen 50 a und 500 a nach Reaktorentnahme eine thermische Leistung auf, die um den Faktor 3 bis 5 höher ist als die eines UO₂-Brennelementes, Abbildung 3.2.

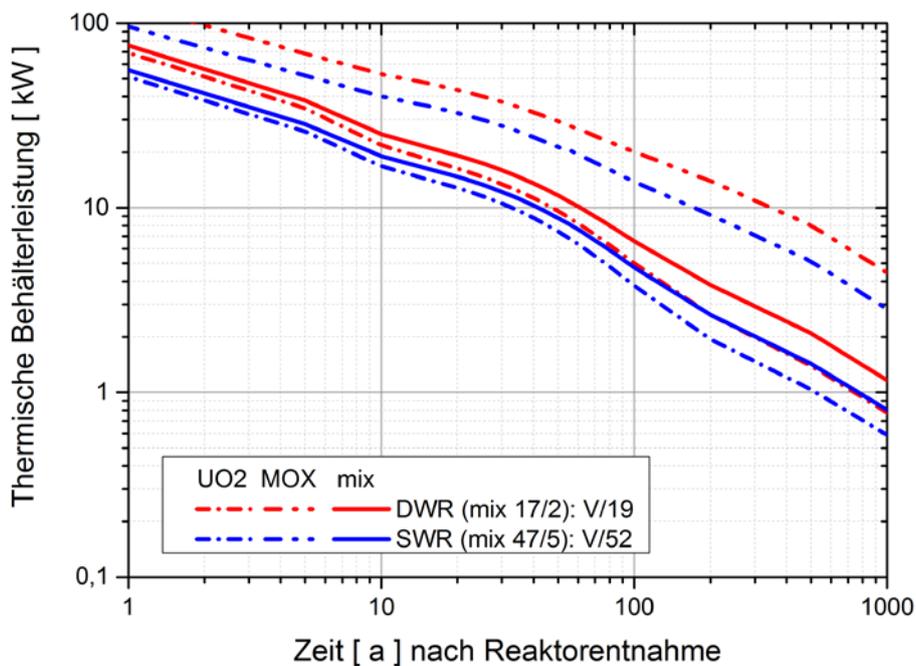


Abbildung 3.2: Wärmeleistung eines CASTOR[®] V/19 sowie eines CASTOR[®] V/52 bei Beladung mit UO₂- bzw. MOX-Brennelementen sowie bei Mischbeladung in Abhängigkeit von der Zeit, Salz 200

Der für DWR-Brennelemente vorgesehene TLB CASTOR[®] V/19 ermöglicht die Beladung mit bis zu 19 DWR-Brennelementen. Der für SWR-Brennelemente vorgesehene TLB ist der CASTOR[®] V/52 mit einer möglichen Beladung von 52 SWR-Brennelementen. Die Mischbeladung eines CASTOR[®] V/19 mit 17 DWR-UO₂-Brennelementen und mit 2 DWR-MOX-Brennelementen (DWR-mix 17/2) ermöglicht es, bei voller Behälterbeladung auch die MOX-Brennelemente mit einzulagern. Gegenüber einer ausschließlichen Beladung mit UO₂-Brennelementen erhöht sich bei der gemischten Beladung die thermische Behälterleistung im auslegungsbestimmenden Zeitbereich um ca. 20 % und ist zum Ende des auslegungsbe-

stimmenden Zeitbereichs um ca. 40 % höher, allerdings ist das Leistungsniveau bis dahin um gut eine halbe Größenordnung gefallen. Aufgrund der thermischen Behälterleistung erfordert der verbleibende Rest an DWR-Brennelementen 14 weitere nur teilbeladene Endlagerbehälter (s. Tabelle 3-4). Die Mischbeladung eines CASTOR® V/52 mit SWR-UO₂-Brennelementen und SWR-MOX-Brennelementen (SWR mix 47/5) führt dazu, dass konservativ die Einlagerung von mehr SWR-MOX-Brennelementen unterstellt wird als tatsächlich vorhanden sind. Die energetische Notwendigkeit teilbeladener Behälter besteht daher an dieser Stelle nicht. Die mit DWR-MOX-Brennelementen teilbeladenen zusätzlichen Behälter können bei einer späteren Optimierung der Behälterbeladung eingespart werden, diese ist jedoch nicht Gegenstand der vorgenommenen Auslegung.

Die thermische Auslegung der Endlagervariante Salz 200 erfolgt mit den in Tabelle 3-4 aufgeführten Endlagergebündetypen.

Tabelle 3-4: Endlagergebündetypen, ihre Beladung und die dadurch abgedeckten Varianten in den Auslegungsberechnungen der Endlagervariante Salz 200

Salz 200	Gebündetyp	Beladung	Bemerkung
WWER	CASTOR 440/84	WWER KGR	thermisch abdeckend auch für WWER KKR, s. Abbildung 2.3
CSD-V	CASTOR 28M	CSD-V	
DWR + SWR	CASTOR V/19	DWR-mix 17/2	thermisch abdeckend auch für die Endlagergebünde DWR-MOX 5 und SWR-mix 47/5

In Abbildung 3.3 ist die Wärmeleistung der thermisch relevanten Endlagergebünde im Vergleich untereinander dargestellt. Aus Abbildung 3.3 wird deutlich, dass die Größe und der zeitliche Verlauf der thermischen Leistung eines mit CSD-V-Kokillen beladenen Endlagerbehälters eine andere Charakteristik aufweist als die anderen Endlagergebündetypen. Deshalb ist für diesen Endlagergebündetyp eine eigenständige thermische Auslegung erforderlich.

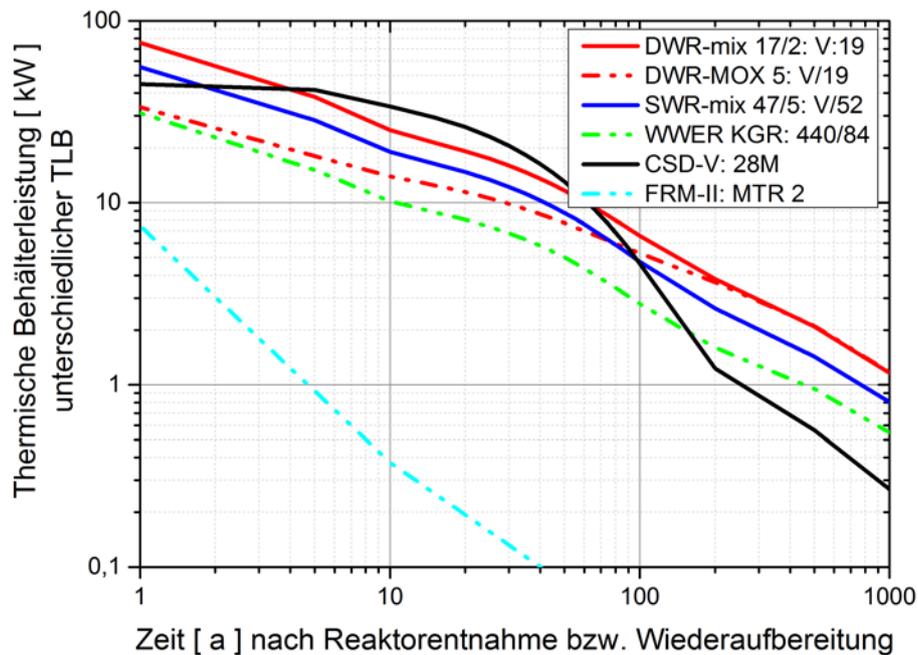


Abbildung 3.3: Wärmeleistung der wesentlichen auslegungsrelevanten Behälter mit stark wärmeentwickelndem Abfall in Abhängigkeit von der Zeit, Salz 200

Behälteranzahl und Zwischenlagerzeit

Auf Basis des Abfallmengengerüsts, der Festlegung der Endlagergebindedtypen, des Konzeptes zum Umgang mit MOX-Brennelementen und der konzeptionellen Planung des Einlagerungsbetriebes ist es möglich, die Zwischenlagerzeit für die einzelnen Abfallarten für die Endlagervariante Salz 200 zu bestimmen. In Tabelle 3-5 sind für die einzelnen Abfallarten die Behälteranzahl, der Anteil der jeweiligen Behälter an der Gesamtmenge einzulagernder Behälter, der für die Einlagerung der Behälter vorgesehene Zeitraum sowie die Zwischenlagerzeit der Gebinde bei der Einlagerung innerhalb des vorgesehenen Zeitraums aufgelistet. In dieser Endlagervariante sind 1.914 Gebinde bei einem Einlagerungstakt von 5,7 Tagen zu berücksichtigen.

Folgende Zwischenlagerzeiten werden in den thermischen Berechnungen der Endlagervariante Salz 200 berücksichtigt:

- WWER-Brennelemente: 66 Jahre
- CSD-V: 58 Jahre
- DWR-mix 17/2: 56 Jahre

Tabelle 3-5: Behälteranzahl, Anteil am gesamten Behälteraufkommen und Zwischenlagerzeiten, Salz 200

Salz 200	Behälter		Gesamtanteil	Einlagerung		Zwischenlagerzeit	
	Beladung	Anzahl		Beginn	Ende	Beginn	Ende
AVR,THTR, KNK,OH,BER		481	25,16%	01.01.2050	12.07.2057		
CSD-B	28	5	0,26%	18.07.2057	10.08.2057	72,5	52,6
CSD-C	27	152	7,95%	15.08.2057	28.12.2059	72,6	55,0
WWER	84	61	3,19%	03.01.2060	12.12.2060	70,0	65,9
CSD-V	28	134	7,01%	17.12.2060	18.01.2063	76,0	58,1
DWR+SWR	19	1.032	53,97%	24.01.2063	18.04.2079	73,1	56,3
Rest MOX	5	14	0,73%	24.04.2079	26.06.2079	89,3	56,5
FRM		33	1,73%	02.07.2079	01.01.2080		
Behälteranzahl	1.912						
Taktfrequenz	5,7						

Materialverhalten

Auch wenn das Ziel der hier durchgeführten Berechnungen die thermische Auslegung der Endlagervariante Salz 200 ist, ist es nicht ausreichend, die Berechnungen auf die thermische Prozessklasse zu beschränken. Der im Berechnungsmodell zu berücksichtigende Salzgrus wird unter dem Einfluss des Gebirgsdrucks mit zunehmender Zeit verdichtet und verändert durch diese Verdichtung seine thermischen Eigenschaften, insbesondere seine Wärmeleitfähigkeit. Das verwendete mechanische Stoffmodell des Salzgrus zur Erfassung dieses Kompaktionsverhaltens und seine Materialparameter sind in /VSG AP6 2012/ angegeben. Die Kompaktion des Salzgrus ist durch die Materialeigenschaften des Steinsalzes bedingt, das ein vom Spannungszustand und der Temperatur abhängiges viskoses Verformungsverhalten aufweist und deshalb zeitabhängig ist. Das verwendete Stoffmodell für Steinsalz ist ebenfalls in /VSG AP6 2012/ beschrieben.

Für die Berechnungen wird angenommen, dass der thermische Energietransport ausschließlich durch Wärmeleitung erfolgt, Wärmestrahlung und Konvektion werden vernachlässigt. Damit sind die relevanten Materialparameter festgelegt. Es sind die Dichte, die massenspezifische Wärmekapazität und die Wärmeleitfähigkeit. Als Materialien werden im Berechnungsmodell das Behältermaterial, der Salzgrus und das Steinsalz berücksichtigt, s. Tabelle 3-6.

Tabelle 3-6: Dichte und Parameter des thermischen Materialverhaltens, Salz 200

Salz 200	Referenz	Dichte [kg/m ³]	Wärmekapazität [J/kg/K]	Wärmeleitfähigkeit [W/kg/K]
Behälter	/VSG AP6 2012/	7000	515	15
Salzgrus	/VSG AP6 2012/	f(η): 1430...2200	f(η): 562...864	f(η ,T): 5,4...0,7
Steinsalz	/VSG AP6 2012/	2200	864	f(T): 5,4...3,2

Die Änderung der Wärmeleitfähigkeit des Salzgrus unter dem Einfluss der sich kompaktionsbedingt verändernden Porosität η und Temperatur T ist in Abbildung 3.4 dargestellt. Die Abbildung 3.4 verdeutlicht den weiten Bereich, in dem die Wärmeleitfähigkeit des Salzgrus sich von seiner Einbringung mit einer Anfangsporosität von $\eta = 35\%$ bis zum Zustand der vollständigen Kompaktion $\eta = 0\%$ in Abhängigkeit der Temperatur entwickelt. Im Zustand der vollständigen Kompaktion des Salzgrus entspricht sein Verhalten dem des Steinsalzes.

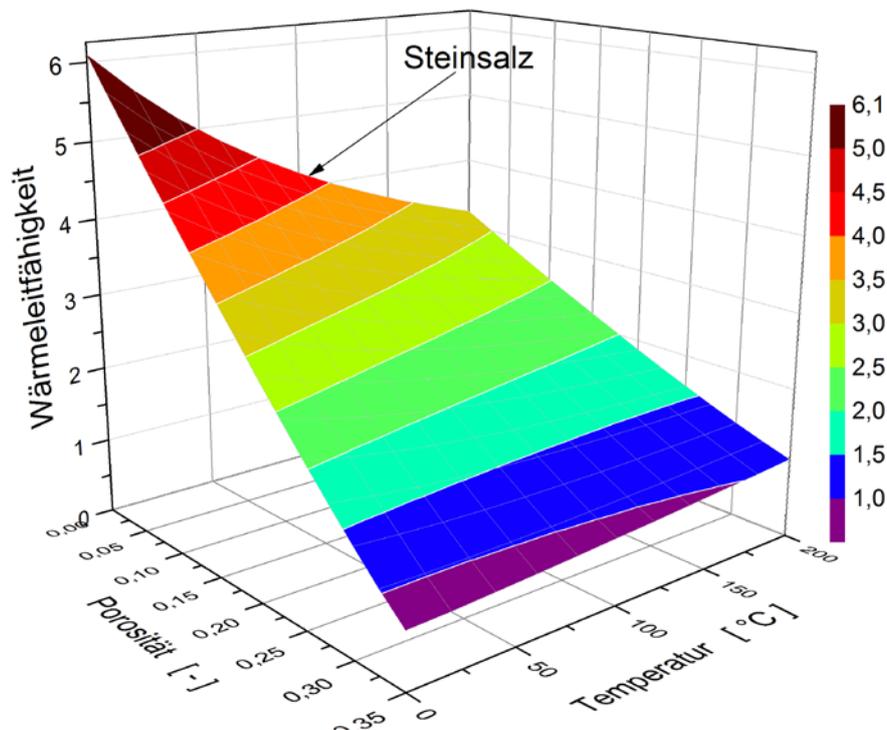


Abbildung 3.4: Wärmeleitfähigkeit von Salzgrus in Abhängigkeit von Porosität und Temperatur

3.1.2 Berechnungsprogramm

Die Berechnungen wurden mit Hilfe des Programms $\text{FLAC}^{3\text{D}}$ in der Version 5.1 /ITASCA 2013/ durchgeführt. $\text{Flac}^{3\text{D}}$ ist ein Programm zur Berechnung von dreidimensionalen Multiphysics-Modellen auf der Basis der Finite-Differenzen-Methode. Aktuell ist es in der Lage, thermisch (T), mechanisch (M) und hydraulisch (H) gekoppelte Systeme zu modellieren. Innerhalb der Elemente wird ein linearer Ansatz vergleichbar mit der Finite-Elemente-Methode verwendet. Die Lösung des Gleichungssystems erfolgt auf der Basis eines expliziten Zeitschrittverfahrens. Der Code wird weltweit von unterschiedlichsten Unternehmen für verschiedenste geomechanisch relevante Fragestellungen sowohl kommerziell als auch bei der Bearbeitung von FuE-Themen eingesetzt und gilt als hinreichend validiert.

3.1.3 Berechnungsmodell

Das Berechnungsmodell ist in Abbildung 3.5 dargestellt. Symmetriebedingungen wurden bei der Erstellung des Berechnungsmodells berücksichtigt. Die horizontalen Modellränder das

sind der obere und der untere Modellrand wurden in einer hinreichenden Entfernung zum Abfallgebände gewählt, so dass die Ränder die Temperatur im Modellgebiet innerhalb des Simulationszeitraums nicht beeinflussen. Die vertikalen Modellränder mit veränderlichem Abstand (das sind im Berechnungsmodell Salz 200 der rechte und der hintere Modellrand) wurden in unterschiedlicher Entfernung zum Abfallgebände angesetzt. Werden die vertikalen Modellränder in einer Entfernung vom Abfallgebände gewählt, dass sie innerhalb der Simulationsdauer keinen Einfluss auf die Temperatur im Modellgebiet haben, wird damit ein einzelnes Gebinde in einem Einlagerungsfeld simuliert (Einzelbehälter (EB)). Werden die vertikalen Ränder in geringerer Entfernung gewählt, entspricht dies thermischen Symmetrierandbedingungen. So wird der mittlere Bereich eines sehr großen Einlagerungsfeldes erfasst (Elementarzelle (EZ)). Der thermische Einfluss der begrenzten Ausdehnung der Einlagerungsfelder und die daraus resultieren Randeffekte werden dabei vernachlässigt. Die Berücksichtigung der Randeffekte würde es erlauben, an den Grenzen der Einlagerungsfelder im Rahmen einer Optimierung Gebinde mit höherer Wärmeleistung unter Einhaltung der Auslegungstemperatur einzulagern. Diese ist jedoch nicht Gegenstand der hier durchgeführten Auslegungsberechnungen.

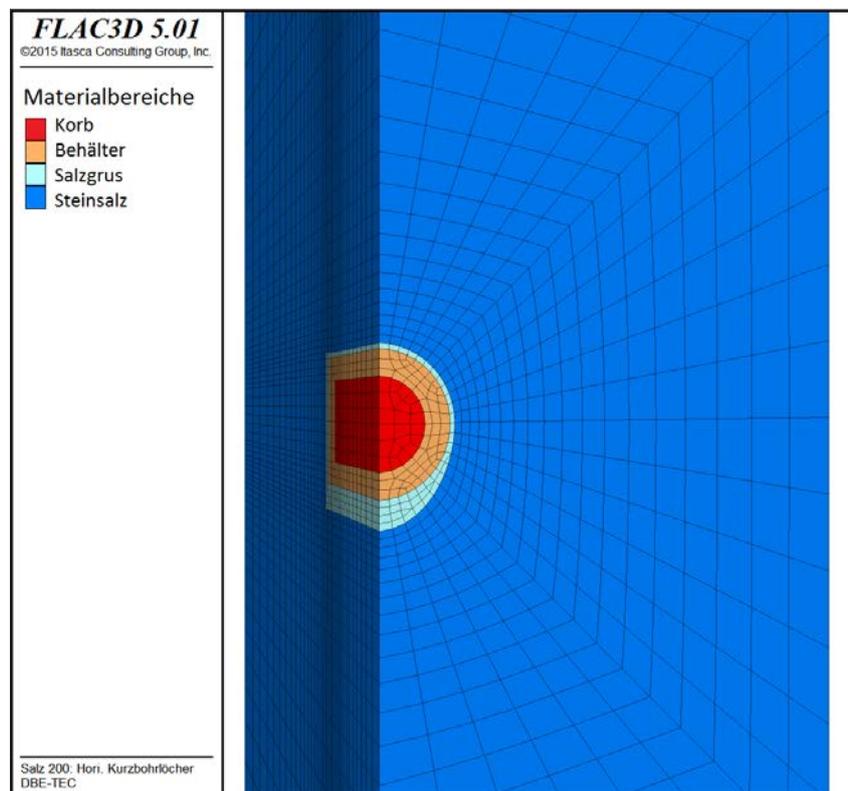


Abbildung 3.5: Berechnungsmodell Salz 200

3.1.4 Ergebnisse der thermischen Auslegung

Die Ergebnisse der Berechnungen zu den jeweiligen Einzelbehältern für die in Tabelle 3-4 aufgeführten Gebindetypern zeigen, dass ein Endlagerkonzept zur Einlagerung von TLB unter Berücksichtigung der sich aus dem Betriebszeitraum der Endlagers von 2050 bis 2080 ergebenden Zwischenlagerzeiten sinnvoll umsetzbar ist. So wurde für den CASTOR® HAW

28M eine Maximaltemperatur von 133°C bestimmt und für den CASTOR® V/19 mit der Beladung DWR-mix 17/2 eine Maximaltemperatur von 123°C, der in Bezug auf seine Beladung und die zu berücksichtigenden Zwischenlagerzeiten den CASTOR® 440/84 abdeckt. Die erreichten Maximaltemperaturen von 133°C und 123°C für die Einzelbehälter (EB) lassen bei einer Auslegungstemperatur von 200°C noch ausreichend Reserve zur Berücksichtigung thermischer Überlagerungseffekte einer großen Anzahl von Gebinden, wie sie sich in einem Einlagerungsfeld befinden.

Der Einfluss der thermischen Überlagerungseffekte in einem Einlagerungsfeld in Bezug auf die Maximaltemperatur an der Behälteroberfläche ist beispielhaft für den CASTOR® V/19 mit der Beladung DWR-mix 17/2 in Abbildung 3.6 dargestellt. Abbildung 3.6 zeigt den zeitlichen Verlauf der Maximaltemperatur an der Behälteroberfläche eines Einzelbehälters und den zeitlichen Verlauf der Maximaltemperatur an der Behälteroberfläche, wie er sich im mittleren Bereich eines Einlagerungsfeldes bei einem Bohrlochabstand von 20 m (maschinentechnisch bedingter Mindestabstand) und einem auf die Behälterachse bezogenen Behälterabstand von 21 m ergibt. Im Zeitverlauf wird das Temperaturmaximum an der Behälteroberfläche im Falle des Einzelbehälters innerhalb des ersten Jahres nach Einlagerung erreicht. In der gesamten Folgezeit fällt die Temperatur nur noch. Entsprechend beträgt der Simulationszeitraum dieser Variante lediglich 5 Jahre. Bei Berücksichtigung der Überlagerungseffekte innerhalb des Einlagerungsfeldes steigt die Temperatur in der Folgezeit weiter an und das Temperaturmaximum wird erst nach ca. 53 a erreicht.

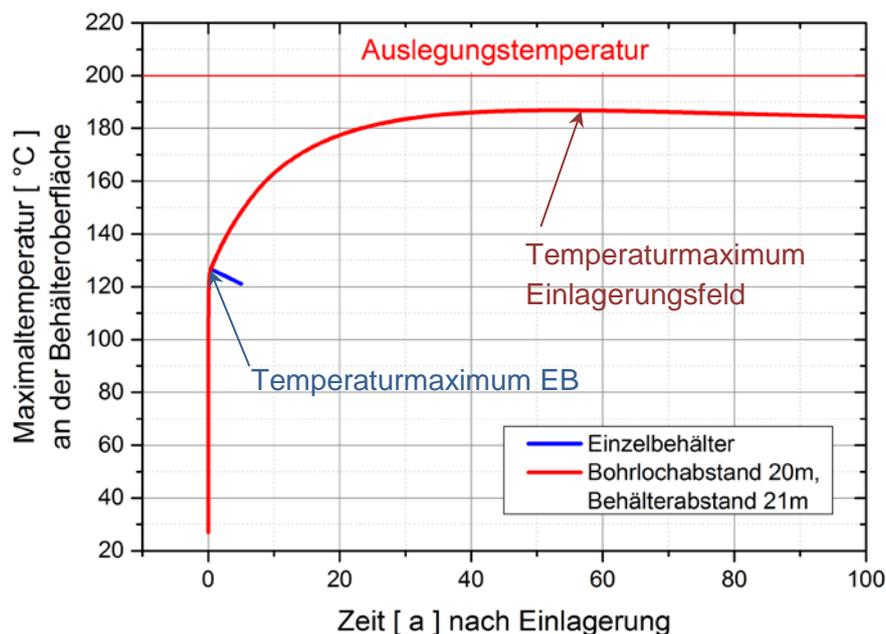


Abbildung 3.6: Entwicklung der Maximaltemperatur an der Behälteroberfläche bei Einlagerung eines Einzelbehälters und der eines Behälters in einem Einlagerungsfeld, DWR-mix 17/2, Salz 200

Aufgrund des maschinentechnisch bedingten Mindestabstandes für die Bohrlöcher im Endlagerkonzept Salz 200 wurden im Rahmen der thermischen Berechnungen zur Ermittlung des Flächenbedarfs nur Bohrlochabstände von 20 m und mehr untersucht, z.B. für den

CASTOR® V/19 mit DWR-mix 17/2 Beladung Bohrlochabstände von 20 m, 25 m und 30 m. Im Ergebnis der Berechnungen zeigte sich, dass für jeden Bohrlochabstand ein Behälterabstand ermittelt werden konnte, mit dem die Auslegungstemperatur von 200°C ausgenutzt wurde, s. Abbildung 3.7.

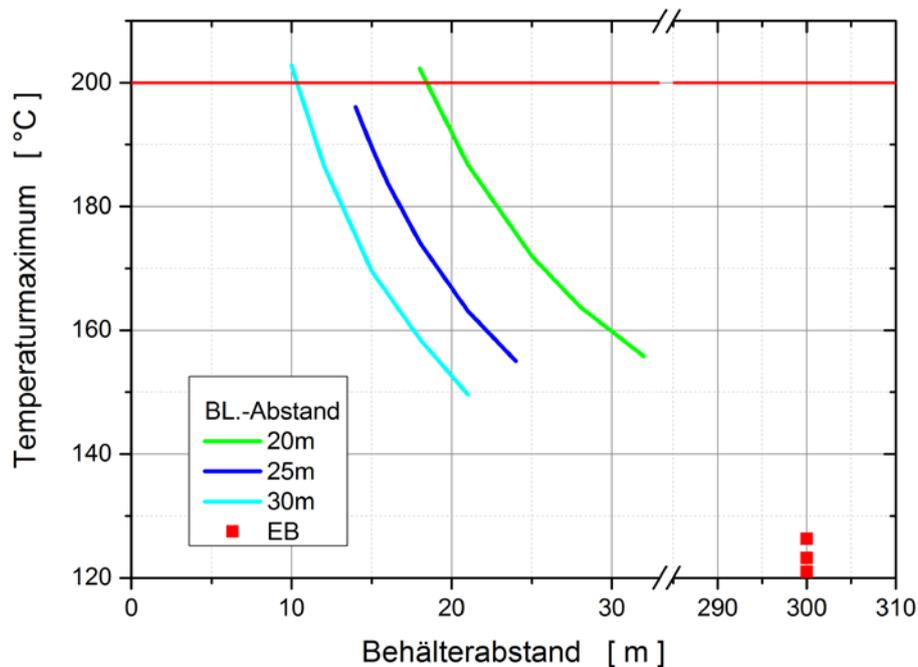


Abbildung 3.7. Maximaltemperatur bei unterschiedlichem Bohrloch- und Behälterabstand, DWR-mix 17/2, Salz 200

Der Flächenbedarf eines Behälters ergibt sich aus dem Bohrlochabstand, dem Behälterabstand und der Behälterlänge. Es ist offensichtlich, dass sich der Flächenbedarf bei gleichbleibendem Bohrlochabstand aber vergrößertem Behälterabstand erhöht. Mit Zunahme des Flächenbedarfs sinkt jedoch die Maximaltemperatur in dem entsprechenden Einlagerungsfeld. Es ist zu untersuchen, in welchem Umfang eine Vergrößerung des Bohrlochabstandes zu einer Reduktion des Behälterabstandes führt, wenn gleichzeitig die Auslegungstemperatur von 200°C ausgeschöpft wird. Die Kombinationen aus Bohrloch- und Behälterabstand zeigen, dass in diesem Bereich kein Unterschied in Bezug auf den Flächenbedarf besteht.

Da bei unterschiedlichen Wirtgesteinen und Auslegungstemperaturen die Behälterbeladung variiert, wird zum Zweck der Vergleichbarkeit als zusätzliche Kenngröße der "spezifische Flächenbedarf" eingeführt. Für ausgediente Brennelemente mit starker Wärmeentwicklung wird dazu der Flächenbedarf auf die Anzahl der Brennelemente im Behälter bezogen, bei mit Kokillen beladenen Behältern erfolgt der Bezug auf die im Behälter enthaltene Kokillenzahl. Der minimale spezifische Flächenbedarf für ein Brennelement mit dem Inventar vom Typ DWR-mix 17/2 und einer Zwischenlagerzeit von 56 Jahren beträgt 25,5 m²/BE, s. Abbildung 3.8.

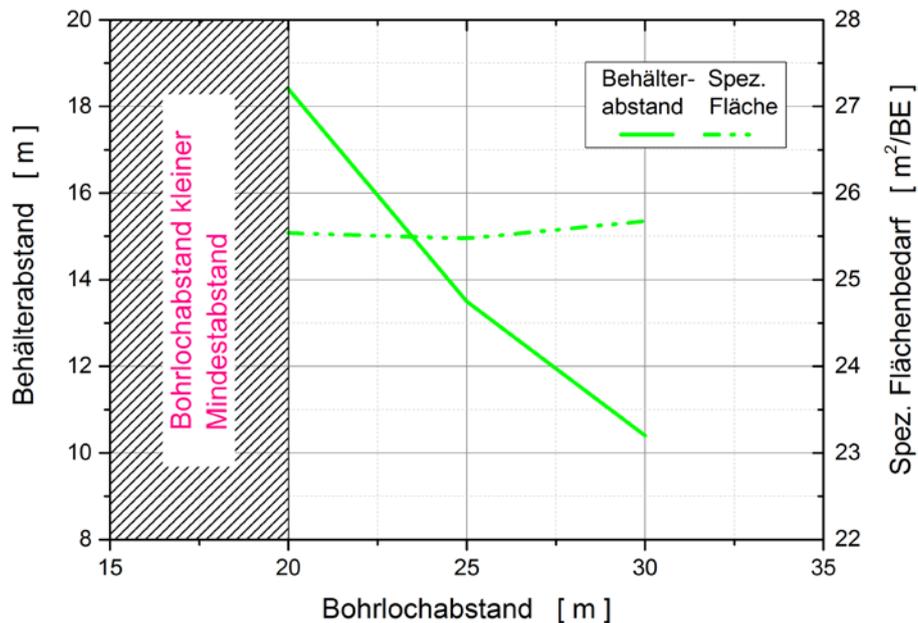


Abbildung 3.8: Behälterabstand und spezifischer Flächenbedarf in Abhängigkeit des Bohrlochabstandes bei Ausschöpfung der Auslegungstemperatur von 200°C auf der Behälteroberfläche, DWR-mix 17/2, Salz 200

Da im Endlagerkonzept Salz 200 ein maschinentechnisch bedingter Bohrlochmindestabstand von 20 m besteht, der nicht unterschritten werden darf, beschränken sich Berechnungen für die beiden Endlagergebündeströme 2.2 und 2.3 mit ebenfalls starker Wärmeentwicklung auf die Bestimmung des Behälterabstandes bei Ausnutzung der Auslegungstemperatur von 200°C. Im Fall des CASTOR® HAW 28M (CSD-V) beträgt der erforderliche Behälterabstand 12 m, im Fall des CASTOR® 440/84 (WWER) beträgt der erforderliche Behälterabstand 5 m.

Unter dem Aspekt einer effizienten Flächennutzung ergeben sich zusammenfassend für die einzelnen Endlagergebündetypen mit stark wärmeentwickelndem Abfall die in Tabelle 3-7 zusammengestellten Bohrloch- und Behälterabstände.

Tabelle 3-7: Rechnerische Abstände der Behälter mit stark wärmeentwickelndem Abfall, Salz 200

Salz 200	Bohrlochabstand [m]	Behälterabstand [m]
WWER	20	5
CSD-V	20	12
DWR + SWR	20	18,5

3.1.5 Planung der Einlagerungsfelder

Die Anzahl der Endlagergebinde und ihre Wärmeleistung bestimmen im Wesentlichen die Größe der Einlagerungsfelder. Die thermischen Berechnungen ergaben, dass die Endlagerung der TLB mit der geplanten Beladung möglich ist, ohne die Auslegungstemperatur von 200°C zu überschreiten. Allerdings bleibt bei der vorgesehenen Mischbeladung von 17:2 UO₂:MOX /DIREGT I/ ein Rest von 66 MOX-Brennelementen übrig. Die Anzahl der MOX-Brennelemente wird auf Basis der Wärmeleistung berechnet. Dabei wurde festgestellt, dass bei einer Beladung von 5 MOX-Brennelementen pro Behälter die Wärmeleistung eines CASTOR[®] V/19 mit der Beladung 17:2 nicht überschritten wird. Deshalb werden für die weitere Planung anstatt 736 CASTOR[®] V/19 746 Behälter berücksichtigt. In Tabelle 3-8 ist für die einzelnen Endlagergebindeströme die Anzahl an Behältern dargestellt.

Tabelle 3-8: Anzahl der Behälter pro Endlagergebindestrom, Salz 200

Endlagergebindestrom	1	2.1	2.2	2.3	2.4	3
Anzahl an TLB	481	157	61	134	1.046	33

Endlagergebindestrom 1

Für Abfälle des Gebindestroms 1 wird das Konzept der Streckenlagerung zugrunde gelegt. Die dafür gewählten Streckenbreiten sind in /VSG AP5 2011/ ermittelt worden. Die max. nutzbare Länge einer Einlagerungsstrecke beträgt 250 m, weil darüber hinaus keine angemessene Bewetterung sichergestellt werden kann.

Der Zugang zu den Einlagerungsstrecken des Endlagerbergwerkes Salz 200 erfolgt vom Gebindefrachtschacht über sogenannte Richtstrecken und Querschläge.

Die Länge des Feldes wurde deshalb unter Berücksichtigung des westlichen und östlichen Querschlaages (Umfahrungsstrecke des 1. Feldes) der Länge der Einlagerungsstrecken und des Sicherheitspfeilers mit 280 m ermittelt. Die Breite des Feldes wurde unter Berücksichtigung der nördlichen und südlichen Richtstrecke, von 8 Einlagerungsstrecken und der entsprechenden Sicherheitspfeiler mit 150 m ermittelt. Maschinentechnische Grundlage für die Einlagerungsstreckenbreite ist eine um 500 mm schmalere Einlagerungsvorrichtung, da bei Salz 200 nur "kleine" TLB eingelagert werden. Somit ergibt sich für den Gebindestrom 1 eine erforderliche Feldgröße von 42.000 m².

Endlagergebindestrom 2.1 bis 2.4

Alle Endlagergebinde der Gebindestrome 2.1 bis 2.4 werden von zentralen Beschickungsstrecken in horizontalen Kurzbohrlöchern mit derselben Einlagerungstechnik /DIREGT 2016/ eingelagert (s. Abbildung 3.9).

Die Mindestabstände der Einlagerungsbohrlöcher für die Gebindestrome 2.1 und 2.2 werden aufgrund ihrer geringen Wärmeentwicklung von bergbaulichen und technischen Anforderun-

gen bestimmt. Für die Gebindeströme 2.3 und 2.4 ist eine thermische Auslegung der Behälter- und Streckenabstände erforderlich. Den Planungen wird zugrunde gelegt, dass die Gebindeströme 2.1 bis 2.4 fortlaufend in einem Feld eingelagert werden, ohne dass eine thermische Optimierung vorgenommen wird.

Die Ermittlung der Feldbreite erfolgte unter Berücksichtigung der nördlichen und südlichen Richtstrecken, der technisch erforderlichen Mindestabstände für die Transport- und Einlagerungstechnik sowie der relevanten Sicherheitspfeiler. Die 1.398 TLB der Endlagergebündelströme 2.1 bis 2.4 lassen sich auf einer Feldlänge von ca. 1.400 m bei einer Feldbreite von ca. 540 m einlagern. Somit ergibt sich eine erforderliche Feldgröße von ca. 756.000 m².

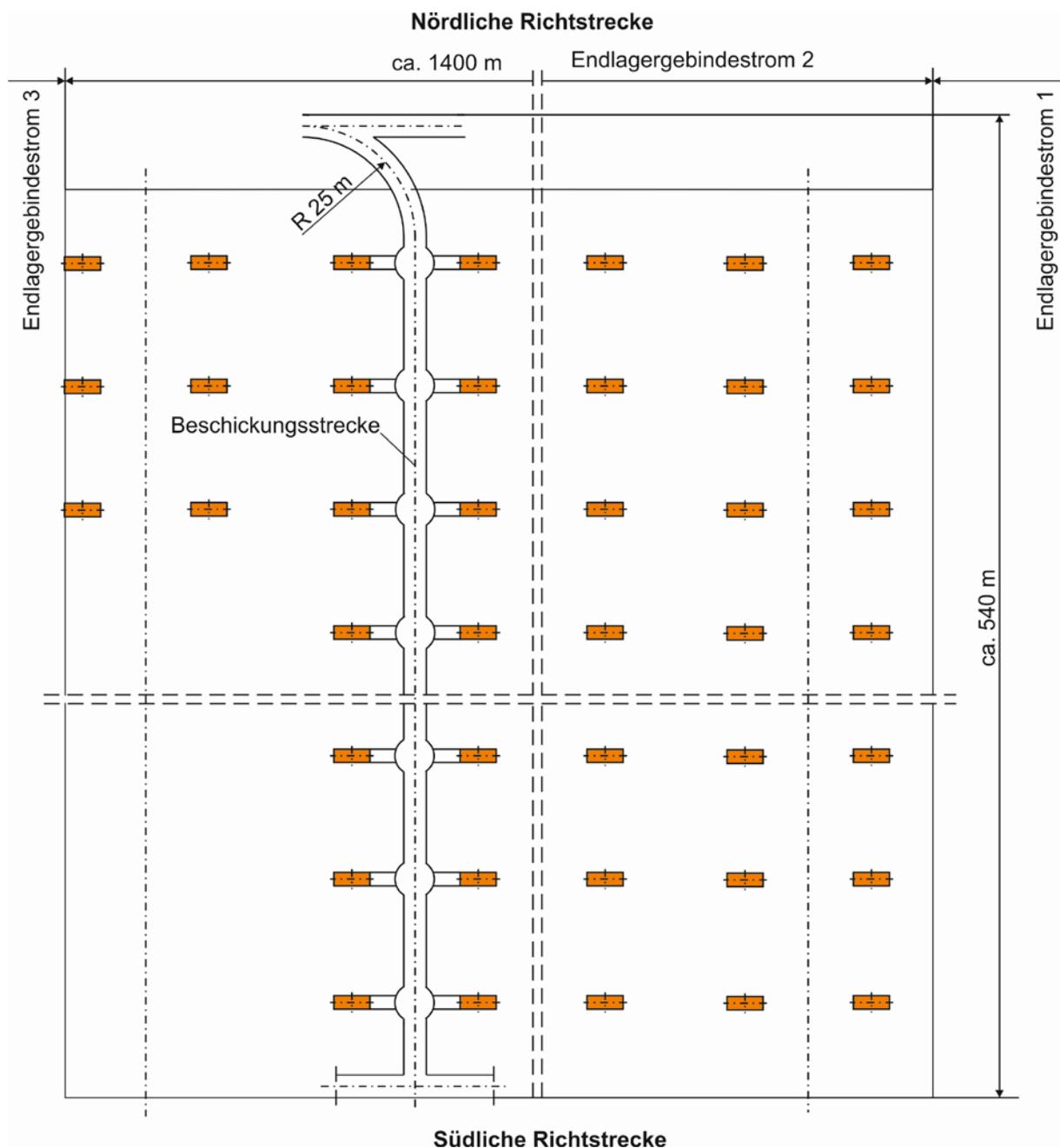


Abbildung 3.9: Endlagergebündelstrom 2: Anordnung der Endlagergebünde (TLB) in horizontalen Kurzbohrlöchern; Draufsicht auf das Einlagerungsfeld

Endlagergebindestrom 3

Für die Abfälle des Endlagergebindestroms 3 wird wie für den Gebindestrom 1 das Konzept der Streckenlagerung zugrunde gelegt. Die 33 Gebinde dieses Stromes werden unter Berücksichtigung der Richtstrecke und des Gleisradius für die Einlagerungstechnik in eine Einzelstrecke mit einer Gesamtlänge von 120 m eingelagert. Die Breite beträgt mit dem Sicherheitspfeiler ca. 23 m, somit ergibt sich eine Feldgröße von ca. 2.800 m².

Zusätzliche Fläche für Sicherheitsabstände

Wie bereits in Kapitel 2.4 beschrieben sind rings um die Endlagerfläche Sicherheitsabstände zu thermisch empfindlichen geologischen Einheiten oder klüftigen und potentiell lösungsführenden Gesteinen und Nebengesteinen einzuhalten. Insgesamt ergibt sich ein zusätzlich zu berücksichtigender Flächenbedarf von 228.000 m²

Gesamtfläche für die Endlagervariante: Salz 200°C

In Tabelle 3-9 ist der Gesamtflächenbedarf für die Endlagervariante Salz 200 für die drei Endlagergebindestrome, die SicherheitsabstandSicherheitsabstandfläche und den Infrastrukturbereich dargestellt und zusammengefasst.

Tabelle 3-9: Flächenbedarf für Endlagervariante Salz 200

	Flächenbedarf [m ²]
Endlagergebindestrom 1	42.000
Endlagergebindestrom 2	756.000
Endlagergebindestrom 3	2.800
Summe erforderliche Einlagerungsfläche	800.800
Sicherheitsabstandfläche (50 m)	228.000
Infrastrukturbereich	250.000
Gesamtfläche	1.278.800

Für die **Endlagervariante Salz 200** ergibt sich ein **Gesamtflächenbedarf** von ca. 1.278.000 m² entsprechend **ca. 1,28 km²**.

3.2 Endlagervariante Salz: 100° C Auslegungstemperatur

Die Berechnungsergebnisse zu den Einzelbehältern für den CASTOR[®] HAW 28 M und für den CASTOR[®] V/19 mit der Beladung DWR-mix 17/2 in der Endlagervariante Salz 200 (Kapitel 3.1.4) zeigen, dass bei einer Betriebsphase des Endlagers von 2050 bis 2080 vollständig mit ausgedienten Brennelementen bzw. CSD-V-Kokillen beladene TLB nicht im Salz eingelagert werden können, wenn die Auslegungstemperatur mit 100°C festgelegt ist. Als

Lösungsalternative wurde daher das POLLUX[®]-Behältersystem gewählt, weil zu diesem System bereits ein hoher Kenntnisstand verfügbar ist /VSG AP5 2011/. Dieses Behältersystem erfordert eine Konditionierung von gezogenen Brennstäben der Brennelemente, wobei im Korb des inneren Behälterteils die Brennstäbe von insgesamt 10 Brennelementen platziert werden können. Aus den Ergebnissen früherer Untersuchungen /DIREGT I/ lässt sich ableiten, dass bei vollständiger Behälterbeladung eines POLLUX[®]-Behälters unter Berücksichtigung der MOX-Brennstäbe und unter Zugrundelegung einer Streckenlagerung eine Auslegungstemperatur von 100°C ebenfalls nicht eingehalten werden kann. Um eine Auslegungstemperatur von 100°C einzuhalten, ist eine dementsprechend geringere Behälterbeladung erforderlich. Zwar ist bei einer Teilbeladung eines Behälters eine Auffüllung mit Dummies prinzipiell möglich, sinnvoller ist allerdings ein im Durchmesser angepasster Behälter.

3.2.1 Sonstige Annahmen und Randbedingungen

Einlagerungsgeometrie

Die Einlagerungsgeometrie von Endlagergebinden in Einlagerungsstrecken ist in Abbildung 3.10 dargestellt. Die Endlagergebinde werden mit Hilfe einer Einlagerungsvorrichtung in einer im Salz eingefrästen Mulde auf der Streckensohle abgelegt und der Resthohlraum um den Behälter mit Salzgrus versetzt. Die planmäßige Ablage des Behälters in einer Mulde resultiert aus einer Modifikation in /BAMBUS 2004/ und wurde auch in /VSG AP6 2012/ angenommen. Durch die Einfräsung wird die Kontaktfläche zum Salz deutlich erhöht und die Wärmeableitung beschleunigt. Der Vorgang des Einlagerns und Versetzens wird so oft wiederholt, bis eine Einlagerungsstrecke gefüllt ist. Einlagerungsfelder wiederum bestehen aus parallel angeordneten, mit Endlagergebinden befüllten und mit Salzgrus versetzten horizontalen Einlagerungsstrecken, s. Abbildung 3.19.

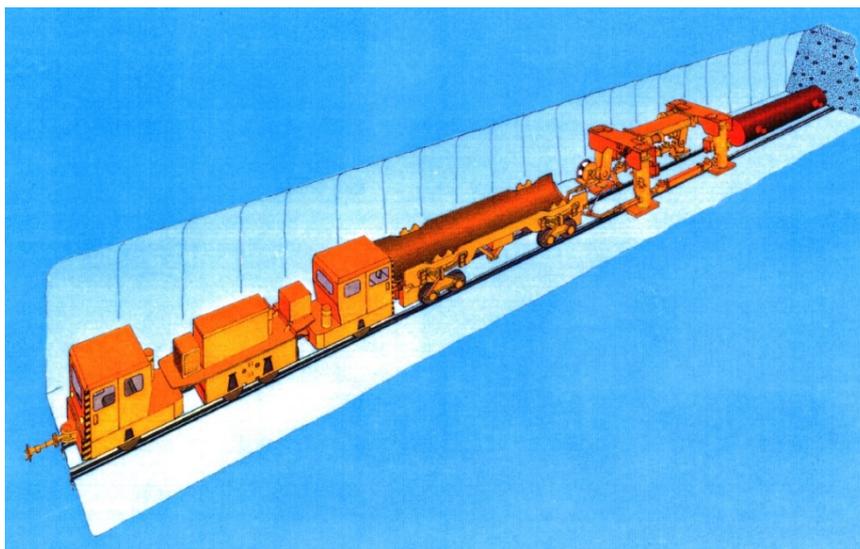


Abbildung 3.10: Einlagerungsschema von Endlagergebinden in Einlagerungsstrecken, Salz 100

Endlagergebindetypen

Bei der Endlagervariante Salz 100 werden die radioaktiven Abfälle aus der Wiederaufarbeitung und die ausgedienten Brennelemente aus den Leistungsreaktoren in Endlagerbehältern vom Typ POLLUX® in Strecken eingelagert. Die ausgedienten Brennelemente aus den Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken werden in CASTOR®-Behältern, z.B. CASTOR® MTR2, ebenfalls in horizontalen Strecken eingelagert. Dabei ergeben sich auf Basis der nacheinander erfolgenden Einlagerung die in Tabelle 3-10 aufgeführten Endlagergebindestrome.

Tabelle 3-10: Gebindetyp und Einlagerungsform der Endlagergebindestrome, Salz 100

Endlagergebindestrom	Gebindetyp	Einlagerungsform
Endlagergebindestrom 1	CASTOR® THTR/AVR, KNK und MTR2 (mit BER II-BE)	Strecken
Endlagergebindestrom 2.1	POLLUX® (mit CSD-B und CSD-C)	Strecken
Endlagergebindestrom 2.2	POLLUX® (mit WWER-BE)	Strecken
Endlagergebindestrom 2.3	POLLUX® (mit CSD-V)	Strecken
Endlagergebindestrom 2.4	POLLUX® (mit DWR- und SWR-BE)	Strecken
Endlagergebindestrom 3	CASTOR® MTR2 (mit FRM II-BE)	Strecken

Behälterabmessungen und Behältermindestabstände

Als Basis für die Ableitung des Behälterkonzeptes dient der POLLUX®-10, die Abmessungen variieren jedoch aufgrund der aufzunehmenden Brennelemente bzw. Kokillen und der erforderlichen Abschirmungen. In Tabelle 3-11 sind die der Auslegungsberechnung zugrunde gelegten Behälterabmessungen zusammengestellt. Als Korb ist dabei der innere Behälterteil bezeichnet, in dem die Brennelemente bzw. Kokillen platziert sind. Der äußere Behälterteil dient vorrangig der mechanischen Stabilität und der Abschirmung. Im Fall der Kokillen ergibt sich der Korbdurchmesser aus der Platzierung von drei Kokillen in Dreiecksanordnung nebeneinander, die Korblänge aus der Stapelung der Kokillen hintereinander. Bei Gebinden für diesen Abfalltyp ändert sich die Korblänge daher in Abhängigkeit davon, ob sich zwischen 4 und 6 Kokillen in einem Behälter befinden oder zwischen 7 und 9.

In Kapitel 2 wurden für die einzelnen Wirtsgesteine Kriterien zur Bestimmung einer Mindestpfeilerbreite aufgeführt. Zusätzlich existieren Anforderungen aus dem Einsatz der Maschinenteknik. Werden diese Anforderungen auf die Endlagervariante Salz 100 angewendet, ergeben sich die in Tabelle 3-12 aufgeführten Mindestabstände. Aufgrund des einheitlichen Einlagerungskonzeptes der Streckenlagerung sind diese für alle Endlagergebindetypen gleich.

Tabelle 3-11: Behälterabmessungen, Salz 100

Salz 100	Behälter			Korb	
	Beladung	Länge [m]	Durchmesser [m]	Länge [m]	Durchmesser [m]
WWER	9*2,5	4,28	1,56	3,22	0,69
CSD-V	4..6	3,67	1,56	2,61	0,93
CSD-V	7..9	4,94	1,56	2,61	0,93
DWR+SWR	5	5,52	1,56	4,40	0,69

Tabelle 3-12: Mindestabstände zwischen stark wärmeentwickelnden Behältern, Salz 100

Salz 100	Strecke	Mindestabstände [m]	
	Breite [m]	Strecke	Behälter
WWER	5,10	15,30	1,00
CSD-V	5,10	15,30	1,00
DWR+SWR	5,10	15,30	1,00

Behälterbeladung und Wärmeleistung der Endlagergebände

Wie bereits in Kapitel 3.1.1 angesprochen, stellt der Umgang mit MOX-Brennelementen wegen ihrer hohen Wärmeleistung eine Herausforderung dar. Die Verwendung des POLLUX®-Behälterkonzeptes ermöglicht es, die Mischung der Brennstäbe von UO₂-Brennelementen und MOX-Brennelementen entsprechend ihrem tatsächlichen Aufkommen vorzunehmen. Daher verbleibt kein Rest an MOX-Brennelementen anders als bei der Endlagervariante Salz 200. Dieses vollständige Mischungsverhältnis wird als DWR-mix 89/11 bzw. SWR mix 92/8 bezeichnet, da ein Behälter im Fall von DWR-Brennelementen 89 % UO₂-Anteil und 11 % MOX-Anteil enthält bzw. im Fall von SWR-Brennelementen 92 % UO₂-Anteil und 8 % MOX-Anteil. Die thermische Leistung der beiden in dieser Weise gemischten Brennelemente ist im Vergleich mit der thermischen Leistung der jeweils reinen Brennelemente in Abbildung 3.11 dargestellt.

Aufgrund der geometrischen Unterschiede zwischen den Brennelementen aus DWR-, SWR- und WWER-Reaktoren wird bei der Beladung der Behälter ein Umrechnungsfaktor - ein Äquivalenzfaktor - verwendet, mit dem die Anzahl der SWR- und WWER-Brennelemente bestimmt wird, die den gleichen Platzbedarf wie ein DWR-Brennelement haben. Der Äquivalenzfaktor beträgt für SWR-Brennelemente 3 und für WWER-Brennelemente 2,5. Das bedeutet aber auch, dass ein SWR-Äq-Brennelement tatsächlich die Wärmeleistung von drei SWR-Brennelementen besitzt, entsprechend ein WWER-Äq-Brennelement die Wärmeleistung von 2,5 WWER-Brennelementen. Mit diesen Äquivalenzfaktoren ergibt sich die Wärmeleistung der DWR-Äq Brennelemente entsprechend Abbildung 3.12. Die thermische Leistung eines SWR-Äq-Brennelementes ist im thermisch auslegungsbestimmenden Zeitbereich um ca. 20 % bis 25 % geringer als die eines DWR-mix 89/11 Brennelementes. Daher wird dieser SWR-Endlagergebündelstrom abdeckend durch den DWR-Endlagergebündelstrom berücksichtigt. Im gleichen thermisch auslegungsbestimmenden Zeitraum beträgt die Wärmeleistung

eines WWERäq-Brennelementes nur ca. ein Viertel der Wärmeleistung eines DWR-mix 89/11 Brennelementes. Die WWER-Brennelemente werden deshalb gesondert behandelt.

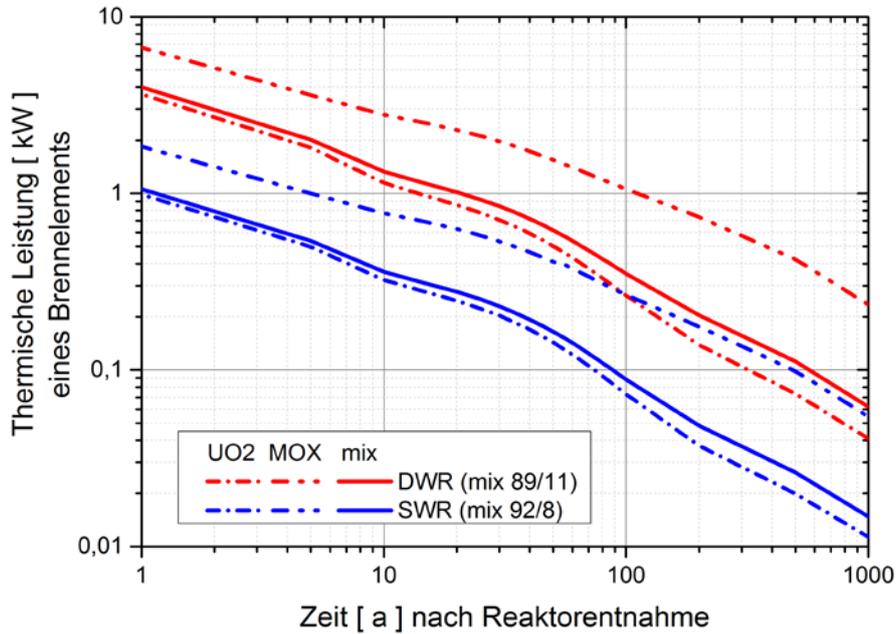


Abbildung 3.11: Wärmeleistung der UO₂- bzw. MOX-Brennelemente sowie eines mix-Brennelemente aus Reaktoren westlicher Bauart in Abhängigkeit von der Zeit

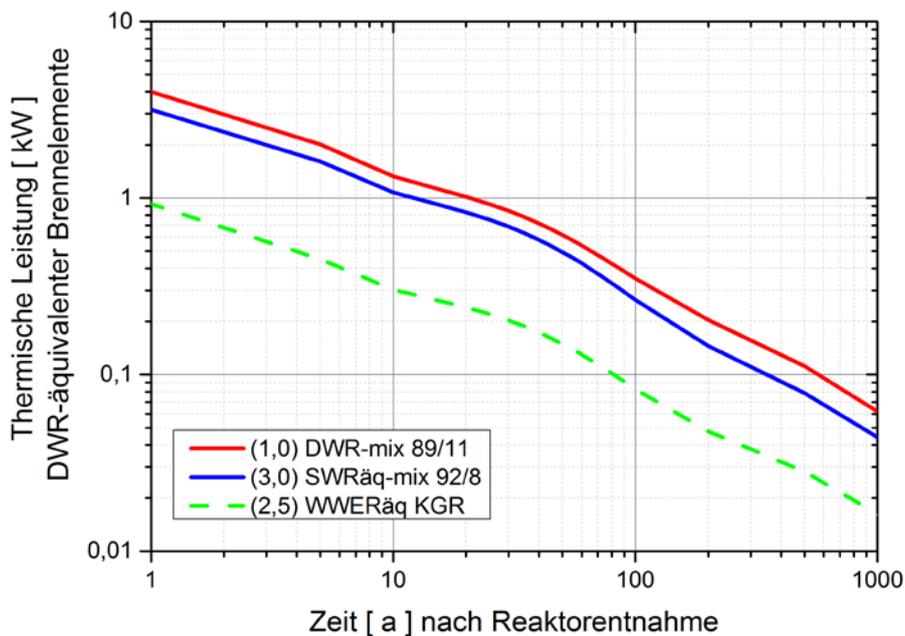


Abbildung 3.12: Wärmeleistung eines DWR-mix 89/11-Brennelementes im Vergleich zu den äquivalenten Brennelementen SWRäq-mix 92/8 und WWERäq KGR

Mit der Verwendung des an das Abfallaufkommen angepassten Mischungsverhältnisses von UO₂-Brennelementen und MOX-Brennelementen entfällt bei der Endlagervariante Salz 100 die Notwendigkeit, zusätzliche Behälter für Rest-MOX berücksichtigen zu müssen. Die thermische Auslegung des Endlagers erfolgt für die folgenden Endlagergebindetypen, s. Tabelle 3-13.

Tabelle 3-13: Endlagergebindetypen, ihre Beladung und die dadurch abgedeckten Varianten in den Auslegungsberechnungen der Endlagervariante Salz 100

Salz 100	Gebindetyp	Beladung	Bemerkung
WWER	POLLUX®	WWER KGR	thermisch abdeckend auch für WWER KKR, s. Abbildung 2.3
CSD-V	POLLUX®	CSD-V	
DWR + SWR	POLLUX®	DWR-mix 89/11	thermisch abdeckend auch für die Endlagergebinde SWRäq-mix 92/8

In Abbildung 3.13 ist die Wärmeleistung der thermisch relevanten Endlagergebinde im Vergleich untereinander dargestellt. Aus Abbildung 3.13 wird deutlich, dass die Größe und der zeitliche Verlauf der thermischen Leistung eines mit CSD-V-Kokillen beladenen Endlagerbehälters eine andere Charakteristik aufweist als die anderen Endlagergebindetypen. Deshalb ist für diesen Endlagergebindetyp eine eigenständige thermische Auslegung erforderlich.

Im Unterschied zur Endlagervariante Salz 200 besitzt die Endlagervariante Salz 100 aufgrund der variablen Behälterbeladung einen zusätzlichen Freiheitsgrad für die thermische Auslegung. In Abbildung 3.13 ist der Freiheitsgrad daran erkennbar, dass für die einzeln zu betrachtenden Endlagergebindeströme die thermische Behälterleistung von zwei charakteristischen, für die Endlagervariante Salz 100 wesentlichen Behälterbeladungen dargestellt ist, z. B. für einen POLLUX®-Behälter mit den Brennstäben von 5 Brennelementen bzw. Kokillen (P5) bzw. mit denen von 7 (P7).

Behälteranzahl und Zwischenlagerzeit

Im Unterschied zu der Endlagervariante Salz 200 ist die thermische Auslegung bei variabler Behälterbeladung ein iterativer Prozess. Über die Behälterbeladung wird die Behälteranzahl beeinflusst und als Folge der veränderten Behälteranzahl auch die Zwischenlagerzeit, da sich nicht alle Endlagergebindeströme zeitlich proportional verschieben. Für die im Ergebnis des iterativen Prozesses gewählten Behälterbeladungen für die Endlagervariante Salz 100 sind auf Basis des Abfallmengengerüsts, der Festlegung der Endlagergebindetypen, des Konzepts zum Umgang mit MOX-Brennelementen und der konzeptionellen Planung des Einlagerungsbetriebes die Zwischenlagerzeiten für die einzelnen Abfallarten festgelegt. Für die Auslegungsvariante sind in Tabelle 3-14 für die einzelnen Abfallarten die Behälteranzahl, der Anteil der jeweiligen Behälter an der Gesamtmenge einzulagernder Behälter, der für die Einlagerung der Behälter vorgesehene Zeitraum sowie die Zwischenlagerzeit der Gebinde bei der Einlagerung innerhalb des vorgesehenen Zeitraums aufgelistet. In dieser Endlagervari-

ante sind 5.794 Gebinde bei einem Einlagerungstakt von 1,9 Tagen pro Gebinde zu berücksichtigen.

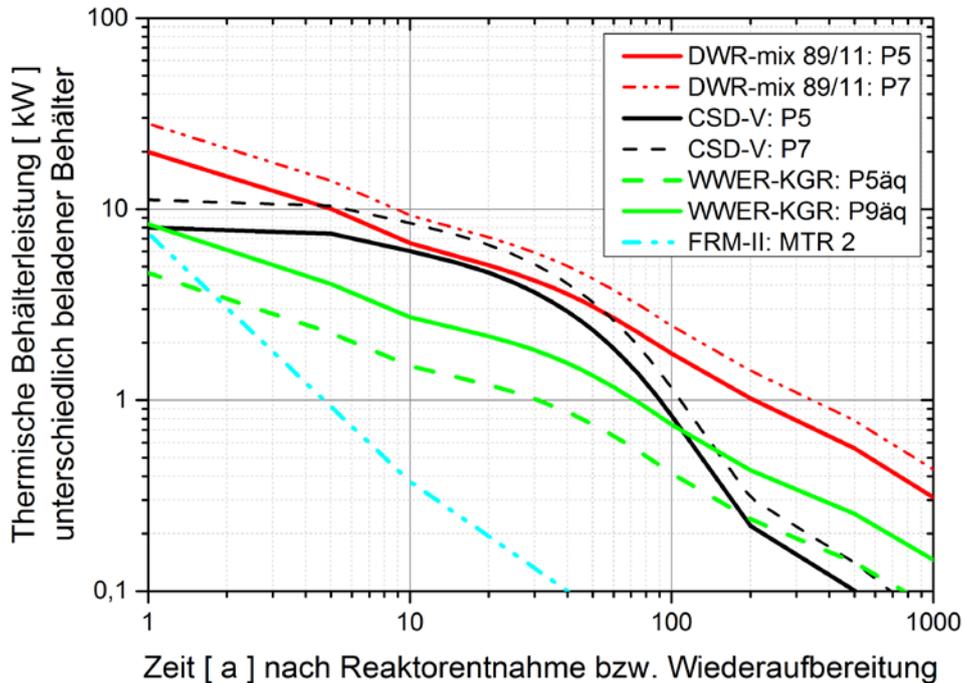


Abbildung 3.13: Wärmeleistung der wesentlichen auslegungsrelevanten Behälter mit stark wärmeentwickelndem Abfall in Abhängigkeit von der Zeit, Salz 100

Tabelle 3-14: Behälteranzahl, Anteil am gesamten Behälteraufkommen und Zwischenlagerzeiten, Salz 100

Salz 100	Behälter		Gesamtanteil	Einlagerung		Zwischenlagerzeit	
	Beladung	Anzahl		Beginn	Ende	Beginn	Ende
AVR, THTR, KNK, OH, BER		481	8,30%	01.01.2050	26.06.2052		
CSD-B	9	16	0,28%	28.06.2052	27.07.2052	67,5	47,6
CSD-C	9	456	7,87%	29.07.2052	06.12.2054	67,6	49,9
WWER	9*2,5	225	3,88%	08.12.2054	05.02.2056	64,9	61,1
CSD-V	5	747	12,89%	07.02.2056	19.12.2059	71,1	55,0
DWR+SWR	5	3.836	66,21%	21.12.2059	31.10.2079	70,0	56,8
FRM		33	0,57%	01.11.2079	01.01.2080		
Behälteranzahl	5.794						
Taktfrequenz	1,9						

Folgende Zwischenlagerzeiten werden in den thermischen Berechnungen der Endlagervariante Salz 100 berücksichtigt:

- WWER-Brennelemente: 60 Jahre
- CSD-V: 55 Jahre
- DWR-mix 89/11: 57 Jahre

Materialverhalten

Das mechanische und das thermische Verhalten von Salzgestein und Salzgrusversatz wurde bereits im Zusammenhang mit der Endlagervariante Salz 200 in Kapitel 3.1.1 beschrieben. Auch hier wird für die Berechnungen angenommen, dass der thermische Energietransport ausschließlich durch Wärmeleitung erfolgt, Wärmestrahlung und Konvektion werden vernachlässigt. Damit sind die relevanten Materialparameter festgelegt. Es sind die Dichte, die massenspezifische Wärmekapazität und die Wärmeleitfähigkeit. Als Materialien werden im Berechnungsmodell das Behältermaterial, der Salzgrus und das Steinsalz berücksichtigt, s. Tabelle 3-15. Im Zusammenhang mit der auf 100°C reduzierten Auslegungstemperatur ist das nichtlineare Verhalten der Wärmeleitfähigkeit des Salzes von Bedeutung, die sich bei geringerer Temperatur erhöht, s. dazu Tabelle 3-6 mit Tabelle 3-15.

Tabelle 3-15: Dichte und Parameter des thermischen Materialverhaltens, Salz 100

Salz 100	Referenz	Dichte [kg/m ³]	Wärmekapazität [J / kg / K]	Wärmeleitfähigkeit [W / kg / K]
Behälter	/VSG AP6 2012/	7000	515	15
Salzgrus	/VSG AP6 2012/	f(η): 1430...2200	f(η): 562...864	f(η, T): 5,4...0,7
Steinsalz	/VSG AP6 2012/	2200	864	f(T): 5,4...4,2

3.2.2 Berechnungsprogramm

Die Berechnungen wurden mit dem in Kapitel 3.1.2 beschriebenen Berechnungsprogramm durchgeführt.

3.2.3 Berechnungsmodell

Das Berechnungsmodell ist in Abbildung 3.14 dargestellt. Symmetriebedingungen wurden bei der Erstellung des Berechnungsmodells berücksichtigt. Die horizontalen Modellränder (das sind der obere und der untere Modellrand) wurden in einer hinreichenden Entfernung zum Abfallgebäude gewählt, so dass die Ränder die Temperatur im Modellgebiet innerhalb des Simulationszeitraums nicht beeinflussen. Die vertikalen Modellränder mit veränderlichem Abstand (das sind im Berechnungsmodell Salz 100 der rechte und der hintere Modellrand) wurden in unterschiedlicher Entfernung zum Abfallgebäude angesetzt. Werden die vertikalen Modellränder in einer geringeren Entfernung vom Abfallgebäude gewählt, dass sie innerhalb der Simulationsdauer keinen Einfluss auf die Temperatur im Modellgebiet haben, wird damit ein einzelnes Gebinde in einem Einlagerungsfeld simuliert (Einzelbehälter (EB)). Werden die vertikalen Ränder in geringerer Entfernung gewählt, entspricht dies thermischen Symmetriebedingungen. So wird der mittlere Bereich eines sehr großen Einlagerungsfeldes erfasst (Elementarzelle (EZ)). Der thermische Einfluss der begrenzten Ausdehnung der Einlage-

rungsfelder und die daraus resultieren Randeffekte werden dabei vernachlässigt. Auf das Optimierungspotenzial durch die Randlagen ist bereits in Kapitel 3.1.3 hingewiesen worden.

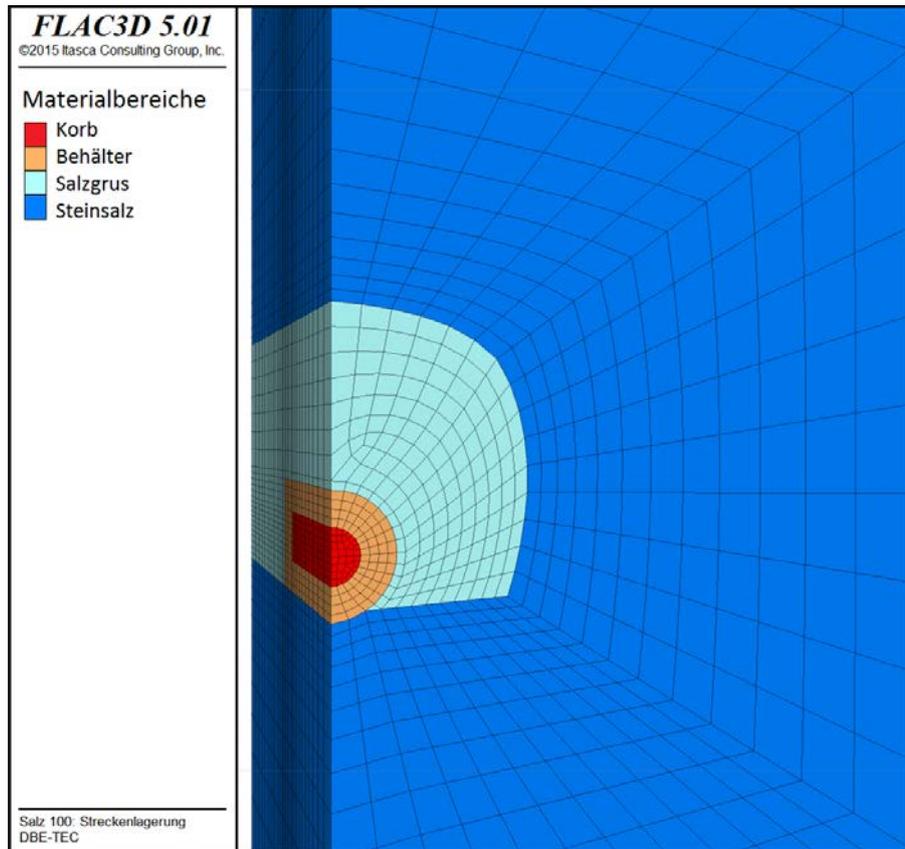


Abbildung 3.14: Berechnungsmodell Salz 100

3.2.4 Ergebnisse der thermischen Auslegung

Die Ergebnisse der Berechnungen zu den jeweiligen Einzelbehältern für die in Tabelle 3-13 aufgeführten Gebindetypen zeigen, dass das Endlagerkonzept zur Einlagerung von Endlagerbehältern unter Berücksichtigung der sich aus dem Betriebszeitraum der Endlagers von 2050 bis 2080 ergebenden Zwischenlagerzeiten auch unter Berücksichtigung einer Auslegungstemperatur von 100°C anwendbar ist. Gegenüber den Auslegungen in /AktGor 1998/ und /VSG AP6 2012/ ergeben sich aus dem angesetzten Betriebszeitraum längere Zwischenlagerzeiten. Zusätzlich ist jedoch eine deutliche Reduktion des Behälterinventars erforderlich, um die Auslegungstemperatur von 100°C einzuhalten.

Im Endlagergebindestrom 2.3, CSD-V, wird unter den gegebenen Bedingungen mit einem POLLUX® 6 CSD-V gerade die Auslegungstemperatur von 100°C erreicht. Eine ausreichende Reserve zur Berücksichtigung thermischer Überlagerungseffekte durch eine große Anzahl von Gebinden, wie sie sich in einem Einlagerungsfeld befinden, besteht dabei nicht. Hier ist die Reduktion auf fünf Kokillen im Endlagergebinde erforderlich. Angemerkt sei, dass diese Reduktion aus radiologischer Sicht automatisch die Platzierung einer Dummykokille in einem Endlagergebinde nach sich zieht.

Im Endlagergebindestrom 2.4, DWR-mix 89/11, wurde bei der Beladung eines POLLUX[®] 7 DWR mit einer Maximaltemperatur von 109°C die Auslegungstemperatur von 100°C überschritten, bei einem POLLUX[®] 6 DWR betrug die Maximaltemperatur 97°C. Eine noch größere Reserve zur Berücksichtigung thermischer Überlagerungseffekte gibt die Beladung eines POLLUX[®] 5 DWR.

Der Einfluss der thermischen Überlagerungseffekte in einem Einlagerungsfeld in Bezug auf die Maximaltemperatur an der Behälteroberfläche ist beispielhaft für den POLLUX[®] 5 mit der Beladung DWR-mix 89/11 in Abbildung 3.15 dargestellt. Abbildung 3.15 zeigt den zeitlichen Verlauf der Maximaltemperatur an der Behälteroberfläche eines Einzelbehälters und den zeitlichen Verlauf der Maximaltemperatur an der Behälteroberfläche, wie er sich im mittleren Bereich eines Einlagerungsfeldes bei einem Streckenabstand von 15,3 m (bergbaulicher Mindestabstand zwischen den Einlagerungsstrecken) und einem Behälterabstand von 20 m ergibt. Im Zeitverlauf wird das Temperaturmaximum an der Behälteroberfläche im Falle des Einzelbehälters etwa ein Jahre nach Einlagerung erreicht. In der gesamten Folgezeit fällt die Temperatur nur noch. Entsprechend beträgt der Simulationszeitraum dieser Berechnungsvariante lediglich 5 Jahre. Bei Berücksichtigung der Überlagerungseffekte innerhalb des Einlagerungsfeldes lassen sich zwei Effekte feststellen. Die Temperatur steigt in der Folgezeit zunächst noch weiter an, beginnt aber innerhalb des ersten Jahrzehnts nach Einlagerung auch wieder zu fallen. Dieses Temperaturmaximum wird im Folgenden als T1 bezeichnet. In der Folgezeit kann sich ein zweites Temperaturmaximum (T2) ausbilden. Es hängt vom Strecken- und Behälterabstand ab, in welcher Form sich dieses Temperaturmaximum ausbildet. Sind die Abstände sehr gering, wird das zweite Temperaturmaximum zum absoluten Maximum und damit auslegungsbestimmend. Steht wie im Fall der Abbildung 3.15 dargestellten Konfiguration mehr Raum für die Temperatursausbreitung zur Verfügung, bildet sich das zweite Temperaturmaximum nur als lokales Maximum aus und das erste Temperaturmaximum bleibt auslegungsrelevant. Die Auslegung darf sich daher nicht nur auf das erste Temperaturmaximum beschränken. Angemerkt sei, dass auch der Nuklidvektor einen Einfluss auf die Ausbildung der Temperaturmaxima hat. In Verbindung mit dem guten Wärmeleitvermögen des Steinsalzes führen die geringen Halbwertszeiten der Spaltprodukte bei den CSD-V-Kokillen dazu, dass sich kein zweites Maximum ausbildet.

Aufgrund des bergbaulichen Mindestabstandes zwischen den Einlagerungsstrecken im Endlagerkonzept Salz 100 wurden im Rahmen der thermischen Berechnungen zur Ermittlung des Flächenbedarfs nur Streckenabstände von 15,3 m und mehr untersucht, z.B. für den POLLUX[®]-Behälter mit DWR-mix 89/11 Beladung Streckenabstände von 15,3 m, 20 m, und 25 m. Die Anzahl der Brennelemente beträgt fünf bzw. sechs Brennelemente. Im untersuchten Wertebereich zeigt sich, dass die Auslegung beim POLLUX[®] 6 auf der Basis des Temperaturmaximums T1 erfolgen muss, während für einen POLLUX[®] 5 die Auslegung auf der Basis des Temperaturmaximums T2 erfolgt, s. Abbildung 3.16.

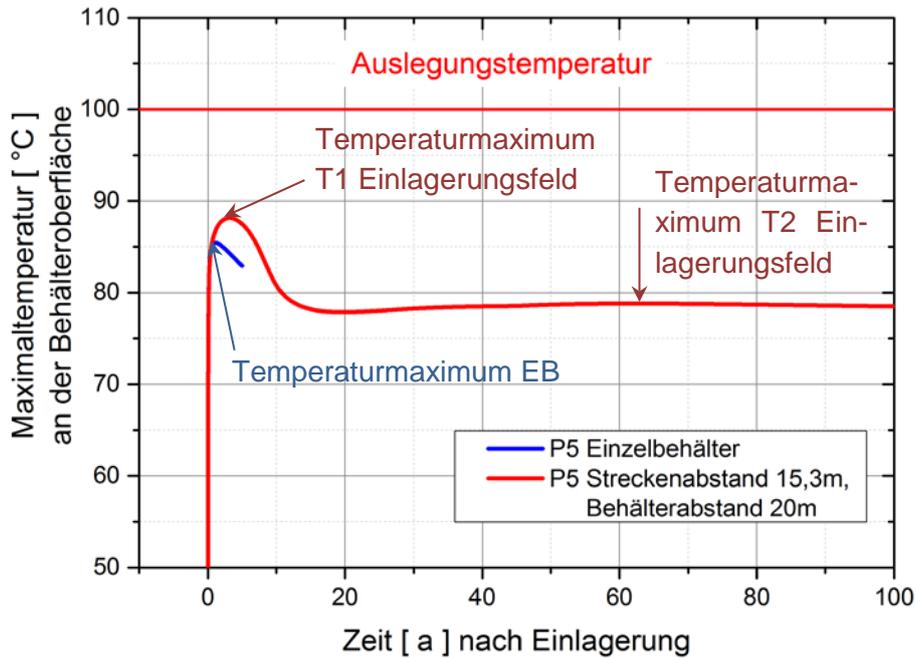


Abbildung 3.15: Entwicklung der Maximaltemperatur an der Behälteroberfläche bei Einlagerung eines Einzelbehälters und Behältern in einem Einlagerungsfeld, POLLUX® 5 DWR-mix 89/11, Salz 100

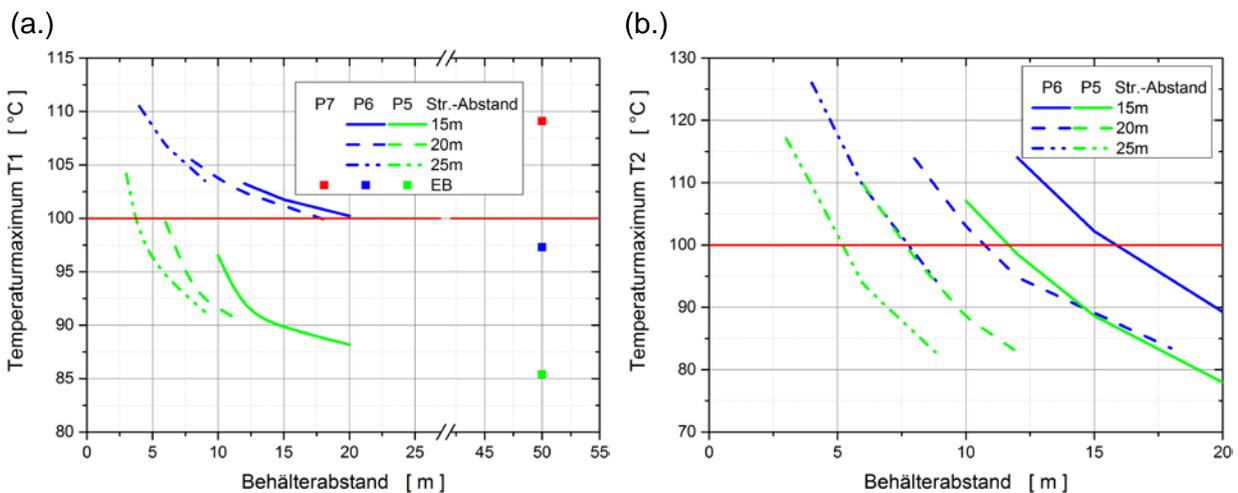


Abbildung 3.16. Maximaltemperatur bei unterschiedlicher Beladung und Streckenabständen von 15,3 m, 20 m und 25 m in Abhängigkeit des Behälterabstands (a.) Temperaturmaximum T1, (b.) Temperaturmaximum T2, POLLUX® 5, 6 und 7 DWR-mix 89/11, Salz 100

Der Flächenbedarf eines Behälters ergibt sich aus dem Streckenabstand, dem Behälterabstand und der Behälterlänge. Es ist offensichtlich, dass sich der Flächenbedarf eines Endlagergebindes bei unveränderter Beladung und bei gleichbleibendem Streckenabstand aber vergrößertem Behälterabstand erhöht. Mit Zunahme des Flächenbedarfs sinkt jedoch die Maximaltemperatur in dem entsprechenden Einlagerungsfeld. Zu untersuchen ist daher, in welchem Umfang eine Vergrößerung des Streckenabstandes zu einer Reduktion des Behälterabstandes führt, wenn gleichzeitig die Auslegungstemperatur von 100°C ausgeschöpft

wird. Die beim POLLUX[®] 6, DWR-mix 89/11, erforderliche Auslegung auf das erste Temperaturmaximum führt im Gegensatz zur Auslegung auf das zweite Temperaturmaximum beim POLLUX[®] 5, DWR-mix 89/11, zu einem größeren Flächenbedarf. Gleichzeitig weist die Auslegung beim POLLUX[®] 6, DWR-mix 89/11, eine starke Abhängigkeit vom Streckenabstand auf. Demgegenüber führt die Auslegung beim POLLUX[®] 5, DWR-mix 89/11, dazu, dass die Kombination aus Strecken- und Behälterabstand im untersuchten Wertebereich keinen Unterschied in Bezug auf den Flächenbedarf aufweist. Dieses ist ein Verhalten, wie es auch in der Endlagervariante Salz 200 anzutreffen ist, s. Abbildung 3.8.

Bereits in Kapitel 3.1.4 ist mit dem "spezifische Flächenbedarf" eine für alle hier betrachteten Endlagerkonzepte anwendbare Vergleichsgröße eingeführt worden. Der minimale spezifische Flächenbedarf für ein Brennelement mit einem Inventar vom Typ DWR-mix 89/11 in einem POLLUX[®] 5 und mit einer Zwischenlagerzeit von 57 Jahren beträgt 52 m²/BE, s. Abbildung 3.17

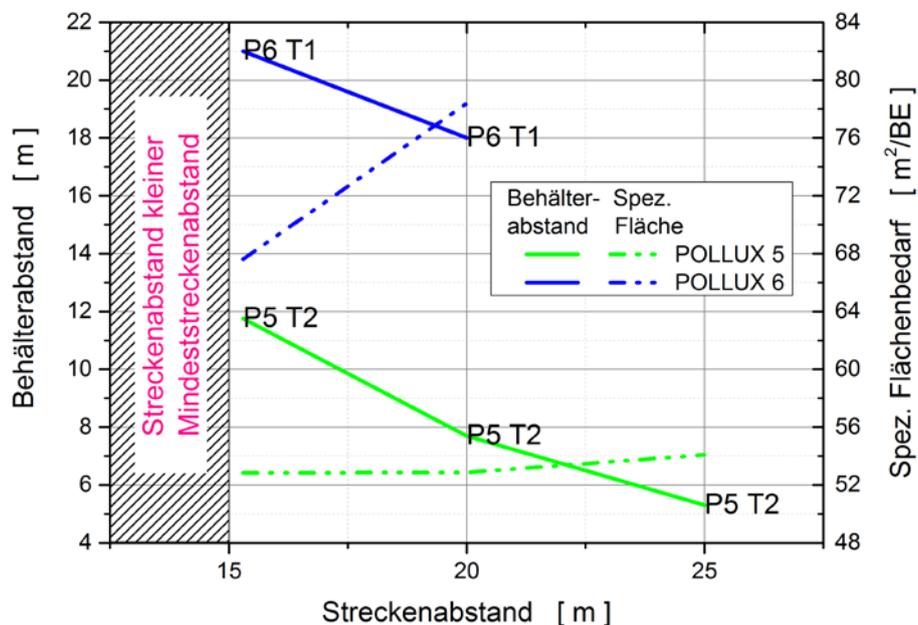


Abbildung 3.17: Behälterabstand und spezifischer Flächenbedarf in Abhängigkeit vom Streckenabstand bei Ausschöpfung der Auslegungstemperatur von 100°C auf der Behälteroberfläche, DWR-mix 89/11, Salz 100

Es war nicht das Ziel der Beauftragung, den gesamten Wertebereich von Strecken- und Behälterabstand in Verbindung mit der Behälterbeladung zu untersuchen. Exemplarisch wurde jedoch der Grenzfall betrachtet, der sich für einen Streckenabstand von 20 m und dem maschinentechnischen Mindestabstand von 1 m für den Behälterabstand ergibt. Im Ergebnis zeigte sich, dass die Auslegungstemperatur von 100°C bei der Beladung eines POLLUX[®]-Behälters mit bis zu 2,5 DWR-mix 89/11 Brennelementen eingehalten wird. Der spezifische Flächenbedarf bei diesen Parametern beträgt ebenfalls 52 m²/BE.

Die Berechnungen für die beiden Endlagergebündeströme 2.2 und 2.3 mit ebenfalls starker Wärmeentwicklung erfolgten unter der Berücksichtigung eines Streckenabstandes von 20 m. Sie beschränkten sich für den Endlagergebündestrom 2.2 auf die Bestimmung des möglichen Behälterinventars unter Annahme des maschinentechnischen Mindestabstandes von 1 m zwischen den Behältern und für den Endlagergebündestrom 2.3 auf die Bestimmung des Behälterabstandes in Abhängigkeit von der unterschiedlichen Beladung.

Im Ergebnis für den Endlagergebündestrom 2.2 ergab sich eine maximal zulässige Beladung bei dem o. g. Streckenabstand von 20 m und dem maschinentechnischen Mindestabstand zwischen den Behältern von 1 m von 9 DWR-äquivalenten WWER-Brennelementen, das sind 22,5 WWER-Brennelemente. Im Ergebnis für den Endlagergebündestrom 2.3 zeigte sich die diskrete Eigenschaft in der Behälterbeladung. Es kann nur eine ganzzahlige Kokillenzahl in der Behälterbeladung geben. Im Falle eines mit sechs Kokillen beladenen POLLUX® 6 CSD-V (P6) ist eine Endlagerung unter den gegebenen Bedingungen nicht möglich, s. Abbildung 3.18. Wird der POLLUX®-Behälter allerdings nur mit fünf Kokillen und einer Dummy-Kokille beladen, ergibt sich bei einem Streckenabstand von 20 m ein Behälterabstand von 3,5 m.

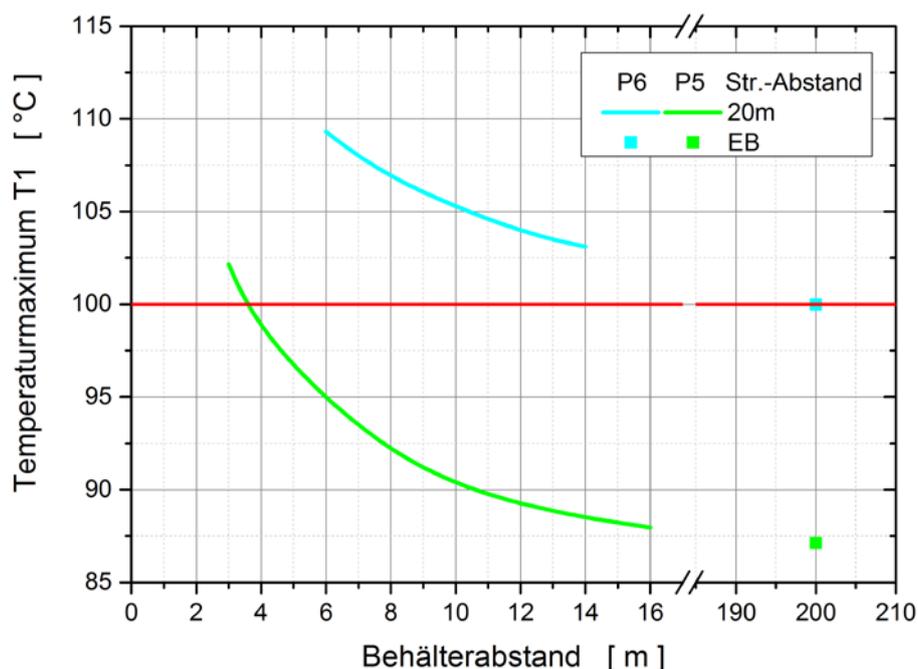


Abbildung 3.18: Maximaltemperatur bei unterschiedlichem Behälterabstand für 20 m Streckenabstand, POLLUX® 5 CSD-V und POLLUX® 6 CSD-V, Salz 100

Unter dem Aspekt einer effizienten Flächennutzung ergeben sich zusammenfassend für die einzelnen Endlagergebündetypen mit stark wärmeentwickelndem Abfall die in Tabelle 3-16 zusammengestellten Behälterbeladung sowie die zugehörigen Behälter- und Streckenabstände.

Tabelle 3-16: Rechnerische Abstände der Behälter mit stark wärmeentwickelndem Abfall, Salz 100

Salz 100	Beladung [BE]	Behälterabstand [m]	Streckenabstand [m]
WWER	22,5 (9 DWRäq)	1	20
CSD-V	5	3,5	20
DWR + SWR	5	7,5	20

3.2.5 Planung der Einlagerungsfelder

Analog zu den Planungen für die Endlagervariante Salz 200 ist auch hier für die einzelnen Endlagergebindestrome die Anzahl an Behältern ermittelt und zusammengestellt worden (Tabelle 3-17).

Tabelle 3-17: Anzahl der Gebinde für den Eindlagergebindestrom: Salz 100

Endlagergebindestrom	1	2.1	2.2	2.3	2.4	3
Anzahl von Gebinden (TLB und POLLUX®)	481 TLB	472 POLLUX®	225 POLLUX®	747 POLLUX®	3.836 POLLUX®	33 TLB

Endlagergebindestrom 1

Es gelten dieselben Aussagen zum Endlagergebindestrom 1 wie in Kapitel 3.1.5. Die Länge des Einlagerungsfeldes beträgt auch hier 280 m. Aufgrund der hier anzuwendenden normalbreiten POLLUX®-Einlagerungstechnik /DEAB 1995/ ergibt sich die Breite des Feldes mit 160 m. Somit ergibt sich für die erforderliche Feldgröße zur Einlagerung von 481 "kleinen" TLB eine Fläche von 44.800 m².

Endlagergebindestrom 2.1 bis 2.4

Für alle Endlagergebinde der Ströme 2.1 bis 2.4 wird dieselbe Einlagerungstechnik /VSG AP5 2011/ gewählt. Aufgrund ihrer geringen Wärmeentwicklung erfolgt die Auslegung der Strecken für die Gebinde der Gebindestrome 2.1 und 2.2 ausschließlich nach bergbaulichen und technischen Mindestabständen. Die Endlagerströme 2.3 und 2.4 werden thermisch ausgelegt und auf diesem Weg die Behälter- und Streckenabstände berechnet. Auch hier wird eine fortlaufende feldübergreifende Einlagerung der Gebinde der Endlagerströme 2.1 bis 2.4 angenommen, s. Abbildung 3.19.

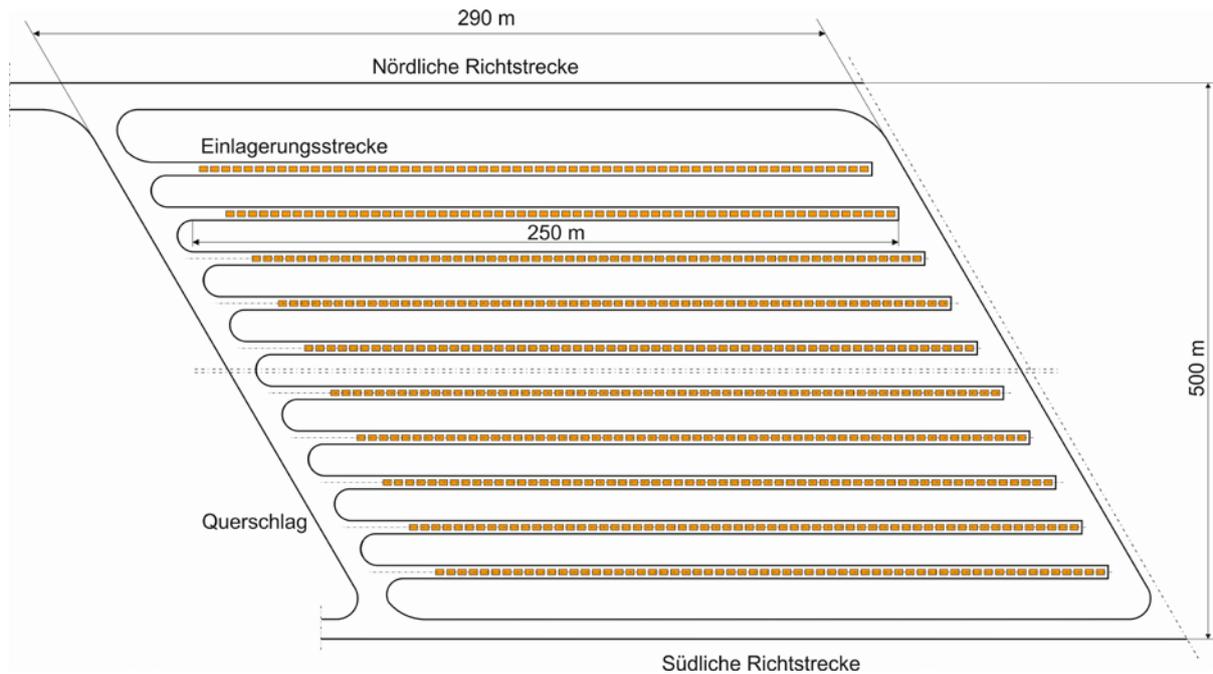


Abbildung 3.19: Endlagergebindestrome 1 und 2: Auslegung eines einzelnen Einlagerungsfeldes; Draufsicht auf Einlagerungsstrecken und Endlagergebäude

Die Länge des Einzelfeldes wurde unter Berücksichtigung des westlichen Querschlages, der Länge der Einlagerungsstrecken der technischen Mindestabstände und des Sicherheitspfeilers mit ca. 290 m ermittelt.

Die Ermittlung der Feldbreite erfolgte unter Berücksichtigung der nördlichen und südlichen Richtstrecken, der technisch erforderlichen Mindestabstände für die Transport- und Einlagerungstechnik sowie der relevanten Sicherheitspfeiler. Im Schnitt liegt die ermittelte Feldbreite bei ca. 500 m.

Die 5.280 POLLUX[®]-Behälter der Endlagergebindestrome 2.1 bis 2.4 lassen sich in 11 Feldern mit einer durchschnittlichen Breite von ca. 500 m und einer Länge von ca. 290 m einlagern. Somit ergibt sich eine erforderliche Fläche von ca. 1.586.000 m².

Endlagergebindestrom 3

Auch hier wird das Konzept der Streckenlagerung gewählt. Die 33 Gebinde dieses Stromes werden unter Berücksichtigung von Richtstrecke und Gleisradius für die Einlagerungstechnik in eine Einzelstrecke mit einer Gesamtlänge von 120 m eingelagert. Die relevante Breite beträgt mit dem Sicherheitspfeiler ca. 23 m, somit ergibt sich eine relevante Feldgröße von ca. 1.800 m².

Zusätzliche Flächen für Sicherheitsabstände

Wie bereits in Kapitel 2.4 beschrieben, sind rings um die Endlagerfläche Sicherheitsabstände zu thermisch empfindlichen geologischen Einheiten oder klüftigen und potentiell lösungsführenden Gesteinen und Nebengesteinen einzuhalten. Insgesamt ergibt sich ein zusätzlich zu berücksichtigender Flächenbedarf von 401.200 m².

Gesamtfläche für die Endlagervariante: Salz 100°C

In der Tabelle 3-18 ist der Gesamtflächenbedarf für Endlagervariante Salz 100 für die drei Endlagergebündelströme, die Sicherheitsabstandfläche und den Infrastrukturbereich dargestellt und zusammengefasst.

Tabelle 3-18: Flächenbedarf für Endlagervariante Salz 100

	Flächenbedarf [m ²]
Endlagergebündelstrom 1	44.800
Endlagergebündelstrom 2	1.586.000
Endlagergebündelstrom 3	1.800
Summe erforderliche Einlagerungsfläche	1.632.600
Sicherheitsabstandfläche (50 m)	401.200
Infrastrukturbereich	250.000
Gesamt	2.283.800

Für die **Endlagervariante Salz 100** ergibt sich ein **Gesamtflächenbedarf** von ca. 2.284.000 m² entsprechend **ca. 2,28 km²**.

3.3 Endlagervariante Tonstein: 100 °C Auslegungstemperatur

Die Berechnungsergebnisse zu den Einzelbehältern für den CASTOR[®] HAW 28 M und für den CASTOR[®] V/19 mit der Beladung DWR-mix 17/2 der Endlagervariante Salz 200 zeigen (Kapitel 3.1.4), dass bei einer Betriebsphase des Endlagers von 2050 bis 2080 vollständig mit ausgedienten Brennelementen bzw. CSD-V-Kokillen beladene TLB nicht im Salz eingelagert werden können, wenn die Auslegungstemperatur mit 100 °C festgelegt ist. Diese Feststellung gilt für die Endlagervariante Ton 100 aufgrund der geringeren Wärmeleitfähigkeit des Tons umso mehr. Als Lösungsalternative wurde bereits für die Endlagervariante Salz 100 das POLLUX[®]-Behältersystem mit reduzierter Behälterbeladung gewählt (Kapitel 3.2.4), welches auch hier zur Anwendung kommt.

Vorangegangene Studien zur Streckenlagerung im Wirtsgestein Ton /Genesis 2007/, /ERATO 2010/ zeigten, dass eine Streckenlagerung von ausgedienten Brennelementen mit

dem POLLUX[®]-Behältersystem prinzipiell möglich ist, wobei wegen der gegenüber dem Salz geringeren Wärmeleitfähigkeit des Tonsteins eine weitere Reduktion der Behälterbeladung erforderlich ist. In /Genesis 2007/ und /ERATO 2010/ wurde ein verkleinerter POLLUX[®]-Behälter zur Endlagerung dreier ausgedienter DWR-UO₂-Brennelemente vorgeschlagen. Die Planungsgrundlagen dieses Gutachtens, insbesondere der anzunehmende Zeitraum für die Betriebsdauer des Endlagers und die Berücksichtigung der MOX-Brennelemente, erfordern jedoch eine neue thermische Auslegung.

3.3.1 Sonstige Annahmen und Randbedingungen

Einlagerungsgeometrie

Die Einlagerungsgeometrie von Endlagergebinden in Einlagerungsstrecken ist in Abbildung 3.20 schematisch dargestellt. Wesentliches Merkmal des hier untersuchten Endlagerkonzeptes Ton 100 ist die Platzierung des Endlagergebindes auf einem Transportschlitten, der in der Einlagerungsstrecke verbleibt, und der anschließende Versatz des Resthohlraums mit Tonpellets. Analog zu den Endlagervarianten Salz 200 und Salz 100 wird das Versatzmaterial aus dem Ausbruchsmaterial der Strecken gewonnen. Der Vorgang des Einlagerns und Versetzens wird so oft wiederholt, bis eine Einlagerungsstrecke gefüllt ist. Einlagerungsfelder wiederum bestehen aus parallel angeordneten, mit Endlagergebinden befüllten und mit Tonpellets versetzten horizontalen Einlagerungsstrecken. Prinzipiell entspricht damit das Endlagerschema dem des im Endlagerkonzept Salz 100 verwendeten Schemas, s. Abbildung 3.19.

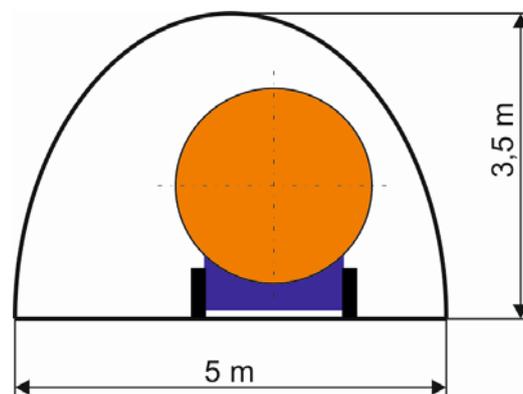


Abbildung 3.20: Einlagerungsschema von Endlagergebinden in Einlagerungsstrecken, Endlagervariante Ton 100

Endlagergebindetypen

Bei der Endlagervariante Ton 100 werden die radioaktiven Abfälle aus der Wiederaufarbeitung und die ausgedienten Brennelemente aus den Leistungsreaktoren in Endlagerbehältern vom Typ POLLUX[®] in Strecken eingelagert. Die ausgedienten Brennelemente aus den Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken werden in CASTOR[®]-Behältern, z. B. CASTOR[®] MTR2, ebenfalls in horizontalen Strecken eingelagert. Dabei ergeben sich auf Basis der

nacheinander erfolgenden Einlagerung die in Tabelle 3-19 aufgeführten Endlagergebinderströme.

Tabelle 3-19: Gebindetyp und Einlagerungsform der Endlagergebinderströme, Ton 100

Endlagergebinderstrom	Gebindetyp	Einlagerungsform
Endlagergebinderstrom 1	CASTOR [®] THTR/AVR, KNK und MTR2 (mit BER II-BE)	Strecken
Endlagergebinderstrom 2.1	POLLUX [®] (mit CSD-B und CSD-C)	Strecken
Endlagergebinderstrom 2.2	POLLUX [®] (mit WWER-BE)	Strecken
Endlagergebinderstrom 2.3	POLLUX [®] (mit CSD-V)	Strecken
Endlagergebinderstrom 2.4	POLLUX [®] (mit DWR- und SWR-BE)	Strecken
Endlagergebinderstrom 3	CASTOR [®] MTR2 (mit FRM II-BE)	Strecken

Behälterabmessungen und Behältermindestabstände

Als Basis für die Ableitung des Behälterkonzeptes dient der modifizierte POLLUX[®]-Behälter, wie er in /Genesis 2007/ und /ERATO 2010/ skizziert ist. Die Abmessungen variieren aufgrund der aufzunehmenden Brennelemente bzw. Kokillen und der erforderlichen Abschirmungen. In Tabelle 3-20 sind die der Auslegungsberechnung zugrunde gelegten Behälterabmessungen zusammengestellt. Als Korb ist der innere Behälterteil bezeichnet, in dem die Brennelemente bzw. Kokillen platziert sind. Der äußere Behälterteil dient vorrangig der mechanischen Stabilität und der Abschirmung. Aufgrund der Maschinenteknik wurde für die Kokillen ein Behälterkonzept mit einer Stapelung hintereinander festgelegt.

Tabelle 3-20: Behälterabmessungen, Ton 100

Ton 100	Behälter			Korb	
	Beladung	Länge [m]	Durchmesser [m]	Länge [m]	Durchmesser [m]
WWER	6,1*2,5	4,28	1,20	3,22	0,45
CSD-V	3	5,04	1,20	3,98	0,45
DWR+SWR	1,8..3	5,46	1,20	4,40	0,45

In Kapitel 2 wurden für die einzelnen Wirtsgesteine Kriterien zur Bestimmung einer Mindestpfeilerbreite aufgeführt, zusätzlich existieren Anforderungen aus dem Einsatz der Maschinenteknik. Werden diese Anforderungen auf die Endlagervariante Ton 100 angewendet, ergeben sich die in Tabelle 3-21 aufgeführten Mindestabstände. Aufgrund des einheitlichen Einlagerungskonzeptes der Streckenlagerung sind diese für alle Endlagergebinderstypen gleich.

Tabelle 3-21: Mindestabstände zwischen stark wärmeentwickelnden Behältern, Ton 100

Ton 100	Strecke	Mindestabstände [m]	
	Breite [m]	Strecke	Behälter
WWER	5,00	30,00	1,00
CSD-V	5,00	30,00	1,00
DWR+SWR	5,00	30,00	1,00

Behälterbeladung und Wärmeleistung der Endlagergebäude

Wie bereits in Kapitel 3.1.1 und Kapitel 3.2.1 erwähnt, stellt der Umgang mit MOX-Brennelementen wegen ihrer hohen Wärmeleistung eine Herausforderung dar. Die Verwendung des POLLUX[®]-Behälterkonzeptes ermöglicht es, die Mischung der Brennstäbe von UO₂-Brennelementen und MOX-Brennelementen entsprechend ihrem tatsächlichen Aufkommen vorzunehmen. Dieses Mischungsverhältnis wird als DWR-mix 89/11 bzw. SWR-mix 92/8 bezeichnet, da ein Behälter im Fall von DWR-Brennelementen 89 % UO₂-Anteil und 11 % MOX-Anteil enthält bzw. im Fall von SWR-Brennelementen 92 % UO₂-Anteil und 8 % MOX-Anteil. Dieses Mischkonzept wird auch für die Endlagervariante Ton 100 verwendet.

Aufgrund der geometrischen Unterschiede zwischen den Brennelementen aus DWR-, SWR- und WWER-Reaktoren bei der Beladung der Behälter wurde bereits in Kapitel 3.2.1 ein Umrechnungsfaktor - ein Äquivalenzfaktor - verwendet, mit dem die Anzahl der SWR- und WWER-Brennelemente bestimmt wird, die den gleichen Platzbedarf wie ein DWR-Brennelement haben. Diese Äquivalenzfaktoren in Höhe von 3 für SWR-Brennelemente und 2,5 für WWER-Brennelemente werden auch hier verwendet. Entsprechend Kapitel 3.2.1 wird der SWR-Endlagergebündelstrom abdeckend durch den DWR-Endlagergebündelstrom berücksichtigt und der WWER-Endlagergebündelstrom wird wegen seiner substantiell geringeren Wärmeleistung gesondert behandelt.

Mit der Verwendung des an das Abfallaufkommen angepassten Mischungsverhältnisses von UO₂-Brennelementen und MOX-Brennelementen entfällt bei der Endlagervariante Ton 100 analog zur Endlagervariante Salz 100 die Notwendigkeit, zusätzliche Behälter für Rest-MOX berücksichtigen zu müssen. Die thermische Auslegung des Endlagers erfolgt für die folgenden Endlagergebündeltypen, s. Tabelle 3-22.

Aus Abbildung 3.21 wird deutlich, dass die Größe und der zeitliche Verlauf der thermischen Leistung eines mit CSD-V-Kokillen beladenen Endlagerbehälters eine andere Charakteristik aufweist als die anderen Endlagergebündeltypen. Deshalb ist für diesen Endlagergebündeltyp eine eigenständige thermische Auslegung erforderlich.

Tabelle 3-22: Endlagergebindetypen, ihre Beladung und die dadurch abgedeckten Varianten in den Auslegungsberechnungen der Endlagervariante Ton 100

Ton 100	Gebindetyp	Beladung	Bemerkung
WWER	POLLUX®	WWER KGR	thermisch abdeckend auch für WWER KKR, s. Abbildung 2.3
CSD-V	POLLUX®	CSD-V	
DWR + SWR	POLLUX®	DWR-mix 89/11	thermisch abdeckend auch für die Endlagergebinde SWRäq-mix 92/8

Im Unterschied zur Endlagervariante Salz 200 besitzt die Endlagervariante Ton 100 analog zur Endlagervariante Salz 100 aufgrund der variablen Behälterbeladung einen zusätzlichen Freiheitsgrad für die thermische Auslegung. In Abbildung 3.21 ist der Freiheitsgrad daran erkennbar, dass für die einzeln zu betrachtenden Endlagergebindeströme die thermische Behälterleistung von zwei charakteristischen, für die Endlagervariante Ton 100 wesentlichen Behälterbeladungen dargestellt ist, z. B. für einen POLLUX®-Behälter mit den Brennstäben von 1,8 Brennelementen (P1,8) bzw. von 2,7 Brennelementen (P2,7).

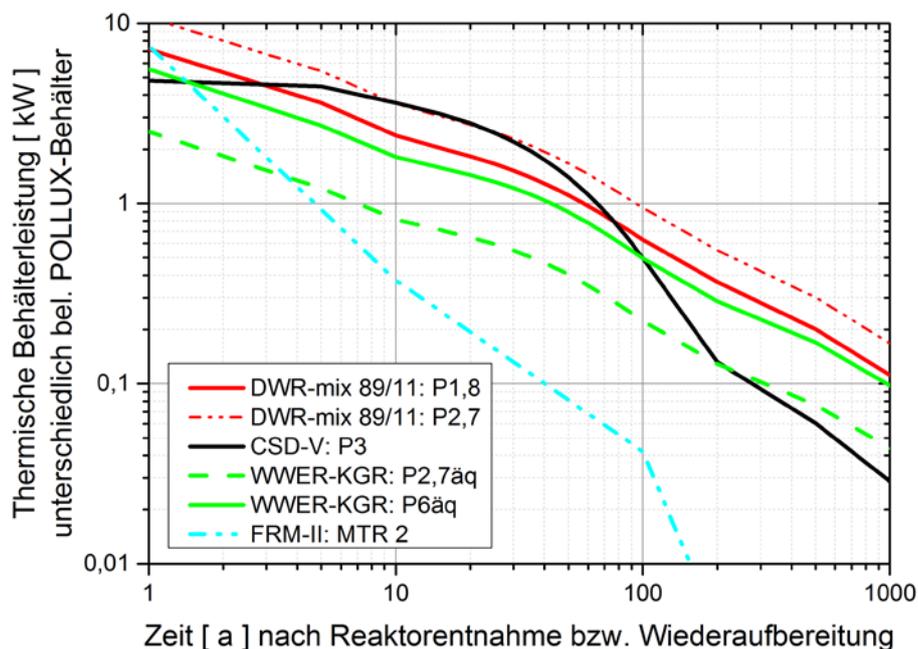


Abbildung 3.21: Wärmeleistung der wesentlichen auslegungsrelevanten Behälter mit stark wärmeentwickelndem Abfall in Abhängigkeit von der Zeit, Ton 100

Behälteranzahl und Zwischenlagerzeit

Analog zur Endlagervariante Salz 100 ist die thermische Auslegung bei variabler Behälterbeladung ein iterativer Prozess. Über die Behälterbeladung wird die Behälteranzahl beeinflusst und als Folge der veränderten Behälteranzahl auch die Zwischenlagerzeit, da sich nicht alle Endlagergebindeströme zeitlich proportional verschieben. Für die im Ergebnis des iterativen

Prozesses gewählten Behälterbeladungen für die Endlagervariante Salz 100 sind auf Basis des Abfallmengengerüsts, der Festlegung der Endlagergebindetypen, dem Konzept zum Umgang mit MOX-Brennelementen und der konzeptionellen Planung des Einlagerungsbetriebes die Zwischenlagerzeiten für die einzelnen Abfallarten festgelegt. In Tabelle 3-23 sind für die einzelnen Abfallarten die Behälteranzahl, der Anteil der jeweiligen Behälter an der Gesamtmenge einzulagernder Behälter, der für die Einlagerung der Behälter vorgesehene Zeitraum sowie die Zwischenlagerzeit der Gebinde bei der Einlagerung innerhalb des vorgesehenen Zeitraums aufgelistet. In dieser Endlagervariante sind 10.235 Gebinde bei einem Einlagerungstakt von 1,1 Tagen pro Gebinde zu berücksichtigen.

Tabelle 3-23: Behälteranzahl, Anteil am gesamten Behälteraufkommen und Zwischenlagerzeiten, Ton 100

Ton 100	Behälter		Gesamtanteil	Einlagerung		Zwischenlagerzeit	
	Beladung	Anzahl		Beginn	Ende	Beginn	Ende
AVR,THTR, KNK,OH,BER		481	4,70%	01.01.2050	29.05.2051		
CSD-B	9	16	0,16%	31.05.2051	16.06.2051	66,4	46,5
CSD-C	9	456	4,46%	17.06.2051	16.10.2052	66,5	47,8
WVER	6,1*2,5	332	3,24%	17.10.2052	06.10.2053	62,8	58,8
CSD-V	3	1.245	12,16%	07.10.2053	31.05.2057	68,8	52,4
DWR+SWR	2,5	7.672	74,96%	01.06.2057	27.11.2079	67,4	56,9
FRM		33	0,32%	28.11.2079	01.01.2080		
Behälteranzahl	10.235						
Taktfrequenz	1,1						

Folgende Zwischenlagerzeiten werden in den thermischen Berechnungen der Endlagervariante Ton 100 berücksichtigt:

- WVER-Brennelemente: 58 Jahre
- CSD-V: 52,5 Jahre
- DWR-mix 89/11: 57 Jahre

Materialverhalten

Die thermische Auslegung der Endlagervariante Ton 100 erfolgt unter ausschließlicher Verwendung der thermischen Prozessklasse. Auch hier wird für die Berechnungen angenommen, dass der thermische Energietransport ausschließlich durch Wärmeleitung erfolgt, Wärmestrahlung und Konvektion werden vernachlässigt. Damit sind die relevanten Materialparameter festgelegt. Es sind die Dichte, die massenspezifische Wärmekapazität und die Wärmeleitfähigkeit. Als Materialien werden im Berechnungsmodell das Behältermaterial, Tonpellets und das Wirtsgestein Ton berücksichtigt, s. Tabelle 3-24. Aufgrund seiner Genese weist der Ton die Besonderheit einer anisotropen Wärmeleitfähigkeit auf. Die Materialkennwerte aller Materialien im Berechnungsmodell werden als konstant angenommen.

Tabelle 3-24: Dichte und Parameter des thermischen Materialverhaltens, Ton 100

Ton 100	Referenz	Dichte [kg/m ³]	Wärmekapazität [J / kg / K]	Wärmeleitfähigkeit [W / kg / K]
Behälter	/VSG AP6 2012/	7000	515	15
Tonpellets	/SKB 2010/ /Rautioaho 2009/	2070	1100	1,0
Ton	/MontTerri 2009/ /Ansicht 2015/	2410	1290	2,15 horizontal 1,05 vertikal

3.3.2 Berechnungsprogramm

Die Berechnungen wurden mit dem in Kapitel 3.1.2 beschriebenen Berechnungsprogramm durchgeführt.

3.3.3 Berechnungsmodell

Das Berechnungsmodell ist in Abbildung 3.22 dargestellt. Symmetriebedingungen wurden bei der Erstellung des Berechnungsmodells berücksichtigt. Die horizontalen Modellränder, das sind der obere und der untere Modellrand, wurden in einer hinreichenden Entfernung zum Abfallgebinde gewählt, so dass die Ränder die Temperatur im Modellgebiet innerhalb des Simulationszeitraums nicht beeinflussen. Die vertikalen Modellränder mit veränderlichem Abstand, das sind im Berechnungsmodell Ton 100 der rechte und der hintere Modellrand, wurden in unterschiedlicher Entfernung zum Abfallgebinde angesetzt. Werden die vertikalen Modellränder in einer geringeren Entfernung vom Abfallgebinde gewählt, dass sie innerhalb der Simulationsdauer keinen Einfluss auf die Temperatur im Modellgebiet haben, wird damit ein einzelnes Gebinde in einem Einlagerungsfeld simuliert (Einzelbehälter (EB)). Werden die vertikalen Ränder in geringerer Entfernung gewählt, entspricht dies thermischen Symmetrie-randbedingungen. So wird der mittlere Bereich eines sehr großen Einlagerungsfeldes erfasst (Elementarzelle (EZ)). Der thermische Einfluss der begrenzten Ausdehnung der Einlagerungsfelder und die daraus resultieren Randeffekte werden dabei vernachlässigt. Auf das Optimierungspotenzial durch die Randlagen ist bereits in Kapitel 3.1.3 hingewiesen worden.

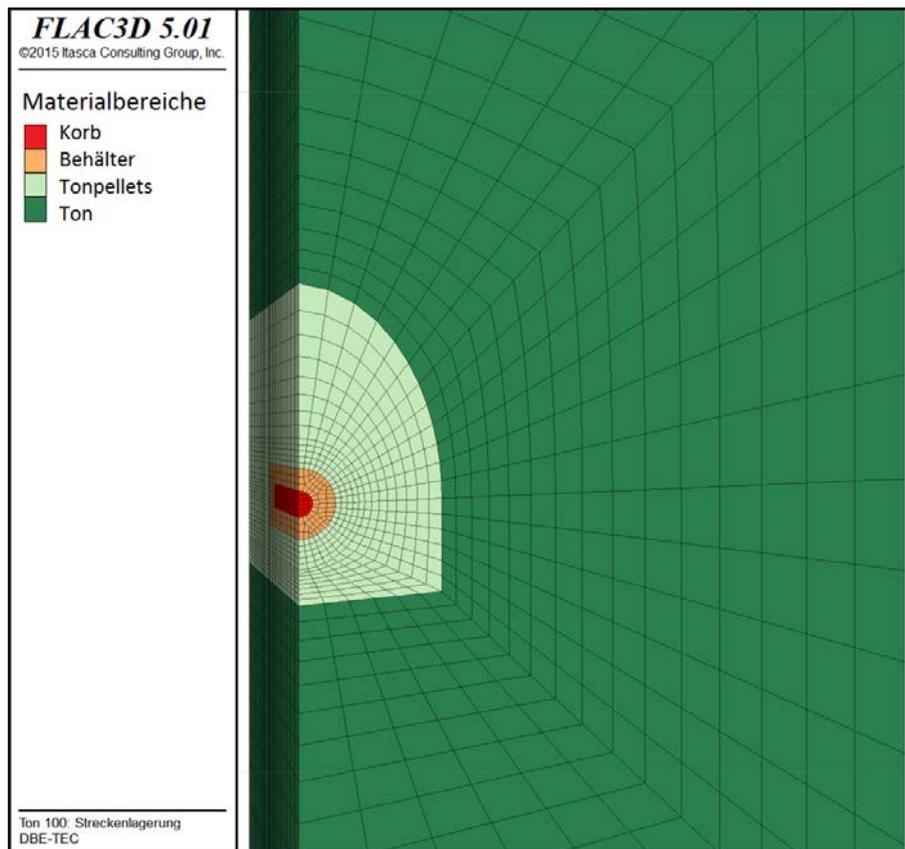


Abbildung 3.22: Berechnungsmodell Ton 100

3.3.4 Ergebnisse der thermischen Auslegung

Die Ergebnisse der Berechnungen zu den jeweiligen Einzelbehältern für die in Tabelle 3-22 aufgeführten Gebindetypen zeigen, dass das Endlagerkonzept zur Einlagerung von Endlagerbehältern unter Berücksichtigung der sich aus dem Betriebszeitraum der Endlagers von 2050 bis 2080 ergebenden Zwischenlagerzeiten auch unter Berücksichtigung einer Auslegungstemperatur von 100°C anwendbar ist. Durch die Berücksichtigung des MOX-Brennstoffs lässt sich jedoch die in /Genesis 2007/ und /ERATO 2010/ bestimmte Behälterbeladung trotz der längeren Zwischenlagerzeiten nicht aufrechterhalten. Als Ergebnis der Berechnungen am Einzelbehälter ergibt sich, dass, um die Auslegungstemperatur von 100°C einzuhalten, unter den gegebenen Bedingungen maximal eine Beladung mit POLLUX® 2,7 DWR-mix 89/11 Brennelementen zulässig ist. Die dabei erreichte Maximaltemperatur von 99°C für den Einzelbehälter lässt bei einer Auslegungstemperatur von 100°C keine Reserve zur Berücksichtigung thermischer Überlagerungseffekte einer großen Anzahl von Gebinden zu, wie sie sich in einem Einlagerungsfeld befinden. Für die Einlagerung in einem Feld ist eine weitere Reduktion des Inventars erforderlich. Im Fall des Endlagergebindestroms 2.3 (CSD-V) führt die Berechnung mit drei Kokillen im Behälter auf eine Maximaltemperatur von 92°C. Hier ist genügend Reserve zur Berücksichtigung thermischer Überlagerungseffekte vorhanden.

Der Einfluss der thermischen Überlagerungseffekte in einem Einlagerungsfeld in Bezug auf die Maximaltemperatur an der Behälteroberfläche ist beispielhaft für den POLLUX® 2,5 mit

der Beladung DWR-mix 89/11 in Abbildung 3.23 dargestellt. Abbildung 3.23 zeigt den zeitlichen Verlauf der Maximaltemperatur an der Behälteroberfläche eines Einzelbehälters und den zeitlichen Verlauf der Maximaltemperatur an der Behälteroberfläche, wie er sich im mittleren Bereich eines Einlagerungsfeldes bei einem Streckenabstand von 30 m (bergbaulicher Streckenmindestabstand) und einem Behälterabstand von 7,5 m ergibt. Im Zeitverlauf wird das Temperaturmaximum von 94°C an der Behälteroberfläche im Falle des Einzelbehälters zu Beginn des dritten Jahres nach Einlagerung erreicht. In der gesamten Folgezeit fällt die Temperatur nur noch. Entsprechend beträgt der Simulationszeitraum dieser Berechnungsvariante lediglich 10 Jahre. Bei Berücksichtigung der Überlagerungseffekte innerhalb des Einlagerungsfeldes steigt die Temperatur in der Folgezeit weiter an und das Temperaturmaximum wird mit ca. 99°C nach ca. 12 a erreicht. In Kapitel 3.2.4 ist auf das Auftreten weiterer Temperaturmaxima durch die Überlagerung der Temperaturfelder hingewiesen worden. Im Endlagerkonzept Ton 100 tritt ein solcher Überlagerungseffekt ebenfalls auf. Er macht sich jedoch nur als lokales Maximum oder, wie bei der in Abbildung 3.23 dargestellten Variante, sogar nur als Wendepunkt bei einer differenziellen Betrachtung bemerkbar, in Abbildung 3.23 als Submaximum bezeichnet. Im Ton erfolgt die Auslegung daher in jedem Fall auf der Basis des Temperaturmaximums T1.

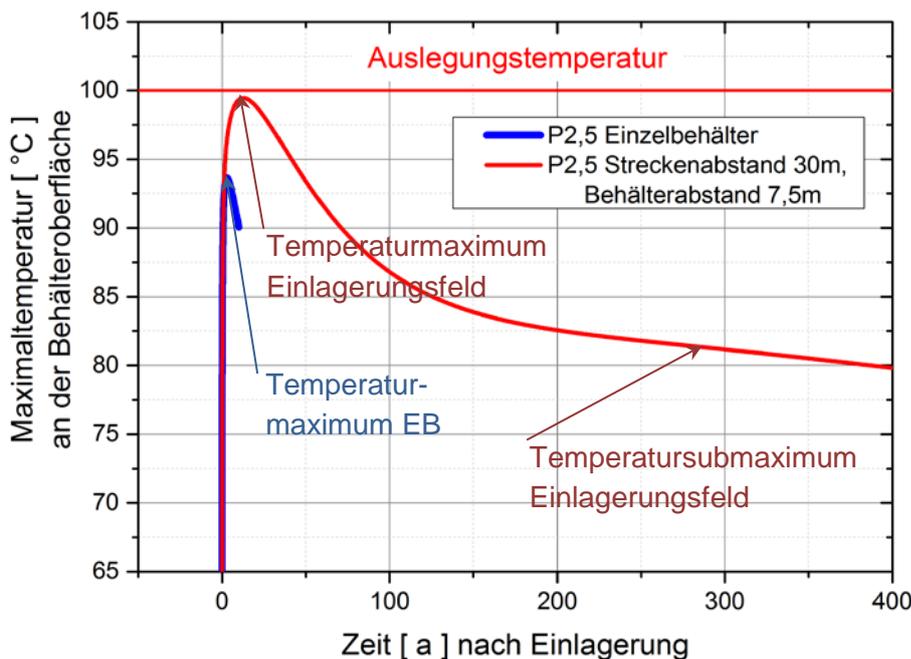


Abbildung 3.23: Entwicklung der Maximaltemperatur an der Behälteroberfläche bei Einlagerung eines Einzelbehälters und von Behältern in einem Einlagerungsfeld, POLLUX® 2,5 DWR-mix 89/11, Ton 100

Aufgrund des bergbaulichen Streckenmindestabstandes im Endlagerkonzept Ton 100 wurden im Rahmen der thermischen Berechnungen zur Ermittlung des Flächenbedarfs nur Streckenabstände von 30 m und mehr untersucht, z.B. für den POLLUX® 2,7 mit DWR-mix 89/11 Beladung Streckenabstände von 30 m und 40 m. Die wesentliche Einflussgröße zur Reduktion des Flächenbedarfs ist jedoch die Behälterbeladung. Dieser Aspekt wird am Beispiel des POLLUX®-Behälters mit DWR-mix 89/11 Beladung im Bereich zwischen der thermisch ma-

imal zulässigen Beladung von 2,7 Brennelementen und der Brennelementanzahl untersucht, die zum Erreichen des maschinentechnischen Mindestabstandes zwischen den Behältern von 1 m erforderlich ist.

Der Flächenbedarf eines Behälters ergibt sich aus dem Streckenabstand, dem Behälterabstand und der Behälterlänge. Bereits in Kapitel 3.1.4 ist durch den Bezug des Flächenbedarfs auf die Beladung des Gebindes mit dem "spezifische Flächenbedarf" eine für alle hier betrachteten Endlagerkonzepte anwendbare Vergleichsgröße eingeführt worden.

Im Ergebnis der für die Endlagervariante Ton 100 durchgeführten Berechnungen zeigt sich, dass eine Beladung im maximal möglichen Bereich zu einem sehr großen spezifischen Flächenbedarf von über 200 m²/BE führt, s. Abbildung 3.24. Ein größerer Streckenabstand als der Mindeststreckenabstand ermöglicht zwar geringfügig kleinere Behälterabstände, der spezifische Flächenbedarf steigt jedoch. Wird die Behälterbeladung gegenüber einer Beladung mit 2,7 Brennelementen verringert, verkleinert sich auch der spezifische Flächenbedarf.

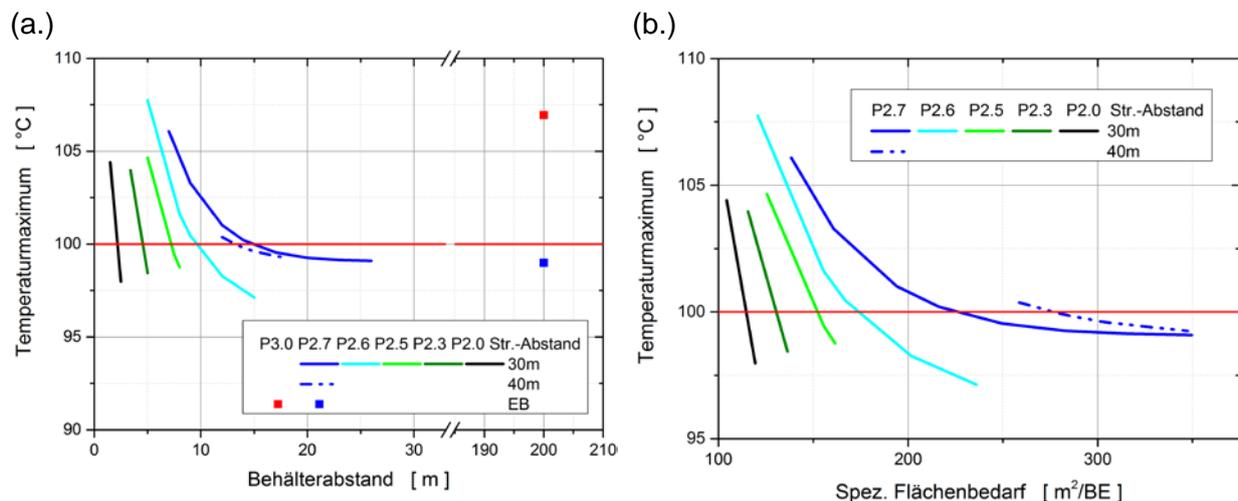


Abbildung 3.24. Maximaltemperatur unterschiedlich beladener Endlagergebände in Abhängigkeit (a) des Behälterabstandes und (b) des Spezifischen Flächenbedarfs, POLLUX® mit DWR-mix 89/11, Ton 100

In Abbildung 3.25 ist der Zusammenhang zwischen der Behälterbeladung und dem Behälterabstand bzw. dem spezifischem Flächenbedarf für die Varianten dargestellt, welche die Auslegungstemperatur von 100°C gerade erreichen. Im Bereich der thermisch maximal möglichen Behälterbeladung von 2,7 Brennelementen pro Endlagergebäude wiesen der Behälterabstand und der spezifische Flächenbedarf ein stark ansteigendes Verhalten auf, unterhalb von ca. 2,55 Brennelementen pro Endlagergebäude ist der Einfluss der Beladung auf den Behälterabstand und den spezifischen Flächenbedarf nahezu linear.

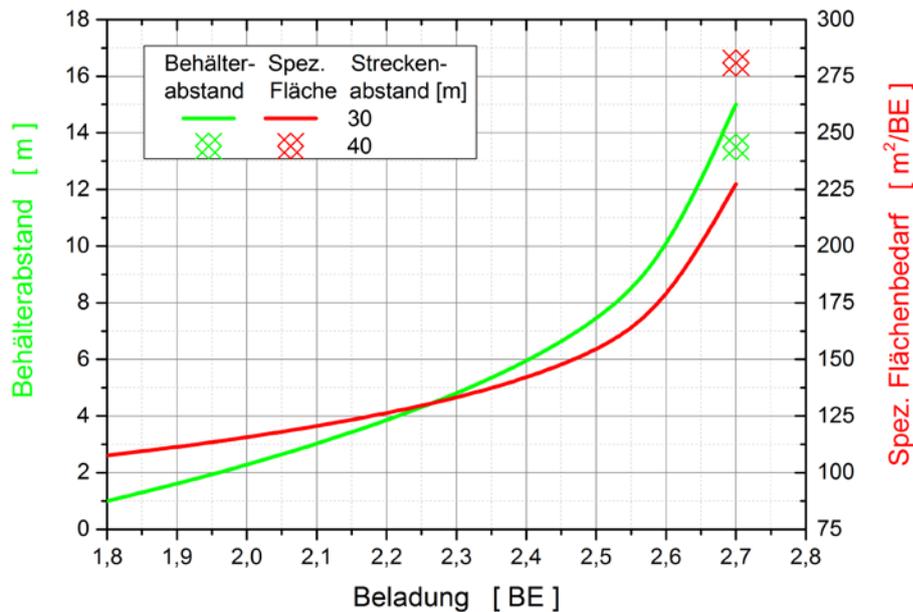


Abbildung 3.25: Behälterabstand und spezifischer Flächenbedarf in Abhängigkeit des Streckenabstandes bei Ausschöpfung der Auslegungstemperatur von 100°C auf der Behälteroberfläche, DWR-mix 89/11, Ton 100

Für ein Brennelement vom Typ DWR-mix 89/11 und einer Zwischenlagerzeit von 57 Jahren beträgt der spezifische Flächenbedarf bei einer Beladung eines Endlagergebindes mit den Brennstäben von 2,5 Brennelementen ca. 150 m²/BE. In einer verbesserten Auslegung ist ein minimaler Flächenbedarf pro Brennelement von ca. 110 m²/BE möglich, allerdings steigt die Behälteranzahl des Gebindestroms 2.4 von 7.672 auf 10.656 Gebinde und der Einlagerungstakt reduziert sich auf 0,8 Tage pro Gebinde.

Die Berechnungen für die beiden Endlagergebindestrome 2.2 und 2.3 mit ebenfalls starker Wärmeentwicklung erfolgten unter der Berücksichtigung eines Streckenabstandes von 30 m. Sie beschränkten sich für den Endlagergebindestrom 2.2 auf die Bestimmung des möglichen Behälterinventars unter Annahme des maschinentechnischen Mindestabstandes von 1 m zwischen den Behältern und für den Endlagergebindestrom 2.3 auf die Bestimmung des Behälterabstandes in Abhängigkeit der unterschiedlichen Beladung.

Im Fall des Endlagergebindestroms 2.2 beträgt die maximal zulässige Beladung bei dem o. g. Streckenabstand von 30 m und dem maschinentechnischen Mindestabstand zwischen den Behältern von 1 m 6,1 DWR-äquivalenten WWER-Brennelemente, das sind 15,25 WWER-Brennelemente. Im Fall des Endlagergebindestroms 2.3 beträgt der erforderliche Behälterabstand bei Verwendung von POLLUX[®] 3 CSD-V unter den gegebenen Bedingungen 4,5 m.

Unter dem Aspekt einer effizienten Flächennutzung ergeben sich zusammenfassend für die einzelnen Endlagergebindetypen mit stark wärmeentwickelndem Abfall die in Tabelle 3-25 zusammengestellten Behälterbeladung sowie die zugehörigen Behälter- und Streckenabstände.

Tabelle 3-25: Rechnerische Abstände der Behälter mit stark wärmeentwickelndem Abfall, Ton 100

Ton 100	Beladung [BE]	Behälterabstand [m]	Streckenabstand [m]
WWER	15,25 (6,1 DWRäq)	1	30
CSD-V	3	4,5	30
DWR + SWR	2,5	7,2	30

3.3.5 Planung der Einlagerungsfelder

Analog zu den Planungen für die Endlagervariante Salz 200 und Salz 100 sind auch hier für die einzelnen Endlagergebinderströme die Anzahl an Behältern ermittelt und zusammengestellt worden (Tabelle 3-26).

Tabelle 3-26: Anzahl der Gebinde für den Endlagergebinderstrom: Ton 100

Endlagergebinderstrom	1	2.1	2.2	2.3	2.4	3
Anzahl von Gebinden (TLB und POLLUX®)	481 TLB	472 POLLUX®	332 POLLUX®	1.245 POLLUX®	7.672 POLLUX®	33 TLB

Endlagergebinderstrom 1

Es gelten dieselben Aussagen zum Endlagergebinderstrom 1 wie in Kapitel 3.1.5. Die Länge des Feldes wurde deshalb unter Berücksichtigung des westlichen und östlichen Querschlag (Umfahrungsstrecke des 1. Feldes), der Länge der Einlagerungsstrecken und des Sicherheitspfeilers mit 300 m ermittelt. Die Breite des Feldes wurde unter Berücksichtigung der nördlichen und südlichen Richtstrecke, von 8 Einlagerungsstrecken und der entsprechenden Sicherheitspfeiler mit 280 m ermittelt. Maschinentechnische Grundlage für die Einlagerungsstreckenbreite ist eine um 500 mm schmalere Einlagerungsvorrichtung, da bei Ton 100 auch nur "kleine" TLB eingelagert werden. Somit ergibt sich für den Gebinderstrom 1 eine erforderliche Feldgröße von 84.000 m².

Endlagergebinderstrom 2.1 bis 2.4

Alle Endlagergebinde der Ströme 2.1 bis 2.4 werden mit der im Vorhaben ERATO /ERATO 2010/ skizzierten Einlagerungstechnik eingelagert. Aufgrund ihrer geringen Wärmeentwicklung erfolgt die Auslegung der Strecken für die Gebinde der Gebinderströme 2.1 und 2.2 ausschließlich nach bergbaulichen und technischen Mindestabständen. Die Endlagerströme 2.3 und 2.4 werden thermisch ausgelegt und auf diesem Weg die Behälter- und Streckenabstände berechnet. Auch hier wird eine fortlaufende, feldübergreifende Einlagerung der Gebinde der Endlagerströme 2.1 bis 2.4 angenommen.

Die Länge des Einzelfeldes wurde unter Berücksichtigung des westlichen Querschlags, der Länge der Einlagerungsstrecken, der technischen Mindestabstände und des Sicherheitspfeilers mit ca. 310 m ermittelt.

Die Ermittlung der Feldbreite erfolgte unter Berücksichtigung der nördlichen und südlichen Richtstrecken, der technisch erforderlichen Mindestabstände für die Transport- und Einlagerungstechnik sowie der relevanten Sicherheitspfeiler. Die ermittelten Feldbreiten liegen bei ca. 510 m.

Die 9721 POLLUX[®]-Behälter der Endlagergebinderöme 2.1 bis 2.4 lassen sich in 30 Feldern mit einer durchschnittlichen Breite von ca. 510 m und einer Länge von ca. 310 m einlagern. Somit ergibt sich eine erforderliche Fläche von ca. 4.871.000 m².

Endlagergebinderstrom 3

Für die Abfälle des Endlagergebinderstroms 3 wird wie für den Gebinderstrom 1 das Konzept der Streckenlagerung zugrunde gelegt. Die 33 Gebinde dieses Stromes werden unter Berücksichtigung der Richtstrecke und des Gleisradius für die Einlagerungstechnik in eine Einzelstrecke mit einer Gesamtlänge von 120 m eingelagert. Die Breite beträgt mit dem Sicherheitspfeiler ca. 24 m, somit ergibt sich eine Feldgröße von ca. 5.000 m².

Zusätzliche Fläche für Sicherheitsabstände

Wie bereits in Kapitel 2.4 beschrieben, sind rings um die Endlagerfläche Sicherheitsabstände zu thermisch empfindlichen geologischen Einheiten oder klüftigen und potentiell lösungsführenden Gesteinen und Nebengesteinen einzuhalten. Insgesamt ergibt sich ein zusätzlich zu berücksichtigender Flächenbedarf von 1.082.000 m²

Fläche für den Infrastrukturbereich

In Kapitel 2.6 sind die Funktionsflächen des Infrastrukturbereiches aufgelistet und der Flächenbedarf für die Variante Salz 200 ermittelt worden. Grundsätzlich ist der Bedarf an Funktionsflächen für alle Wirtsgesteine sehr ähnlich. Mögliche Unterschiede sind in Bezug auf die Gesamtfläche des Endlagers vernachlässigbar klein. Für die Ermittlung des Flächenbedarfs des Infrastrukturbereichs im Wirtsgestein Ton dient der Flächenbedarf im Salz als Grundlage.

Ausgehend von einer idealisierten, rechteckigen Grundfläche des Infrastrukturbereichs ist diese Fläche proportional zu ihrer Länge und Breite. Im Infrastrukturbereich sind die Streckenabstände weiterhin ausschließlich über die gebirgsmechanischen Randbedingungen zu ermitteln. Im Gegensatz zu Salz beträgt die Faustregel für eine angemessene Dimensionierung der Gebirgspfeilerbreite das 5-fache der Streckenbreite. Damit wächst die benötigte Breite und auch Fläche des Infrastrukturbereichs um denselben Faktor auf 0,63 km².

Gesamtfläche für die Endlagervariante Ton 100°C

In der Tabelle 3-27 ist der Gesamtflächenbedarf für Endlagervariante Ton 100 für die drei Endlagergebindestrome, die Sicherheitsabstandfläche und den Infrastrukturbereich dargestellt und zusammengefasst.

Tabelle 3-27: Flächenbedarf für Endlagervariante Ton 100

	Flächenbedarf [m ²]
Endlagergebindestrom 1	84.000
Endlagergebindestrom 2	4.782.000
Endlagergebindestrom 3	5.000
Summe erforderliche Einlagerungsfläche	4.871.000
Sicherheitsabstandfläche (40 m)	1.082.000
Infrastrukturbereich	630.000
Gesamt	6.583.000

Für die **Endlagervariante Ton 100** ergibt sich ein **Gesamtflächenbedarf** von ca. 6.583.000 m² entsprechend **ca. 6,58 km²**.

3.4 Endlagervariante Granit 100°C Auslegungstemperatur

Die Berechnungsergebnisse zu den Einzelbehältern für den CASTOR[®] HAW 28 M und für den CASTOR[®] V/19 mit der Beladung DWR-mix 17/2 der Endlagervariante Salz 200 zeigen (Kapitel 3.1.4), dass bei einer Betriebsphase des Endlagers von 2050 bis 2080 vollständig mit ausgedienten Brennelementen bzw. CSD-V-Kokillen beladene TLB nicht im Salz eingelagert werden können, wenn die Auslegungstemperatur mit 100°C festgelegt ist. Diese Feststellung gilt auch für die Endlagervariante Granit 100 aufgrund der geringeren Wärmeleitfähigkeit des Granits sowie des notwendigen Bentonitpuffers, der den Behälter umgibt. Als Lösungsalternative wurde für die Endlagervariante Granit 100 die Konditionierung der Abfälle in einen anderen Behältertyp vorgesehen. Im kristallinen und in der Regel geklüfteten Gestein muss davon ausgegangen werden, dass mineralisierte Wässer angetroffen werden. Deshalb sind entsprechend korrosionsresistente Behälter zu wählen. Für die Auslegung wurde deshalb ein mit Kupfer ummantelter Behälter festgelegt, ähnlich wie er in den weit fortgeschrittenen Endlagerkonzepten der SKB (Schweden) und der POSIVA (Finnland) vorgesehen ist.

Für die Einlagerung der Abfälle soll die für die Bohrlochlagerung konzipierte Brennstabkokille (BSK) verwendet werden. Die BSK wurde für Temperaturen von 200°C im Wirtgestein Salz konzipiert und kann mit den Brennstäben von 3 DWR-Brennelementen beladen werden, /DENKMAL 2010/. Für die thermische Auslegung der Endlagervariante Granit 100 wird für

die Einlagerung im Wirtsgestein Granit in Deutschland die BSK mit einem 5 cm dicken Kupfermantel zugrunde gelegt. Zur Unterscheidung der beiden Brennstabkokillen wird die mit Kupfer ummantelte Brennstabkokille als BSK-Cu bezeichnet.

3.4.1 Sonstige Annahmen und Randbedingungen

Einlagerungsgeometrie

Die Einlagerungsgeometrie von Endlagergebinden in vertikale Kurzbohrlöcher ist in Abbildung 3.26 schematisch dargestellt. Die Bemaßung entspricht dem möglichen deutschen Konzept, in Klammern sind die Abmessungen des schwedischen Konzeptes aufgeführt. Die größeren Abmessungen insbesondere der Beschickungsstrecken oberhalb der vertikalen Kurzbohrlöcher ergeben sich aus spezifischen, deutschen Anforderungen an die Einlagerungstechnik, um die Behebung von potenziellen Betriebsstörungen zu ermöglichen. Wesentliches Merkmal des hier untersuchten Endlagerkonzeptes ist die Platzierung des Endlagergebindes in einem mit einem Bentonitpuffer ausgekleideten vertikalen Kurzbohrloch ausgehend von einer Beschickungsstrecke, die anschließend mit Bentonit verfüllt wird. Einlagerungsfelder wiederum bestehen aus parallel angeordneten Beschickungsstrecken, die eine große Zahl von Kurzbohrlöchern enthalten, s. Abbildung 3.32.

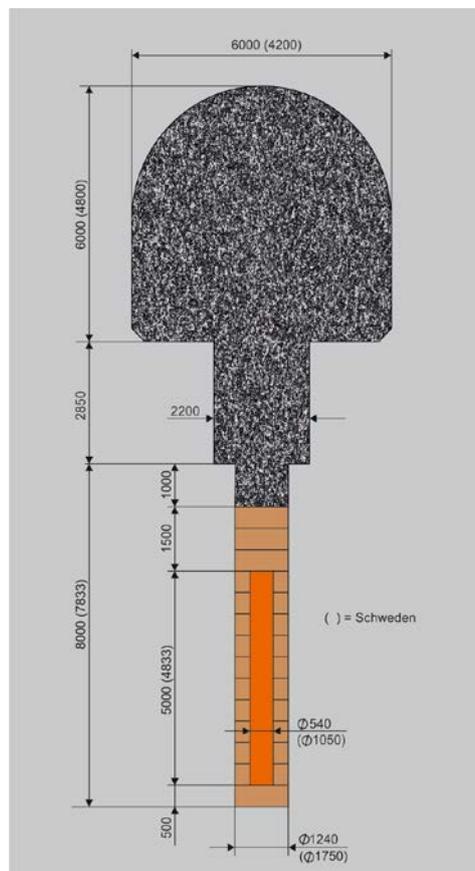


Abbildung 3.26: Einlagerungsschema von Endlagergebinden in vertikalen Kurzbohrlöchern, Granit 100

Endlagergebündetypen

Bei der Endlagervariante Granit 100 werden die radioaktiven Abfälle aus der Wiederaufarbeitung und die ausgedienten Brennelemente aus den Leistungsreaktoren in Endlagerbehältern vom Typ BSK-3-Cu in vertikalen Kurzbohrlöchern eingelagert. Die ausgedienten Brennelemente aus den Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken werden in CASTOR[®]-Behältern, z. B. CASTOR[®] MTR2, in horizontalen Strecken eingelagert /NAGRA 1994/. Dabei ergeben sich auf Basis der nacheinander erfolgenden Einlagerung die in Tabelle 3-28 aufgeführten Endlagergebündeströme.

Tabelle 3-28: Bündetyp und Einlagerungsform der Endlagergebündeströme, Granit 100

Endlagergebündestrom	Gebündetyp	Einlagerungsform
Endlagergebündestrom 1	CASTOR [®] THTR/AVR, KNK und MTR2 (mit BER II-BE)	Strecken
Endlagergebündestrom 2.1	BSK-Cu (mit CSD-B und CSD-C)	vertikale Kurzbohrlöcher
Endlagergebündestrom 2.2	BSK-Cu (mit WWER-BE)	vertikale Kurzbohrlöcher
Endlagergebündestrom 2.3	BSK-Cu (mit CSD-V)	vertikale Kurzbohrlöcher
Endlagergebündestrom 2.4	BSK-Cu (mit DWR- und SWR-BE)	vertikale Kurzbohrlöcher
Endlagergebündestrom 3	CASTOR [®] MTR2 (mit FRM II-BE)	Strecken

Behälterabmessungen und Behältermindestabstände

Als Basis für die Behälterabmessungen dient die modifizierte BSK-Cu. Die Abmessungen variieren jedoch aufgrund der aufzunehmenden Brennelemente bzw. Kokillen. In Tabelle 3-29 sind die der Auslegungsberechnung zugrunde gelegten Behälterabmessungen zusammengestellt. Als Korb ist der innere Behälterteil bezeichnet, in dem die Brennelemente bzw. Kokillen platziert sind. Bei den Gebinden, die mit Brennstäben ausgedienter Brennelemente beladen sind, variiert der Korbdurchmesser in Abhängigkeit von der Anzahl der im Behälter platzierten Brennstäbe, bei den Gebinden mit Kokillen variiert die Korblänge in Abhängigkeit von der Anzahl der hintereinander im Gebinde platzierten Kokillen. Der äußere Behälterteil dient vorrangig der mechanischen Stabilität und, wie bereits beschrieben, dem Korrosionsschutz. Der äußere Behälterteil wird auch bei veränderten Durchmesser und veränderter Länge in seinem Aufbau als unverändert angenommen.

Tabelle 3-29: Behälterabmessungen, Granit 100

Granit 100	Behälter			Korb	
	Beladung	Länge [m]	Durchmesser [m]	Länge [m]	Durchmesser [m]
WWER ^{*1}	(3,0..6,1)*2,5	4,28	0,54	3,22	0,33
CSD-V ^{*2}	1..3	5,04	0,54	3,98	0,45
DWR+SWR ^{*1}	1,0..2,8	5,00	0,54	4,40	0,33

*1) Durchmesser abhängig von der Brennelementanzahl

*2) Länge abhängig von der Kokillenanzahl

In Kapitel 2 wurden für die einzelnen Wirtsgesteine Kriterien zur Bestimmung einer Mindestpfeilerbreite aufgeführt, zusätzlich existieren Anforderungen aus dem Einsatz der Maschinenteknik. Werden diese Anforderungen auf die Endlagervariante Granit 100 angewendet, ergeben sich die in Tabelle 3-30 aufgeführt Mindestabstände. Unabhängig vom Durchmesser der BSK-Cu-Kokille wird in radialer Richtung einheitlich ein 0,35 m dicker Bentonitpuffer angesetzt. Der Mindestabstand zwischen den vertikalen Kurzbohrlöchern ergibt sich damit als der 2,5-fache Durchmesser des Bohrlochs, in das Bentonitpuffer und Gebinde eingebracht werden. Der Mindestabstand der Beschickungsstrecken ergibt sich aus der 2,5-fachen Streckenhöhe der Beschickungsstrecken.

Tabelle 3-30: Mindestabstände zwischen stark wärmeentwickelnden Behältern, Granit 100

Granit 100	Strecke Höhe [m]	Bohrloch Durchmesser [m]	Mindestabstände [m]	
			Strecke	Bohrloch
WWER ^{*1}	6,00	1,24	21,00	4,34
CSD-V	6,00	1,24	21,00	4,34
DWR+SWR ^{*1}	6,00	1,24	21,00	4,34

*1) Durchmesser abhängig von der Brennelementanzahl

Behälterbeladung und Wärmeleistung der Endlagergebände

Wie bereits in Kapitel 3.1.1 und Kapitel 3.2.1 erwähnt, stellt der Umgang mit MOX-Brennelementen wegen ihrer hohen Wärmeleistung eine Herausforderung dar. Die Verwendung des BSK-Cu-Behälterkonzeptes ermöglicht es, die Mischung der Brennstäbe von UO₂-Brennelementen und MOX-Brennelementen entsprechend ihrem tatsächlichen Aufkommen vorzunehmen. Dieses Mischungsverhältnis wird als DWR-mix 89/11 bzw. SWR-mix 92/8 bezeichnet, da ein Behälter im Fall von DWR-Brennelementen 89 % UO₂-Anteil und 11 % MOX-Anteil enthält bzw. im Fall von SWR-Brennelementen 92 % UO₂-Anteil und 8 % MOX-Anteil. Dieses Mischkonzept wird auch für die Endlagervariante Granit 100 verwendet.

Aufgrund der geometrischen Unterschiede zwischen den Brennelementen aus DWR-, SWR- und WWER-Reaktoren bei der Beladung der Behälter wurde bereits in Kapitel 3.2.1 ein Umrechnungsfaktor - ein Äquivalenzfaktor - verwendet, mit dem die Anzahl der SWR- und WWER-Brennelemente bestimmt wird, die den gleichen Platzbedarf wie ein DWR-

Brennelement haben. Diese Äquivalenzfaktoren in Höhe von 3 für SWR-Brennelemente und 2,5 für WWER-Brennelemente werden auch hier verwendet. Entsprechend Kapitel 3.2.1 wird der SWR-Endlagergebindestrom abdeckend durch den DWR-Endlagergebindestrom berücksichtigt, und der WWER-Endlagergebindestrom wird wegen seiner substantiell geringeren Wärmeleistung gesondert behandelt.

Mit der Verwendung des an das Abfallaufkommen angepassten Mischungsverhältnisses von UO_2 -Brennelementen und MOX-Brennelementen entfällt bei der Endlagervariante Granit 100 analog zu den Endlagervarianten Salz 100 und Ton 100 die Notwendigkeit, zusätzliche Behälter für Rest-MOX berücksichtigen zu müssen. Die thermische Auslegung der Endlagervariante Granit 100 erfolgt mit den in Tabelle 3-31 aufgeführten Endlagergebindetypen.

Tabelle 3-31: Endlagergebindetypen, ihre Beladung und die dadurch abgedeckten Varianten in den Auslegungsberechnungen der Endlagervariante Granit 100

Granit 100	Gebindetyp	Beladung	Bemerkung
WWER	BSK-Cu	WWER KGR	thermisch abdeckend auch für WWER KKR, s. Abbildung 2.3
CSD-V	BSK-Cu	CSD-V	
DWR + SWR	BSK-Cu	DWR-mix 89/11	thermisch abdeckend auch für die Endlagergebinde SWRäq-mix 92/8

In Abbildung 3.27 ist die Wärmeleistung der thermisch relevanten Endlagergebinde im Vergleich zueinander dargestellt. Aus Abbildung 3.27 wird deutlich, dass die Größe und der zeitliche Verlauf der thermischen Leistung eines mit CSD-V-Kokillen beladenen Endlagergebindes eine andere Charakteristik aufweist als die anderen Endlagergebindetypen. Deshalb ist für diesen Endlagergebindetyp eine eigenständige thermische Auslegung erforderlich.

Im Unterschied zur Endlagervariante Salz 200 besitzt die Endlagervariante Granit 100 analog zu den Endlagervariante Salz 100 und Ton 100 aufgrund der variablen Behälterbeladung einen zusätzlichen Freiheitsgrad für die thermische Auslegung. In Abbildung 3.27 ist der Freiheitsgrad daran erkennbar, dass für die einzeln zu betrachtenden Endlagergebindestrome die thermische Behälterleistung von zwei charakteristischen, für die Endlagervariante Granit 100 wesentlichen Behälterbeladungen dargestellt ist, z. B. für eine BSK-Cu mit den Brennstäben von 1,6 Brennelementen (BSK 1,6) bzw. von 2,8 Brennelementen (BSK 2,8).

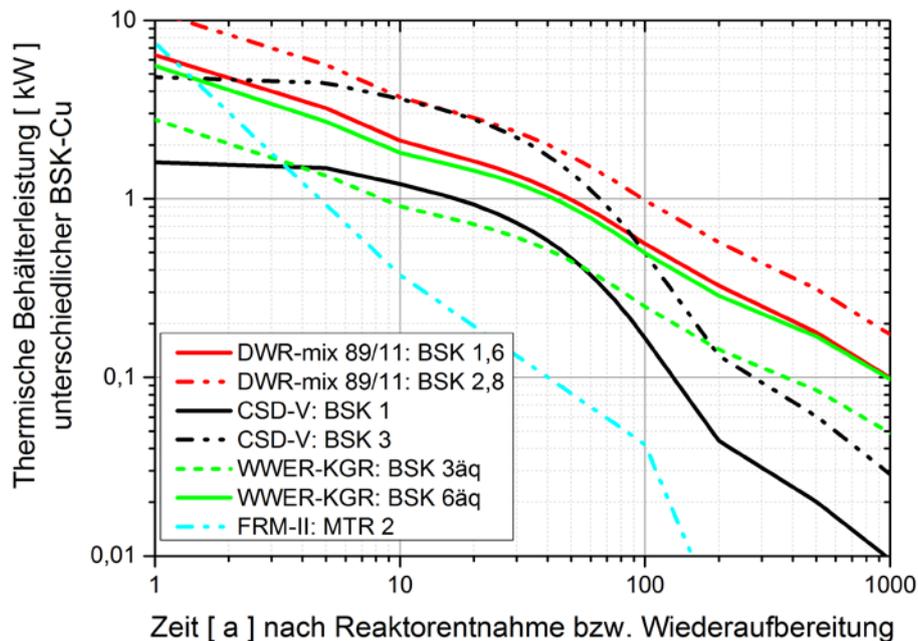


Abbildung 3.27: Wärmeleistung der wesentlichen auslegungsrelevanten Behälter mit stark wärmeentwickelndem Abfall in Abhängigkeit von der Zeit, Granit 100

Behälteranzahl und Zwischenlagerzeit

Analog zu den Endlagervarianten Salz 100 und Ton 100 ist die thermische Auslegung bei variabler Behälterbeladung ein iterativer Prozess. Über die Behälterbeladung wird die Behälteranzahl beeinflusst und als Folge der veränderten Behälteranzahl auch die Zwischenlagerzeit, da sich nicht alle Endlagergebinderströme zeitlich proportional verschieben. Für die im Ergebnis des iterativen Prozesses gewählten Behälterbeladungen für die Endlagervariante Granit 100 sind auf Basis des Abfallmengengerüsts, der Festlegung der Endlagergebinderarten, dem Konzept zum Umgang mit MOX-Brennelementen und der konzeptionellen Planung des Einlagerungsbetriebes die Zwischenlagerzeiten für die einzelnen Abfallarten festgelegt. In Tabelle 3-32 sind für die einzelnen Abfallarten die Behälteranzahl, der Anteil der jeweiligen Behälter an der Gesamtmenge einzulagernder Behälter, der für die Einlagerung der Behälter vorgesehene Zeitraum sowie die Zwischenlagerzeit der Gebinde bei der Einlagerung innerhalb des vorgesehenen Zeitraums aufgelistet. In dieser Endlagervariante sind 14.785 Gebinde bei einem Einlagerungstakt von 0,7 Tagen pro Gebinde zu berücksichtigen.

Folgende Zwischenlagerzeiten werden in den thermischen Berechnungen der Endlagervariante Granit 100 berücksichtigt:

- WWER-Brennelemente: 58 Jahre
- CSD-V: 52 Jahre
- DWR-mix 89/11: 57 Jahre

Tabelle 3-32: Behälteranzahl, Anteil am gesamten Behälteraufkommen und Zwischenlagerzeiten, Granit 100

Granit 100	Behälter		Gesamtanteil	Einlagerung		Zwischenlagerzeit	
	Beladung	Anzahl		Beginn	Ende	Beginn	Ende
AVR, THTR, KNK, OH, BER		481	3,25%	01.01.2050	22.12.2050		
CSD-B	3	47	0,32%	23.12.2050	26.01.2051	66,0	46,1
CSD-C	3	1.368	9,25%	27.01.2051	05.11.2053	66,1	48,8
WWER	6,1*2,5	332	2,25%	06.11.2053	09.07.2054	63,8	59,5
CSD-V	2	1.868	12,63%	10.07.2054	24.04.2058	69,5	53,3
DWR+SWR	1,8	10.656	72,07%	24.04.2058	08.12.2079	68,3	56,9
FRM		33	0,22%	08.12.2079	01.01.2080		
			0,00%				
Behälteranzahl	14.785						
Taktfrequenz	0,7						

Materialverhalten

Die thermische Auslegung der Endlagervariante Granit 100 erfolgt unter ausschließlicher Verwendung der thermischen Prozessklasse. Auch hier wird für die Berechnungen angenommen, dass der thermische Energietransport ausschließlich durch Wärmeleitung erfolgt, Wärmestrahlung und Konvektion werden vernachlässigt. Damit sind die relevanten Materialparameter festgelegt. Es sind die Dichte, die massenspezifische Wärmekapazität und die Wärmeleitfähigkeit. Als Materialien werden im Berechnungsmodell das Behältermaterial, der Bentonit und das Wirtsgestein Granit berücksichtigt, s. Tabelle 3-33. Die Materialkennwerte aller Materialien im Berechnungsmodell werden als konstant angenommen.

Tabelle 3-33: Dichte und Parameter des thermischen Materialverhaltens, Granit 100

Granit 100	Referenz	Dichte [kg/m ³]	Wärmekapazität [J / kg / K]	Wärmeleitfähigkeit [W / kg / K]
Behälter	/VSG AP6 2012/	7000	515	15
Bentonit	/SKB 2010/ /Rautioaho 2009/	2070	1100	1,0
Granit	/SRSA 2015/	2700	763	3,57

3.4.2 Berechnungsprogramm

Die Berechnungen wurden mit dem in Kapitel 3.1.2 beschriebenen Berechnungsprogramm durchgeführt.

3.4.3 Berechnungsmodell

Das Berechnungsmodell ist in Abbildung 3.28 dargestellt. Symmetriebedingungen wurden bei der Erstellung des Berechnungsmodells berücksichtigt. Die horizontalen Modellränder, das sind der obere und der untere Modellrand, wurden in einer hinreichenden Entfernung zum Abfallgebinde gewählt, so dass die Ränder die Temperatur im Modellgebiet innerhalb des Simulationszeitraums nicht beeinflussen. Die vertikalen Modellränder mit veränderlichem Abstand, das sind im Berechnungsmodell Granit 100 der rechte und der hintere Modellrand, wurden in unterschiedlicher Entfernung zum Abfallgebinde angesetzt. Werden die vertikalen Modellränder in einer geringeren Entfernung vom Abfallgebinde gewählt, dass sie innerhalb der Simulationsdauer keinen Einfluss auf die Temperatur im Modellgebiet haben, wird damit ein einzelnes Gebinde in einem Einlagerungsfeld simuliert (Einzelbehälter (EB)). Werden die vertikalen Ränder in geringerer Entfernung gewählt, entspricht dies thermischen Symmetriestandbedingungen. So wird der mittlere Bereich eines sehr großen Einlagerungsfeldes erfasst (Elementarzelle (EZ)). Der thermische Einfluss der begrenzten Ausdehnung der Einlagerungsfelder und die daraus resultierenden Randeffekte werden dabei vernachlässigt. Auf das Optimierungspotenzial durch die Randlagen ist bereits in Kapitel 3.1.3 hingewiesen worden.

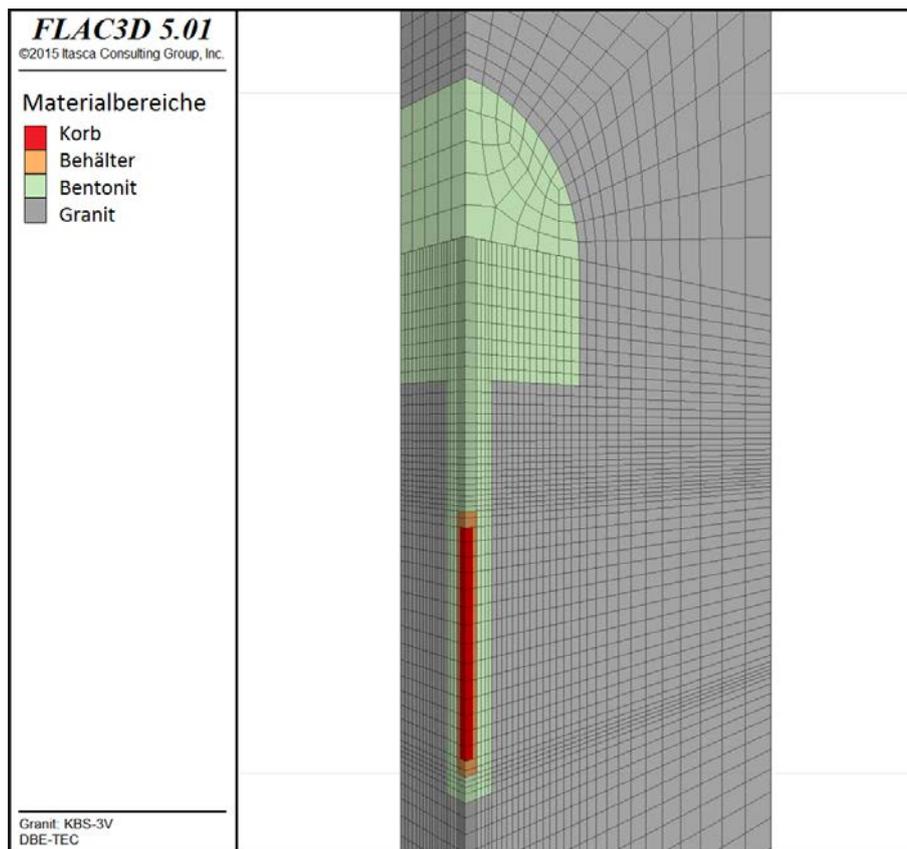


Abbildung 3.28: Berechnungsmodell Granit 100

3.4.4 Ergebnisse der thermischen Auslegung

Die Ergebnisse der Berechnungen zu den jeweiligen Einzelbehältern für die in Tabelle 3-31 aufgeführten Gebindetypen zeigen, dass das Endlagerkonzept zur Einlagerung von Endlagerbehältern unter Berücksichtigung der sich aus dem Betriebszeitraum der Endlagers von 2050 bis 2080 ergebenden Zwischenlagerzeiten auch unter Berücksichtigung einer Auslegungstemperatur von 100°C anwendbar ist. Als Ergebnis der Berechnungen am Einzelbehälter ergibt sich, dass unter den gegebenen Bedingungen und einer Auslegungstemperatur von 100°C maximal eine Beladung der BSK-Cu mit 2,8 DWR-mix 89/11 Brennelementen zulässig ist. Die dabei erreichte Maximaltemperatur lässt allerdings keine Reserve zur Berücksichtigung thermischer Überlagerungseffekte einer großen Anzahl von Gebinden zu, wie sie sich in einem Einlagerungsfeld befinden. Für die Einlagerung in einem Feld ist eine weitere Reduktion des Inventars erforderlich. Im Fall des Endlagergebindestroms 2.3 (CSD-V) führt die Berechnung mit drei Kokillen im Behälter auf eine Maximaltemperatur von 93°C, eine Reduktion des Inventars auf zwei Kokillen ergibt eine Maximaltemperatur von 83°C. Unabhängig von der Reduktion ist hier genügend Reserve zur Berücksichtigung thermischer Überlagerungseffekte vorhanden.

Der Einfluss der thermischen Überlagerungseffekte in einem Einlagerungsfeld in Bezug auf die Maximaltemperatur an der Behälteroberfläche ist beispielhaft für die BSK-Cu 1,6 DWR-mix 89/11 in Abbildung 3.29 dargestellt. Abbildung 3.29 zeigt den zeitlichen Verlauf der Maximaltemperatur an der Behälteroberfläche eines Einzelbehälters und den zeitlichen Verlauf der Maximaltemperatur an der Behälteroberfläche, wie er sich im mittleren Bereich eines Einlagerungsfeldes bei einem Streckenabstand von 21 m (bergbaulicher Mindestabstand zwischen den Einlagerungsstrecken) und einem Behälterabstand von 6 m ergibt. Im Zeitverlauf wird das Temperaturmaximum an der Behälteroberfläche im Falle des Einzelbehälters gut ein Jahre nach Einlagerung erreicht. In der gesamten Folgezeit fällt die Temperatur nur noch. Entsprechend beträgt der Simulationszeitraum dieser Berechnungsvariante lediglich 5 Jahre.

Bei Berücksichtigung der Überlagerungseffekte innerhalb des Einlagerungsfeldes lassen sich zwei Effekte feststellen. Die Temperatur steigt in der Folgezeit zunächst noch weiter an, bevor ein Temperaturabfall festzustellen ist. Dieses Temperaturmaximum wird im Folgenden als T1 bezeichnet. Dieser Anstieg kann abhängig von den Abständen in der Berechnung über mehrere Jahrzehnte anhalten. Für die in Abbildung 3.29 dargestellte Variante beträgt die Maximaltemperatur T1 93°C und wird 35 Jahre nach Einlagerung erzielt. In der Folgezeit kann sich ein zweites Temperaturmaximum T2 ausbilden. Es hängt vom Strecken- und Bohrlochabstand ab, in welcher Form sich dieses Temperaturmaximum ausbildet. In den hier untersuchten Varianten des Endlagerkonzeptes Granit 100 macht sich das zweite Temperaturmaximum als lokales Maximum oder sogar nur als Wendepunkt bei einer differenziellen Betrachtung bemerkbar. Im Granit erfolgt die Auslegung daher in jedem Fall auf der Basis des Temperaturmaximums T1. Angemerkt sei, dass auch der Nuklidvektor einen Einfluss auf die Ausbildung der Temperaturmaxima hat. Die geringen Halbwertszeiten der Spaltprodukte bei den CSD-V-Kokillen führen dazu, dass sich kein zweites Maximum ausbildet.

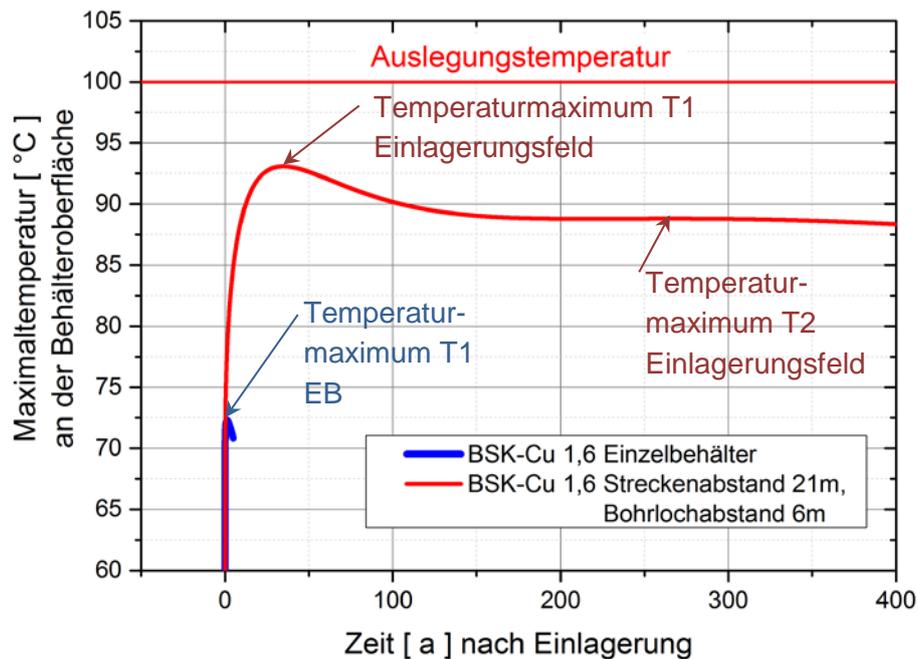


Abbildung 3.29: Entwicklung der Maximaltemperatur an der Behälteroberfläche bei Einlagerung eines Einzelbehälters und Behältern in einem Einlagerungsfeld, BSK-Cu 1,6 DWR-mix 89/11 - Granit 100

Der bergbauliche Streckenmindestabstand im Endlagerkonzept Granit 100 beträgt 21 m, der Bohrlochmindestabstand ca. 4,4 m. Das Bohrlochraster stellt daher ein vom Streckenabstand dominiertes Viereck dar. Die Ergebnisse der Endlagerkonzepte im Salz und Ton haben trotz abweichender Konzepte gezeigt, dass dem großen Abstand nur eine untergeordnete Bedeutung bei der Anpassung der Auslegung zukommt. Im Rahmen der thermischen Berechnungen zur Ermittlung des Flächenbedarfes wird daher nur ein Streckenabstand von 21 m betrachtet. Der Einfluss des Bohrlochabstandes auf die Maximaltemperatur wird für die BSK-Cu mit DWR-mix 89/11 Beladung im Bereich zwischen dem bergbaulichen Mindestabstand und maximal 14 m untersucht. Eine weitere Einflussgröße des Flächenbedarfes ist die Behälterbeladung. Dieser Aspekt wird am Beispiel der BSK-Cu mit DWR-mix 89/11 Beladung im Bereich zwischen 2,6 Brennelementen und der Brennelementanzahl untersucht, die zum Erreichen des Bohrlochmindestabstandes erforderlich ist.

Der Flächenbedarf eines Behälters ergibt sich aus dem Streckenabstand und dem Bohrlochabstand. Entgegen den voranstehenden Konzepten kommt der Behälter selbst wegen seiner vertikalen Positionierung im Endlagerkonzept Granit 100 bei der Berechnung des Flächenbedarfes nicht zum Tragen. Bereits in Kapitel 3.1.4 ist durch den Bezug des Flächenbedarfes auf die Beladung des Gebindes mit dem "spezifischen Flächenbedarf" eine für alle hier betrachteten Endlagerkonzepte anwendbare Vergleichsgröße eingeführt worden.

Im Ergebnis der Berechnungen zum Endlagerkonzept Granit 100 zeigt sich, dass eine Beladung mit 2,6 Brennelementen pro BSK-Cu zu einem sehr großen spezifischen Flächenbedarf von über 100 m²/BE führt, s. Abbildung 3.30. Wird die Behälterbeladung gegenüber einer Beladung mit 2,6 Brennelementen verringert, verkleinert sich auch der spezifische Flächenbedarf.

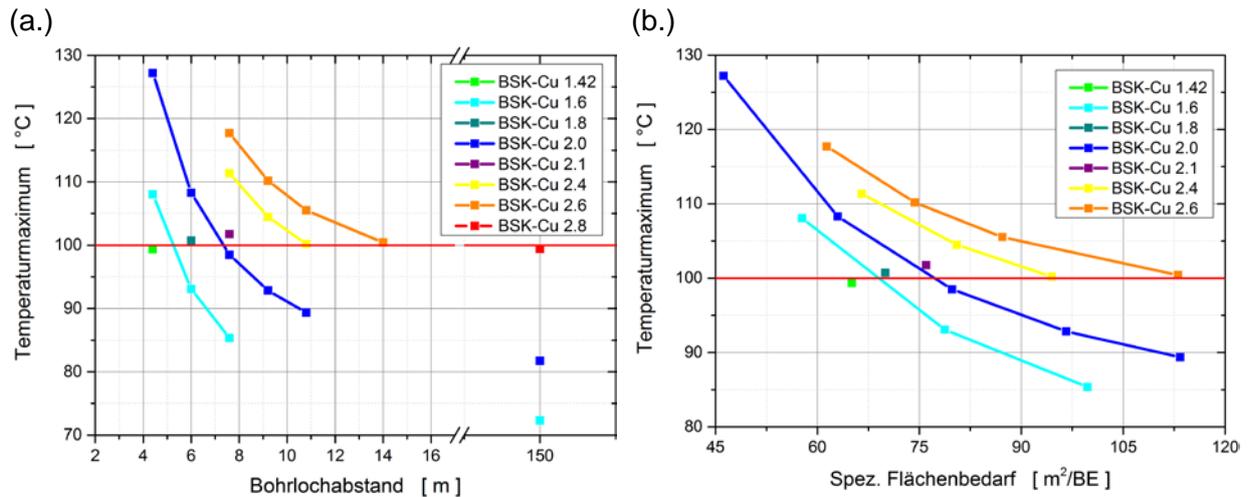


Abbildung 3.30. Maximaltemperatur unterschiedlich beladener Endlagergebäude in Abhängigkeit (a) vom Behälterabstand und (b) vom spezifischen Flächenbedarf, BSK-Cu mit DWR-mix 89/11, Granit 100

In Abbildung 3.31 ist der Zusammenhang zwischen Behälterbeladung und Behälterabstand bzw. spezifischem Flächenbedarf für die Varianten dargestellt, welche die Auslegungstemperatur von 100°C gerade erreichen. Es zeigt sich, dass bei der Endlagervariante Granit 100 eine Reduktion des Inventars bis hin zum Erreichen des Bohrlochmindestabstandes von 4,4 m zu dem geringsten spezifischen Flächenbedarf führt. Die Begleiterscheinung des verringerten Inventars ist ein Ansteigen der Anzahl einzulagernder Gebinde.

Wird ein Bohrlochabstand von sechs Metern entsprechend dem schwedischen Konzept angestrebt, ergibt sich für ein Brennelement vom Typ DWR-mix 89/11 und einer Zwischenlagerzeit von 57 Jahren eine Behälterbeladung von 1,8 Brennelementen. Der spezifische Flächenbedarf beträgt dabei 70 m²/BE. In einer verbesserten Auslegung ist zu Lasten einer ansteigenden Behälteranzahl ein minimaler Flächenbedarf pro Brennelement von ca. 62 m²/BE möglich.

Die Berechnungen für die beiden Endlagergebündelströme 2.2 und 2.3 mit ebenfalls starker Wärmeentwicklung erfolgten unter der Berücksichtigung eines Streckenabstandes von 21 m. Sie beschränkten sich für den Endlagergebündelstrom 2.2 auf die Bestimmung des möglichen Behälterinventars unter Annahme des bergbaulichen Mindestabstandes zwischen den Bohrlochern von ca. 4,4 m und für den Endlagergebündelstrom 2.3 auf die Bestimmung des Bohrlochabstandes in Abhängigkeit von der unterschiedlichen Beladung.

Im Fall des Endlagergebündelstroms 2.2 beträgt die maximal zulässige Beladung bei dem o. g. Streckenabstand von 21 m und dem Bohrlochmindestabstand 6,1 DWR-äquivalente WWER-Brennelemente, das sind 15,25 WWER-Brennelemente.

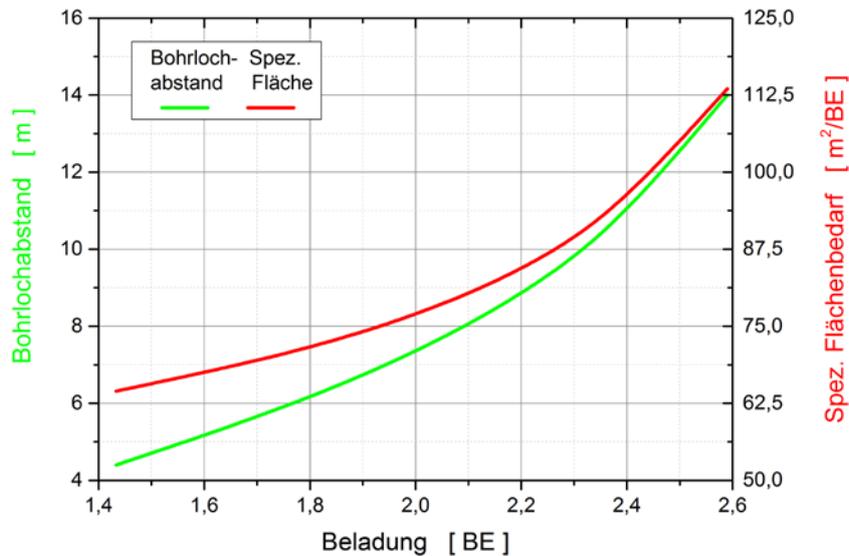


Abbildung 3.31: Behälterabstand und spezifischer Flächenbedarf in Abhängigkeit vom Streckenabstand bei Ausschöpfung der Auslegungstemperatur von 100°C auf der Behälteroberfläche, DWR-mix 89/11, Granit 100

Im Ergebnis der Berechnungen für den Endlagergebindestrom 2.3 zeigte sich die diskrete Eigenschaft in der Behälterbeladung mit CSD-V-Kokillen. Es kann nur eine ganzzahlige Kokillenzahl in der Behälterbeladung geben. Im Fall einer mit drei Kokillen beladenen BSK-Cu beträgt der erforderliche Bohrlochabstand 9,2 m, was zu einem spezifischen Flächenbedarf von 64 m²/CSD-V-Kokille führt. Eine Reduktion der Beladung auf zwei CSD-V-Kokillen je BSK-Cu führt auf einen erforderlichen Bohrlochabstand von 4,9 m, was einem spezifischen Flächenbedarf von ca. 51 m²/CSD-V-Kokille entspricht. Bei einer weiteren Reduktion auf eine CSD-V-Kokille je BSK-Cu-Kokille und Bohrloch ist der Mindestbohrlochabstand der limitierende Faktor, so dass der spezifische Flächenbedarf auf ca. 92 m²/CSD-V-Kokille ansteigt.

Unter dem Aspekt einer effizienten Flächennutzung ergeben sich zusammenfassend für die einzelnen Endlagergebindedtypen mit stark wärmeentwickelndem Abfall die in Tabelle 3-34 zusammengestellten Behälterbeladungen sowie die zugehörigen Behälter- und Streckenabstände.

Tabelle 3-34: Rechnerische Abstände der Behälter mit stark wärmeentwickelndem Abfall, Granit 100

Granit 100	Beladung	Bohrlochabstand [m]	Streckenabstand [m]
WWER	15,25 (6,1 DWRäq)	4,4	21
CSD-V	2	4,9	21
DWR + SWR	1,8	6,0	21

3.4.5 Planung der Einlagerungsfelder

Analog zu den Planungen für die Endlagervariante Salz 200, Salz 100 und Ton 100 sind auch hier für die einzelnen Endlagergebindestrome die Anzahl an Behältern ermittelt und zusammengestellt worden (Tabelle 3-35).

Tabelle 3-35: Anzahl der Gebinde für den Eindlagergebindestrom: Granit 100

Endlagergebindestrom	1	2.1	2.2	2.3	2.4	3
Anzahl von Gebinden (TLB und Kokillen)	481 TLB	1.415 Kokillen	332 Kokillen	1.868 Kokillen	10.656 Kokillen	33 TLB

Endlagergebindestrom 1

Es gelten dieselben Aussagen zum Endlagergebindestrom 1 wie in Kapitel 3.1.5. Die Länge des Feldes wurde unter Berücksichtigung des westlichen und östlichen Querschlages (Umfahrungsstrecke des 1. Feldes), der Länge der Einlagerungstrecken und des Sicherheitspfeilers mit ca. 275 m ermittelt. Die Breite des Feldes wurde unter Berücksichtigung der nördlichen und südlichen Richtstrecke, von 8 Einlagerungstrecken und der entsprechenden Sicherheitspfeiler mit ca. 140 m ermittelt. Maschinentechnische Grundlage für die Einlagerungstreckenbreite ist eine um 500 mm schmalere Einlagerungsvorrichtung, da bei Granit 100 nur "kleine" TLB eingelagert werden. Somit ergibt sich für den Gebindestrom 1 eine erforderliche Feldgröße von 39.000 m².

Endlagergebindestrom 2.1 bis 2.4

Alle Endlagergebinde der Ströme 2.1 bis 2.4 sollen mit der im Vorhaben DENKMAL /DENKMAL 2010/ entwickelten und gebauten Bohrlocheinlagerungstechnik eingelagert werden.

Die Mindestabstände der Einlagerungsbohrlöcher für die Gebindestrome 2.1 und 2.2 werden aufgrund ihrer geringen Wärmeentwicklung von bergbaulichen und technischen Anforderungen bestimmt. Für die Gebindestrome 2.3 und 2.4 ist eine thermische Auslegung der Behälter- und Streckenabstände erforderlich. Den Planungen wird zugrunde gelegt, dass die Gebindestrome 2.1 bis 2.4 fortlaufend in einem Feld eingelagert werden, ohne dass eine thermische Optimierung vorgenommen wird (s. Abbildung 3.32).

Die Ermittlung der Feldbreite erfolgte unter Berücksichtigung der nördlichen und südlichen Richtstrecken, der technisch erforderlichen Mindestabstände für die Transport- und Einlagerungstechnik sowie der relevanten Sicherheitspfeiler.

Die 14.271 Kokillen der Endlagergebindestrome 2.1 bis 2.4 lassen sich in die vertikalen Einlagerungsbohrlöcher von 207 Bohrlochbeschickungstrecken mit einer durchschnittlichen Feldbreite von ca. 500 m und einer Länge von ca. 4.350 m einlagern. Somit ergibt sich eine erforderliche Fläche von ca. 2.171.200 m².

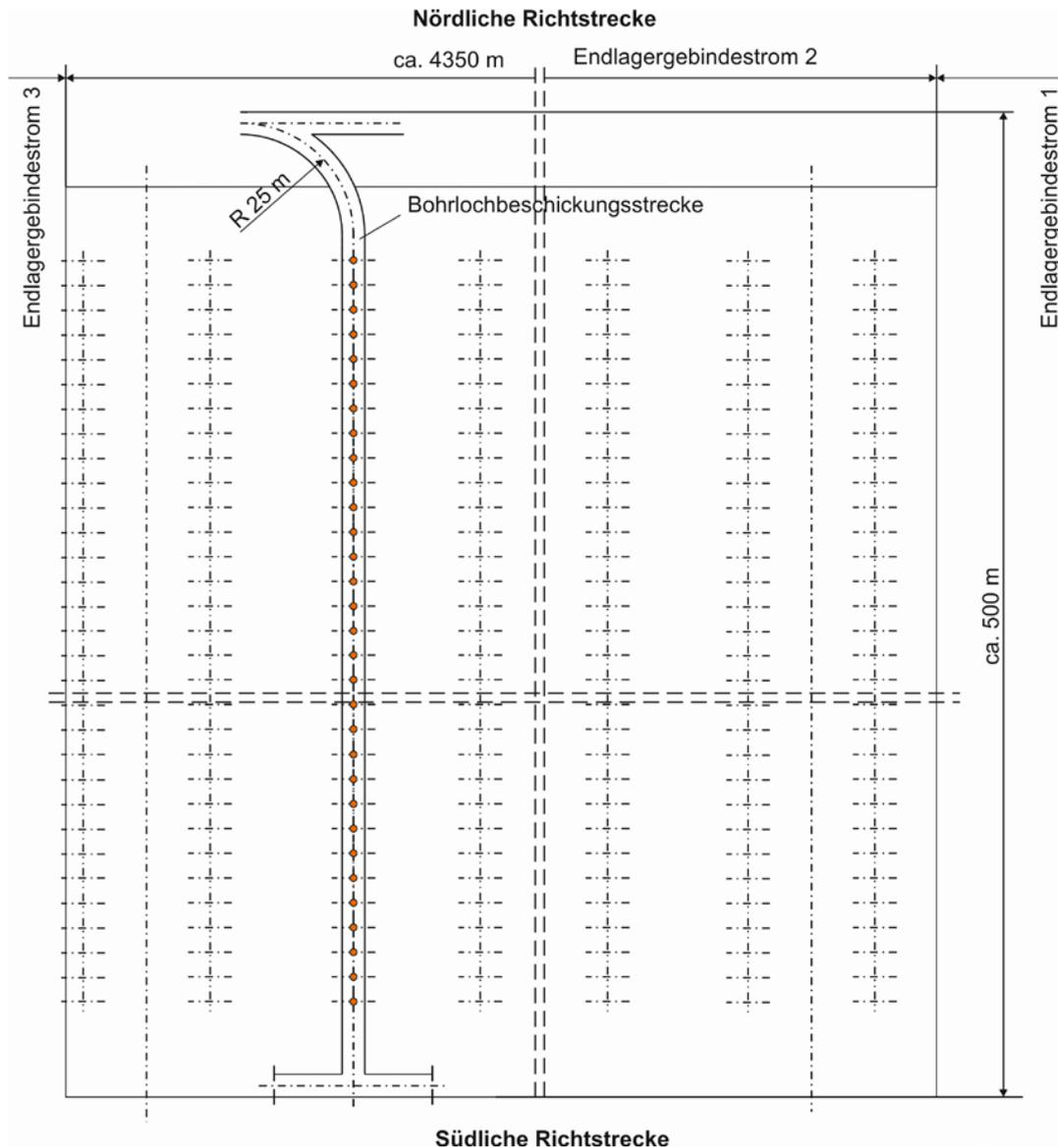


Abbildung 3.32: Feld Endlagergebinderöme 2.1 bis 2.4

Endlagergebinderöme 3

Für die Abfälle des Endlagergebinderöms 3 wird wie für den Gebinderöme 1 das Konzept der Streckenlagerung zugrunde gelegt. Die 33 Gebinde dieses Stromes werden unter Berücksichtigung der Richtstrecke und des Gleisradius für die Einlagerungstechnik in eine Einzelstrecke mit einer Gesamtlänge von 120 m eingelagert. Die Breite beträgt mit dem Sicherheitspfeiler ca. 20 m, somit ergibt sich eine Feldgröße von ca. 2.400 m².

Zusätzliche Fläche für Sicherheitsabstände

Wie bereits in Kapitel 2.4 beschrieben, sind rings um die Endlagerfläche Sicherheitsabstände zu thermisch empfindlichen geologischen Einheiten oder klüftigen und potentiell lösungsführenden Gesteinen und Nebengesteinen einzuhalten. Insgesamt ergibt sich ein zusätzlich zu berücksichtigender Flächenbedarf von 1.026.000 m²

Fläche für den Infrastrukturbereich

In Kapitel 2.6 sind die Funktionsflächen des Infrastrukturbereichs aufgelistet und der Flächenbedarf für Variante Salz 200 ermittelt worden. Grundsätzlich ist der Bedarf an Funktionsflächen für alle Wirtsgesteine sehr ähnlich. Mögliche Unterschiede sind in Bezug auf die Gesamtfläche des Endlagers vernachlässigbar klein. Für die Ermittlung des Flächenbedarfs vom Infrastrukturbereich im Wirtsgestein Granit dient der Flächenbedarf im Salz als Grundlage.

Ausgehend von einer idealisierten, rechteckigen Grundfläche des Infrastrukturbereichs ist diese Fläche proportional zu ihrer Länge und Breite. Im Infrastrukturbereich sind die Streckenabstände weiterhin ausschließlich über die gebirgsmechanischen Randbedingungen zu ermitteln.

Im Wirtsgestein Granit kann die Vereinfachung getroffen werden, dass die Infrastrukturstrecken etwa in der Breite die gleichen Ausmaße wie in der Höhe besitzen. Dadurch vereinfacht sich die Faustformel der Dimensionierung der Pfeilerbreite auf die 2,5-fache Streckenbreite. Nach oben beschriebener Vorgehensweise ist somit der Flächenbedarf des Infrastrukturbereichs im Gegensatz zu Salz um das 1,25-fache erhöht und beträgt ca. 0,32 km².

Gesamtfläche für die Endlagervariante: Granit 100°C

In Tabelle 3-36 ist der Gesamtflächenbedarf für die Endlagervariante Granit 100 für die drei Endlagergebündelströme, die Sicherheitsabstandfläche und den Infrastrukturbereich dargestellt und zusammengefasst.

Tabelle 3-36: Flächenbedarf für Endlagervariante Granit 100

	Flächenbedarf [m ²]
Endlagergebündelstrom 1	39.000
Endlagergebündelstrom 2	2.171.200
Endlagergebündelstrom 3	2.400
Summe erforderliche Einlagerungsfläche	2.212.700
Sicherheitsabstandfläche (100 m)	1.026.000
Infrastrukturbereich	320.000
Gesamt	3.558.700

Für die **Endlagervariante Granit 100** ergibt sich ein **Gesamtflächenbedarf** von ca. 3.559.000 m² entsprechend **ca. 3,56 km²**.

4 Vergleichende Gegenüberstellung der berechneten Gesamtendlagerflächen

Die berechneten Gesamtendlagerflächen für die drei Wirtsgesteine Salz, Ton und Granit für die vorgegebenen vier Endlagervarianten sind nachfolgend einander vergleichend gegenübergestellt (s. Tabelle 4-1). Bei der Zusammenstellung des Flächenbedarfs wurde unterschieden zwischen Flächen, die aus der Einhaltung von Sicherheitsabständen entstehen, Flächen, die für die Infrastrukturräume erforderlich sind, und Flächen, die für die Einlagerung der wärmeentwickelnden radioaktiven Abfälle und ausgedienten Brennelemente benötigt werden.

Tabelle 4-1: Gesamtendlagerflächenbedarf

Endlagervariante Flächenermittlung	Salz 200°C	Salz 100°C	Tonstein 100°C	Granit 100°C
Erforderliche Pfeilerbreite zwischen Einlagerungsstrecken	2,0 x Breite der Strecke	2,0 x Breite der Strecke	5,0 x Breite der Strecke	2,5 x Höhe der Strecke
Erforderliche Endlagerfläche für Gebinde (m ²)	800.800	1.632.600	4.871.000	2.212.700
Erforderlicher Sicherheitsabstand (m)	50	50	40	100
Erforderliche Endlagerfläche aus Sicherheitsabstand (m ²)	228.000	401.200	1.082.000	1.026.000
Erforderliche Fläche für Infrastrukturbereich (m ²)	250.000	250.000	630.000	320.000
Gesamtendlagerfläche (m²)	1.278.800	2.283.800	6.583.000	3.558.700

Der Flächenbedarf für den "kalten" Bereich des Endlagers, das sind die äußeren Umfahrungen (Flächen aus Sicherheitsabständen), und die Infrastrukturräume wird im Wesentlichen durch die erforderliche Pfeilerbreite und die Sicherheitsabstände zu thermisch empfindlichen geologischen Einheiten oder zu klüftigen und potenziell lösungsführenden Gesteinen und Nebengesteinen bestimmt. Für das Wirtsgestein Granit und Steinsalz werden vergleichbare Werte ermittelt, für das Wirtsgestein Tonstein wurde dafür ein deutlich größerer Flächenbedarf berechnet, der nahezu proportional mit der erforderlichen Pfeilerbreite (5-fache Streckenbreite) anwächst.

Für den "heißen" Bereich des Endlagers, das sind die Einlagerungsfelder für die Endlagergebäude, wird zunächst der Einfluss der Auslegungstemperatur betrachtet. Die Gebirgstem-

peratur beträgt in der angenommenen Teufe von 600 m rund 27°C. Das bedeutet, dass bei einer Auslegungstemperatur von 100°C die nutzbare Temperaturdifferenz 63 K beträgt, bei einer Auslegungstemperatur von 200°C jedoch 163 K. Damit steht eine im Vergleich um den Faktor von ca. 2,6 größere aufnehmbare Temperaturdifferenz zur Verfügung. Dieser Effekt spiegelt sich in dem unterschiedlichen Flächenbedarf für die beiden Einlagerungsvarianten im Wirtsgestein Salz wider, wobei die höhere Wärmeleitfähigkeit des Salzes in der Endlagervariante Salz 100° C diesen Effekt teilweise ausgleicht.

Bei gleicher Auslegungstemperatur ergibt sich der Unterschied im Flächenbedarf für die drei Endlagervarianten aus dem Einfluss der unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeit des Wirtsgesteins und des gewählten Versatzmaterials. So muss bei der Endlagervariante Granit mit 100°C Auslegungstemperatur die Pufferschicht von 0,35 m Bentonit mit der entsprechend reduzierten Wärmeleitfähigkeit dieses Materials um die einzelnen Gebinde mit berücksichtigt werden. Zusätzlich muss der Einfluss der erforderlichen Pfeilerbreiten mit beachtet werden. Dieser Effekt zeigt sich insbesondere bei Tonstein. Tonstein kann lokal nur einen geringen Wärmefluss übertragen. Daher sind für Tonstein Gebinde mit einer geringen Beladung optimal.

Zusammenfassend wird empfohlen, als Planungsgröße im Rahmen des Standortauswahlverfahrens die folgenden Gesamtendlagerflächen anzusetzen:

Endlagervariante Salz;	200°C Auslegungstemperatur: 1,28 km ²
Endlagervariante Salz;	100°C Auslegungstemperatur: 2,28 km ²
Endlagervariante Ton;	100°C Auslegungstemperatur: 6,58 km ²
Endlagervariante Granit;	100°C Auslegungstemperatur: 3,56 km ²

Abschließend wird noch darauf hingewiesen, dass die berechneten Gesamtendlagerflächen für die in allen Wirtsgesteinen angenommene gleiche Teufe von 600 m nicht linear auf andere Teufen eines Endlagerbergwerkes extrapoliert werden können. Dazu bedarf es gesonderter Planungen und thermischer Auslegungsberechnungen. In diesem Zusammenhang ist dann auch die Frage nach einer maximalen Endlagerteufe zu bewerten. Mit zunehmender Teufe steigen sowohl die natürliche vorhandene Gebirgstemperatur als auch der Druck durch die Auflast des Gebirges. Das führt insbesondere bei der Auslegungstemperatur von 100°C zu einem Anstieg des Flächenbedarfs. Und unabhängig von der Auslegungstemperatur führt eine Vergrößerung der Teufe zu einem bergbaulich erhöhten Aufwand zur Sicherung der Gebirgsstabilität.

5 Literatur

- /AktGor 1998/ DBE: Aktualisierung Gorleben. Peine: DBE, 1998.
- /AtG 2011/ Gesetz über die friedliche Verwendung der Kernenergie und den Schutz gegen ihre Gefahren (Atomgesetz - AtG) vom 23. Dezember 1959 (BGBl. I S. 814) in der Fassung der Bekanntmachung vom 15. Juli 1985 (BGBl. I S. 1565) (BGBl. III S. 751-1), zuletzt geändert durch Artikel 1 des Gesetzes vom 31. Juli 2011 (BGBl. I S. 1704).
- /Ansicht 2015/ Jahn, S.; Mrugalla, S.; Stark, L.: Endlagerstandortmodell Süd, Teil 2, Zusammenstellung von Gesteinseigenschaften für den Langzeitsicherheitsnachweis. Ergebnisbericht zum F&E-Vorhaben ANSICHT. Hannover: BGR, 2015.
- /BAMBUS 2004/ Bechthold, W., Smailos, E., Heusermann, S., Bollingerfehr, W., Bazargan Sabet, B., Rothfuchs, T., Kamlot, P., Grupa, J., Olivella, S., Hansen, F.D.: Backfilling and Sealing of Underground Repositories for Radioactive Waste in Salt (BAMBUS-II Project). EUR 20621 EN, European Commission, Nuclear Science and Technology: Luxembourg, 2004.
- /BMUB 2015/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, Programm für eine verantwortungsvolle und sichere Entsorgung bestrahlter Brennelemente und radioaktiver Abfälle (Nationales Entsorgungsprogramm, NaPro), August 2015
- /DEAB 1995/ Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe mbH (DBE), Direkte Endlagerung ausgedienter Brennelemente (DEAB), Handhabungsversuche zur Streckenlagerung, Abschlussbericht Hauptband, September 1995
- /DENKMAL 2010/ DBE TECHNOLOGY GmbH, Optimization of the Direct Disposal concept by Emplacing SF Canisters in Boreholes, Final Report, June 2010
- /DIREGT 2016/ DIREGT – Direkte Endlagerung von Transport- und Lagerbehältern bis 160 Mg (in Vorbereitung zur Veröffentlichung).
- /DIREGT I/ DIREGT – Direkte Endlagerung von Transport- und Lagerbehältern bis 160 Mg – Phase I (unveröffentlicht).
- /ERATO 2010/ DBE-TEC: Referenzkonzept für ein Endlager für radioaktive Abfälle in Tonstein - ERATO. Abschlussbericht. Peine: DBE TECHNOLOGY GmbH, 2010.

- /GAIYA 2012/ Jassionnesse, C. (GAIYA), Dossier d'esquisse – Description des principes de réalisation des liaisons surface-fond et fond, 22.12.2012 (unveröffentlicht, persönliche Mitteilung)
- /Genesis 2007/ DBE-TEC: Untersuchungen zur sicherheitstechnischen Auslegung eines generischen Endlagers im Tonstein in Deutschland - GENESIS. Abschlussbericht. Peine: DBE TECHNOLOGY, 2007.
- /ITASCA 2013/ Itasca Consulting Group Inc.: FLAC3D (Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions), Ver. 5.01 User's Manual. Minneapolis: Itasca, 2013.
- /Mehlhorn 1996/ Mehlhorn, G.: Der Ingenieurbau – Grundwissen, Teil 4, Werkstoffe, Elastizitätstheorie, S. 165-428, Ernst & Sohn, Berlin, 1996
- /MontTerri 2009/ Bock, H.: RA Experiment: Updated Review of the Rock Mechanics Properties of the Opalinus Clay of the Mont Terri URL based on Laboratory and Field Testing. – Mont Terri Project, Technical Report TR 2008-04. Wabern/Schweiz: 2009.
- /NAGRA 1994/ Kristallin I Safety Assessment Report, NAGRA Technischer Bericht 93-22, Wettingen, Schweiz, 1994
- /NAGRA 2002/ Project Opalinus Clay, Safety Report, Demonstration of Disposal Feasibility for Spent Fuel, Vitrified High-Level Waste and Longlived Intermediate-level Waste (Entsorgungsnachweis), Technical Report 02-05, Wettingen, Schweiz, 2002
- /Martin 2000/ Martin, C. D. et al.: The Strength of hard-rock pillars. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 37, 14.04.2000
- /Rautioaho 2009/ Rautioaho, E.; Korkiala-Tanttu, L.: Bentomap: Survey of bentonite and tunnel backfill knowledge, State-of-the-art. VTT, Finland, 2009.
- /SKB 2009/ SKB: Underground design Forsmark, Layout D2, Svensk Kärnbränslehantering AB, R-08-116, July 2009.
- /SKB 2010/ SKB: Design, production and initial state of the buffer. Technical Report TR-10-15. Svensk Kärnbränslehantering AB, Sweden 2010.
- /SRSA 2015/ Stephanson, O.; Gipper, P: Technical Note 2015:01, Rock Mechanics – Thermal properties and thermal modelling of the rock in a repository of spent nuclear fuel at Forsmark, Main review phase. Swedish Radiation Safety Authority, Report Number 2015:01 ISSN: 2000-0456.

- /StandAG 2013/ Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle (Standortauswahlgesetz - StandAG). – Bundesgesetzblatt , Teil I, Nr. 41 vom 23. Juli 2013: 2553-2564.
- /VSG AP3 2011/ GRS; ISTec; nse: Abfallspezifikation und Mengengerüst - Basis Ausstieg aus der Kernenergienutzung (Juli 2011). Bericht zum Arbeitspaket 3 - Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. GRS – 278. Köln: GRS, 2011.
- /VSG AP5 2011/ DBE-TEC: Endlagerkonzepte. Bericht zum Arbeitspaket 5 - Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. GRS – 272. Köln: GRS, 2011.
- /VSG AP6 2012/ DBE-TEC; GRS; nse: Endlagerauslegung und -optimierung. Bericht zum Arbeitspaket 6 - Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort. . GRS – 281. Köln: GRS, 2012.

6 Abbildungsverzeichnis

	Blatt
Abbildung 2.1: Zeitlicher Anfall und Einlagerung der Endlagergebündeströme, Salz 200	14
Abbildung 2.2: Zwischenlagerzeit der Endlagergebündeströme mit stark wärmeentwickelndem Abfall und ausgedienten Brennelementen, Salz 200	15
Abbildung 2.3: Wärmeleistung einzelner Brennelemente aus Leistungsreaktoren (DWR, SWR und WWER) sowie einer einzelnen Kokille mit verglastem Abfall (CSD-V) in Abhängigkeit von der Zeit	17
Abbildung 2.4: Wärmeleistung eines CASTOR MTR2 in Abhängigkeit von der Zeit, beladen mit Brennelementen des Forschungsreaktors FRM-II sowie BER-II	18
Abbildung 2.5: Wärmeleistung unterschiedlicher TLB beladen mit Brennelementen aus Forschungs- und Prototypreaktoren in Abhängigkeit von der Zeit	18
Abbildung 2.6: Approximation des DWR-UO ₂ -ReferenzBrennelementes /VSG AP3 2011/ durch ein Pseudospektrum von fünf Nukliden	19
Abbildung 3.1: Einlagerungsschema von TLB in horizontalen Kurzbohrlöchern, Salz 200	24
Abbildung 3.2: Wärmeleistung eines CASTOR [®] V/19 sowie eines CASTOR [®] V/52 bei Beladung mit UO ₂ - bzw. MOX-Brennelementen sowie bei Mischbeladung in Abhängigkeit von der Zeit, Salz 200	26
Abbildung 3.3: Wärmeleistung der wesentlichen auslegungsrelevanten Behälter mit stark wärmeentwickelndem Abfall in Abhängigkeit von der Zeit, Salz 200	28
Abbildung 3.4: Wärmeleitfähigkeit von Salzgrus in Abhängigkeit von Porosität und Temperatur	30
Abbildung 3.5: Berechnungsmodell Salz 200	31
Abbildung 3.6: Entwicklung der Maximaltemperatur an der Behälteroberfläche bei Einlagerung eines Einzelbehälters und der eines Behälters in einem Einlagerungsfeld, DWR-mix 17/2, Salz 200	32
Abbildung 3.7. Maximaltemperatur bei unterschiedlichem Bohrloch- und Behälterabstand, DWR-mix 17/2, Salz 200	33
Abbildung 3.8: Behälterabstand und spezifischer Flächenbedarf in Abhängigkeit des Bohrlochabstandes bei Ausschöpfung der Auslegungstemperatur von 200°C auf der Behälteroberfläche, DWR-mix 17/2, Salz 200	34
Abbildung 3.9: Endlagergebündestrom 2: Anordnung der Endlagergebünde (TLB) in horizontalen Kurzbohrlöchern; Draufsicht auf das Einlagerungsfeld	36

Abbildung 3.10: Einlagerungsschema von Endlagergebinden in Einlagerungsstrecken, Salz 100	38
Abbildung 3.11: Wärmeleistung der UO ₂ - bzw. MOX-Brennelemente sowie eines mix-Brennelemente aus Reaktoren westlicher Bauart in Abhängigkeit von der Zeit	41
Abbildung 3.12: Wärmeleistung eines DWR-mix 89/11-Brennelementes im Vergleich zu den äquivalenten Brennelementen SWRäq-mix 92/8 und WWERäq KGR	41
Abbildung 3.13: Wärmeleistung der wesentlichen auslegungsrelevanten Behälter mit stark wärmeentwickelndem Abfall in Abhängigkeit von der Zeit, Salz 100	43
Abbildung 3.14: Berechnungsmodell Salz 100	45
Abbildung 3.15: Entwicklung der Maximaltemperatur an der Behälteroberfläche bei Einlagerung eines Einzelbehälters und Behältern in einem Einlagerungsfeld, POLLUX [®] 5 DWR-mix 89/11, Salz 100	47
Abbildung 3.16: Maximaltemperatur bei unterschiedlicher Beladung und Streckenabständen von 15,3 m, 20 m und 25 m in Abhängigkeit des Behälterabstands (a.) Temperaturmaximum T1, (b.) Temperaturmaximum T2, POLLUX [®] 5, 6 und 7 DWR-mix 89/11, Salz 100	47
Abbildung 3.17: Behälterabstand und spezifischer Flächenbedarf in Abhängigkeit des Streckenabstandes bei Ausschöpfung der Auslegungstemperatur von 100°C auf der Behälteroberfläche, DWR-mix 89/11, Salz 100	48
Abbildung 3.18: Maximaltemperatur bei unterschiedlichem Behälterabstand für 20 m Streckenabstand, POLLUX [®] 5 CSD-V und POLLUX [®] 6 CSD-V, Salz 100	49
Abbildung 3.19: Endlagergebindeströme 1 und 2: Auslegung eines einzelnen Einlagerungsfeldes; Draufsicht auf Einlagerungsstrecken und Endlagergebände	51
Abbildung 3.20: Einlagerungsschema von Endlagergebinden in Einlagerungsstrecken, Endlagervariante Ton 100	53
Abbildung 3.21: Wärmeleistung der wesentlichen auslegungsrelevanten Behälter mit stark wärmeentwickelndem Abfall in Abhängigkeit von der Zeit, Ton 100	56
Abbildung 3.22: Berechnungsmodell Ton 100	59
Abbildung 3.23: Entwicklung der Maximaltemperatur an der Behälteroberfläche bei Einlagerung eines Einzelbehälters und Behältern in einem Einlagerungsfeld, POLLUX [®] 2,5 DWR-mix 89/11, Ton 100	60

Abbildung 3.24. Maximaltemperatur unterschiedlich beladener Endlagergebände in Abhängigkeit (a) des Behälterabstandes und (b) des Spezifischen Flächenbedarfs, POLLUX® mit DWR-mix 89/11, Ton 100	61
Abbildung 3.25: Behälterabstand und spezifischer Flächenbedarf in Abhängigkeit des Streckenabstandes bei Ausschöpfung der Auslegungstemperatur von 100°C auf der Behälteroberfläche, DWR-mix 89/11, Ton 100	62
Abbildung 3.26: Einlagerungsschema von Endlagergebänden in vertikalen Kurzbohrlöchern, Granit 100	66
Abbildung 3.27: Wärmeleistung der wesentlichen auslegungsrelevanten Behälter mit stark wärmeentwickelndem Abfall in Abhängigkeit von der Zeit, Granit 100	70
Abbildung 3.28: Berechnungsmodell Granit 100	72
Abbildung 3.29: Entwicklung der Maximaltemperatur an der Behälteroberfläche bei Einlagerung eines Einzelbehälters und Behältern in einem Einlagerungsfeld, BSK-Cu 1,6 DWR-mix 89/11 - Granit 100	74
Abbildung 3.30. Maximaltemperatur unterschiedlich beladener Endlagergebände in Abhängigkeit (a) des Behälterabstandes und (b) des spezifischen Flächenbedarfs, BSK-Cu mit DWR-mix 89/11, Granit 100	75
Abbildung 3.31: Behälterabstand und spezifischer Flächenbedarf in Abhängigkeit des Streckenabstandes bei Ausschöpfung der Auslegungstemperatur von 100°C auf der Behälteroberfläche, DWR-mix 89/11, Granit 100	76
Abbildung 3.32: Feld Endlagergebändeströme 2.1 bis 2.4	78

7 Tabellenverzeichnis

	Blatt
Tabelle 0-1: Gesamtendlagerflächenbedarf	6
Tabelle 1-1: Endlagervarianten	8
Tabelle 1-2: Abfallmengengerüst nach NaPro und VSG für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle und ausgediente Brennelemente	10
Tabelle 2-1: Anfall der Brennelemente und Kokillen (Stück) in Abhängigkeit von der Zeit sowie Zwischenlagerzeit bezogen auf eine Inbetriebnahme des Endlagers im Jahr 2050	13
Tabelle 2-2: Spezifikation der berücksichtigten Brennelemente /VSG AP3 2011/	16
Tabelle 3-1: Gebindetyp und Einlagerungsform der Endlagergebinderströme, Salz 200	25
Tabelle 3-2: Behälterabmessungen, Salz 200	25
Tabelle 3-3: Mindestabstände zwischen stark wärmeentwickelnden Behältern, Salz 200	26
Tabelle 3-4: Endlagergebindetypen, ihre Beladung und die dadurch abgedeckten Varianten in den Auslegungsberechnungen der Endlagervariante Salz 200	27
Tabelle 3-5: Behälteranzahl, Anteil am gesamten Behälteraufkommen und Zwischenlagerzeiten, Salz 200	29
Tabelle 3-6: Dichte und Parameter des thermischen Materialverhaltens, Salz 200	29
Tabelle 3-7: Rechnerische Abstände der Behälter mit stark wärmeentwickelndem Abfall, Salz 200	34
Tabelle 3-8: Anzahl der Behälter pro Endlagergebinderstrom, Salz 200	35
Tabelle 3-9: Flächenbedarf für Endlagervariante Salz 200	37
Tabelle 3-10: Gebindetyp und Einlagerungsform der Endlagergebinderströme, Salz 100	39
Tabelle 3-11: Behälterabmessungen, Salz 100	39
Tabelle 3-12: Mindestabstände zwischen stark wärmeentwickelnden Behältern, Salz 100	40
Tabelle 3-13: Endlagergebindetypen, ihre Beladung und die dadurch abgedeckten Varianten in den Auslegungsberechnungen der Endlagervariante Salz 100	42
Tabelle 3-14: Behälteranzahl, Anteil am gesamten Behälteraufkommen und Zwischenlagerzeiten, Salz 100	43
Tabelle 3-15: Dichte und Parameter des thermischen Materialverhaltens, Salz 100	44

Tabelle 3-16:	Rechnerische Abstände der Behälter mit stark wärmeentwickelndem Abfall, Salz 100	50
Tabelle 3-17:	Anzahl der Gebinde für den Eindlagergebindestrom: Salz 100	50
Tabelle 3-18:	Flächenbedarf für Endlagervariante Salz 100	52
Tabelle 3-19:	Gebindetyp und Einlagerungsform der Endlagergebindestrome, Ton 100	54
Tabelle 3-20:	Behälterabmessungen, Ton 100	54
Tabelle 3-21:	Mindestabstände zwischen stark wärmeentwickelnden Behältern, Ton 100	55
Tabelle 3-22:	Endlagergebindetypen, ihre Beladung und die dadurch abgedeckten Varianten in den Auslegungsberechnungen der Endlagervariante Ton 100	55
Tabelle 3-23:	Behälteranzahl, Anteil am gesamten Behälteraufkommen und Zwischenlagerzeiten, Ton 100	57
Tabelle 3-24:	Dichte und Parameter des thermischen Materialverhaltens, Ton 100	58
Tabelle 3-25:	Rechnerische Abstände der Behälter mit stark wärmeentwickelndem Abfall, Salz 100	63
Tabelle 3-26:	Anzahl der Gebinde für den Endlagergebindestrom: Salz 100	63
Tabelle 3-27:	Flächenbedarf für Endlagervariante Ton 100	65
Tabelle 3-28:	Gebindetyp und Einlagerungsform der Endlagergebindestrome, Ton 100	67
Tabelle 3-29:	Behälterabmessungen, Granit 100	68
Tabelle 3-30:	Mindestabstände zwischen stark wärmeentwickelnden Behältern, Granit 100	68
Tabelle 3-31:	Endlagergebindetypen, ihre Beladung und die dadurch abgedeckten Varianten in den Auslegungsberechnungen der Endlagervariante Granit 100	69
Tabelle 3-32:	Behälteranzahl, Anteil am gesamten Behälteraufkommen und Zwischenlagerzeiten, Granit 100	71
Tabelle 3-33:	Dichte und Parameter des thermischen Materialverhaltens, Granit 100	71
Tabelle 3-34:	Rechnerische Abstände der Behälter mit stark wärmeentwickelndem Abfall, Granit 100	76
Tabelle 3-35:	Anzahl der Gebinde für den Eindlagergebindestrom: Granit 100	77
Tabelle 3-36:	Flächenbedarf für Endlagervariante Granit 100	79
Tabelle 4-1:	Gesamtendlagerflächenbedarf	80

8 Abkürzungsverzeichnis

a	Jahr
AtG	Atomgesetz
AVR	Arbeitsgemeinschaft Versuchsreaktor
BE	Brennelement
BER II	Berliner Experimentierreaktor II
CSD-B	Colis standard des déchets boues
CSD-C	Colis des déchets compactés
CSD-V	Colis des déchets vitrifiés (HAW-Kokille)
DWR	Druckwasserreaktor
EB	Einzelbehälter
EZ	Elementarzelle
FRM II	Forschungsreaktor München II
FuE	Forschung und Entwicklung
GNS	Gesellschaft für Nuklear-Servide
GOK	Geländeoberkante
HTR	Hochtemperaturreaktor
J/kg/K	Joule pro Kilogramm pro Kelvin(Einheit der Wärmekapazität)
K	Kelvin
KGR	Kernkraftwerk Greifswald
kg/m ³	Kilogramm pro Quadratmeter(Einheit der Dichte)
KKR	Kernkraftwerk Rheinsberg
km ²	Quadratkilometer
KNK	Kompakte Natriumgekühlte Kernreaktoranlage
m	Meter
m ²	Quadratmeter
m ² /BE	Quadratmeter pro Brennelement
MOX	Mischoxid
Posiva	Posiva Oy
SKB	Svensk Kärnbränslehantering AB
SWR	Siedewasserreaktor
t	Tonne
THTR	Thorium-Hochtemperaturreaktor

TLB	Transport- und Lagerbehälter
UO ₂	Uranoxid
VEK	Verglasungseinrichtung des Forschungszentrums Karlsruhe
VSG	Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben
W/kg/K	Watt pro Kilogramm pro Kelvin(Einheit der Wärmeleitfähigkeit)
WWER	Druckwasserreaktor russische Bauart

9 Anlagenverzeichnis

Anlage 1: Beauftragung

Anlage 2: Eckpunkte zur Angebotseinholung

Anlage 3: Exposé

Anlage 1: Beauftragung



DBE TECHNOLOGY GmbH
Herrn Dr. Jürgen Krone
Eschenstraße 55
31224 Peine

Berlin, 14. Dezember 2015
Geschäftszeichen:
ZT 6-1133-2015-426-15-GStandAG
Anlagen: 1 (2-fach)

Referat ZT 6
Vergaben

bearbeitet von:
Bettina Poock
Platz der Republik 1
11011 Berlin
Telefon: +49 30 227-32948
Telefon: +49 30 227-33884
Fax: +49 30 227-36603
vorzimmer.zt6@bundestag.de
bettina.poock@bundestag.de

Dienstgebäude:
Luisenstraße 32 – 34
10117 Berlin

**Erstellung eines Gutachtens zum Thema „Flächenbedarf für ein
Endlager für wärmeentwickelnde, hoch radioaktive Abfälle“**

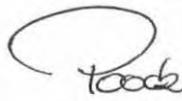
Sehr geehrte Herr Dr. Krone,

vielen Dank für Ihr Angebot vom 5. November 2015.

Anbei übersende ich Ihnen den o. g. Vertrag in 2-facher
Ausfertigung mit der Bitte, mir ein unterzeichnetes Exemplar
zurückzusenden.

Mit freundlichen Grüßen

im Auftrag



Poock

Anlage 2: Eckpunkte zur Angebotseinholung

Gutachten: „Flächenbedarf für ein Endlager für wärmeentwickelnde, hoch radioaktive Abfälle“

Eckpunkte zur Angebotseinholung

I. Vorbemerkungen

Im Mai 2014 hat die nach dem Standortauswahlgesetz (StandAG) vorgesehene „Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe“ ihre Arbeit aufgenommen; bis zum 30. Juni 2016 hat die Kommission ihren Abschlussbericht vorzulegen. Wesentliche Teile dieses Berichtes werden als Entwurf von den Arbeitsgruppen geschrieben.

Die Arbeitsgruppe 3 (AG 3) „Gesellschaftliche und technisch-wissenschaftliche Entscheidungskriterien sowie Kriterien für Fehlerkorrekturen“, wird einen wesentlichen Teil zum Bericht beisteuern, der insbesondere die Aufgabenstellung der Kommission gemäß § 4 Abs. 2 Nr. 1 bis 4 StandAG einschließlich eventueller Vorfragen (z.B. betreffend die Entsorgungsoptionen) abdeckt.

II. Auftragsgegenstand

Gegenstand des Auftrags ist die Erstellung eines Gutachtens, in dem berechnet wird, welche Flächen erforderlich sind, um den in Deutschland angefallenen wärmeentwickelnden Abfall in einem Endlager unterzubringen. Die wesentliche limitierende Größe ist dabei die an der Kontaktfläche Endlagerbehälter/Wirtsgestein bzw. Endlagerbehälter/Bentonit auftretende maximale Temperatur.

Der Berechnung sind folgende Eingangsparameter zu Grunde zu legen:

- Die wärmeentwickelnden Abfälle gemäß Nationalem Entsorgungsprogramm (ca. 1.100 Behälter aus Leistungsreaktoren, ca. 291 Behälter mit Abfällen aus der Wiederaufarbeitung, 461 Behälter aus den Versuchs- und Demonstrationsreaktoren, 18 Behälter aus den Forschungsreaktoren; zusätzlich ca. 35 Behälter aus den laufenden Forschungsreaktoren).
- Für die Einlagerung in das Endlager ist die Zeitperiode von 2050 bis 2080 zugrunde zu legen. In dieser Periode werden die Behälter über die Jahre gleichverteilt eingelagert.
- Die anfallende Nachzerfallswärme ist für die einzelnen Behälter in einer modellhaften Verteilung zu bestimmen, die die Realität für die Fragestellung hinreichend genau abbildet (reale Abklingzeiten, Berücksichtigung besonderer Effekte, die zu besonders hoher oder niedriger Nachzerfallswärme in bestimmten Gruppen von Behältern führen, z.B. MOX-Brennelemente oder HTR-Brennelemente).

-
- Als Behälter können modellhaft zylindrische metallische Behälter jeweils mit dem Inventar eines derzeit üblichen Zwischenlagerbehälters zugrunde gelegt werden.
 - Bei der geometrischen Verteilung ist in Salz und Tonstein von einer einlagigen Lagerung in Strecken auszugehen, in Granit von einer Anordnung gemäß dem in Schweden vorgesehenen Konzept für die Endlagerung hochaktiver Abfälle.
 - Die Berechnung muss für die Wirtsgesteine Tonstein, Granit und Salz erfolgen. Bei Tonstein und Granit ist von einer zulässigen maximalen Temperatur an der Kontaktfläche Endlagerbehälter/Wirtsgestein bzw. Endlagerbehälter/Bentonit von 100° C auszugehen, beim Wirtsgestein Salz sind zwei Alternativen zu rechnen mit 100° C bzw. 200° C an der Kontaktfläche.

III. Rahmenbedingungen

1. Form

Das Gutachten ist sowohl in maschinenschriftlicher Form, frei von Schreibfehlern und einwandfrei lesbar, in einfacher Ausfertigung als auch je einmal in elektronischer Version als MS-Office Word-Dokument und als PDF-Datei per E-Mail abzuliefern.

Dem Gutachten ist eine Gliederung/Inhaltsübersicht sowie eine möglichst knappe Zusammenfassung der wesentlichen Ergebnisse („Executive Summary“) voranzustellen.

2. Umfang

Das Gutachten soll bezüglich Vollständigkeit und Tiefe der Aufgabenstellung gerecht werden.

3. Zeitplan

Das Gutachten ist spätestens zwei Monate nach Auftragserteilung vorzulegen.

4. Abstimmungsbedarf / Sitzungsteilnahme

Wegen der Einzelheiten des Gutachtens können eventuell Abstimmungen mit den Vorsitzenden der AG 3 erforderlich werden. Darüber hinaus kann eine Teilnahme an einer Kommissions- oder Arbeitsgruppensitzung zur Vorstellung und Erörterung des Gutachtens notwendig werden.

5. Öffentlichkeit

Das Gutachten wird gemäß den Vorgaben des Standortauswahlgesetzes im Internet veröffentlicht. Soweit das Gutachten in der Arbeitsgruppe oder der Kommission erörtert wird, erfolgt dies in öffentlicher Sitzung; von der Sitzung wird ein Wortprotokoll erstellt, welches nachfolgend im Internet veröffentlicht wird. Von den öffentlichen Sitzungen wird zudem eine Ton- (Arbeitsgruppe) oder Videoaufzeichnung (Kommission) gefertigt und im Internet veröffentlicht.

6. Unterauftragnehmer / Bietergemeinschaften

Die Einbeziehung von Unterauftragnehmern sowie die Bildung von Bietergemeinschaften sind ausgeschlossen.

IV. Angebotspreis und Auswahl des Auftragnehmers

Das Angebot hat eine **pauschalierte Preisvorstellung (Nettobetrag)** zu enthalten, die alle eventuell anfallenden Nebenkosten (z.B. Reisekosten, Porti, etc.) einschließt.

Der Angebotspreis sollte den Betrag von 50.000 € netto nicht übersteigen.

Mit dem Angebot hat der Bieter ein Exposé einzureichen, das eine Bewertung nach den im Folgenden dargestellten Auswahlkriterien ermöglicht.

Die Auswahl des wirtschaftlichsten Angebots erfolgt nach folgenden Auswahlkriterien:

- Vollständigkeit und Tiefe der Behandlung
- Klare, übersichtliche Strukturierung

Um das unter Berücksichtigung aller Aspekte wirtschaftlichste Angebot zu ermitteln, werden die vorgenannten qualitativen Aspekte in Bezug zu der Preisvorstellung gesetzt. Dabei wird den qualitativen Gesichtspunkten gegenüber den finanziellen Aspekten ein Vorrang eingeräumt.

Nach Eingang der Angebote mit Exposés wird die Geschäftsstelle der Kommission einen an Hand der oben benannten Kriterien begründeten Vergabevorschlag unterbreiten. Die endgültige Entscheidung über die Auswahl des zu beauftragenden Auftragnehmers kommt der Kommission zu. Nach dieser Entscheidung wird der Abschluss eines Vertrages mit dem Auftragnehmer herbeigeführt.

Anlage 3: Exposé

**Exposé
zum
Gutachten:**

**Flächenbedarf für ein Endlager
für wärmeentwickelnde,
hoch radioaktive Abfälle**

Inhaltsverzeichnis

1	Ausgangspunkt	3
2	Auftrag und Zielstellung des Gutachtens	3
3	Grobgliederung des Gutachtens "Flächenbedarf für ein Endlager für wärmeentwickelnde, hoch radioaktive Abfälle"	3
3.1	Zusammenfassung der wesentlichen Ergebnisse des Gutachtens (Extended Summary)	3
3.2	Auftrag und Zielstellung des Gutachtens	3
3.3	Planungsgrundlagen und Eingangsparameter	3
3.4	Arbeitsprogramm: Berechnung erforderlicher Endlagerflächen	5
3.4.1	Aufgabe 1: Berechnung bzw. Ermittlung der Nachzerfallswärme	6
3.4.2	Aufgabe 2: Berechnung des erforderlichen Endlagerflächenbedarfs	6
3.4.3	Vergleichende Gegenüberstellung der Ergebnisse	9
4	Referenzen	10

1 Ausgangspunkt

Die nach dem Standortauswahlgesetz (StandAG) vorgesehene "Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe" soll bis zum 30.6.2016 ihren Abschlussbericht vorlegen. Wesentliche Teile des Berichtes werden als Entwurf von den Arbeitsgruppen geschrieben. Die Arbeitsgruppe 3 (AG3) "Gesellschaftliche und technisch-wissenschaftliche Entscheidungskriterien sowie Kriterien für Fehlerkorrekturen" beschäftigt sich u.a. mit Entsorgungsoptionen und auch mit den Grundlagen für einen möglichen Vergleich von Endlagerkonzepten in verschiedenen Wirtsgesteinen. In diesem Zusammenhang stellt sich auch die Frage nach dem Flächenbedarf für ein Endlager.

2 Auftrag und Zielstellung des Gutachtens

In der Angebotsanfrage zum Gutachten wird folgendes Ziel formuliert: "Gegenstand des Auftrages ist die Erstellung eines Gutachtens, in dem berechnet wird, welche Flächen erforderlich sind, um in Deutschland angefallenen wärmeentwickelnden Abfall in einem Endlager unterzubringen. Die wesentliche limitierende Größe ist dabei die an der Kontaktfläche Endlagerbehälter/Wirtsgestein bzw. Endlagerbehälter/Bentonit auftretende maximale Temperatur."

3 Grobgliederung des Gutachtens "Flächenbedarf für ein Endlager für wärmeentwickelnde, hoch radioaktive Abfälle"

Für die vorgenannte Aufgabenstellung wurde die nachfolgend im Detail beschriebene Grobstruktur des Gutachtens entworfen, die auch das Verständnis der angefragten Aufgabenstellung widerspiegelt. Die Grobgliederung des Gutachtens umfasst eine Zusammenfassung der wesentlichen Ergebnisse des Gutachtens (Extended Summary), Auftrag und Zielsetzung des Gutachtens, Planungsgrundlagen/Eingangsparameter und die Berechnungen zum Flächenbedarf des Endlagers sowie ein Literaturverzeichnis zum Aufzeigen der verwendeten Quellen.

3.1 Zusammenfassung der wesentlichen Ergebnisse des Gutachtens (Extended Summary)

3.2 Auftrag und Zielstellung des Gutachtens

3.3 Planungsgrundlagen und Eingangsparameter

Den Berechnungen werden gemäß Anfrage die im Folgenden aufgeführten Planungsgrundlagen und Eingangsparameter zugrunde gelegt:

- Die Art und Menge der wärmeentwickelnden Abfälle wird wunschgemäß dem "Nationalem Entsorgungsprogramm" (NaPro) entnommen. Tabelle 1 zeigt die relevanten Fakten, er-

gänzt um die Benennung von möglichen Transport- und Zwischenlagerbehältern, so wie diese in der vorläufigen Sicherheitsanalyse Gorleben (VSG) gewählt wurden.

Abfallart		Endlagerbehälter	
		Bezeichnung	Anzahl
Ausgediente Brennelemente	DWR	CASTOR® V/19	736
	SWR	CASTOR® V/52	300
	WWER-DWR	CASTOR® 440/84	61
Summe aus Leistungsreaktoren		-	1097 ^{*)} (~ 1100)
CSD-V	AREVA NC (F)	CASTOR® HAW 20/28 CG CASTOR® HAW 28M TN 85 TS 28 V	108
	Sellafield Ltd. (UK) (UK-HAW)	CASTOR® HAW 28M	21
	VEK (D) (HAW-WAK)	CASTOR® HAW 20/28 CG	5
	AREVA NC (F)	CASTOR® HAW 28M	5
CSD-B	AREVA NC (F)	TGC36	152
CSD-C	AREVA NC (F)	-	291
Summe Wiederaufarbeitungsabfälle			152
Ausgediente Brennelemente aus Versuchs- und Prototyp-KKW's und Forschungsreaktoren	AVR	CASTOR® THTR/AVR	305
	THTR		4
	KNK II	CASTOR® KNK	30
	Otto-Hahn		20
	FRM II	CASTOR® MTR 2	50 (53 ^{**})
	BER II		511 (514 ^{**})
Summe		-	

^{*)} Quelle VSG

^{**}) Anfrage zum Gutachten

Tabelle 1: Abfallmengengerüst nach NaPro und VSG

- Es wird eine gleichmäßige und kontinuierliche Einlagerung der Behälter im Zeitraum von 2050 bis 2080 (30 Jahre Einlagerungsdauer) zugrunde gelegt.
- Es werden die Wirtsgesteine
 - Salz mit einer maximalen Temperatur an der Kontaktfläche Endlagerbehälter/Wirtsgestein von 200 °C,
 - Salz mit einer maximalen Temperatur an der Kontaktfläche Endlagerbehälter/Wirtsgestein von 100 °C,
 - Tonstein mit einer maximalen Temperatur an der Kontaktfläche Endlagerbehälter/Bentonit von 100 °C,
 - Granit mit einer maximalen Temperatur an der Kontaktfläche Endlagerbehälter/Bentonit von 100 °C,

zugrunde gelegt.

- Für die Wirtsgesteine Salz und Ton wird als Einlagerungskonzept die einsöhlige Streckenlagerung vorgesehen. Für das Wirtsgestein Granit wird das schwedische Referenz-Einlagerungskonzept (KBS 3V) vorgesehen, in dem ein Behälter pro vertikales Kurzbohrloch eingelagert werden soll.
- Die anfallende Nachzerfallswärme ist für die einzelnen Behälter in einer modellhaften Verteilung zu bestimmen, die die Realität für die Fragestellung hinreichend genau abbildet (reale Abklingzeiten, Berücksichtigung besonderer Effekte, die zu besonders hoher oder niedriger Nachzerfallswärme in bestimmten Gruppen von Behältern führen, z.B. MOX-Brennelemente oder HTR-Brennelemente).
- Als Behälter werden modellhaft zylindrische, metallische Behälter jeweils mit dem Inventar eines derzeit üblichen Zwischenlagerbehälters zugrunde gelegt.

3.4 Arbeitsprogramm: Berechnung erforderlicher Endlagerflächen

In einem ersten Schritt (nachfolgend Aufgabe 1) wird für die modellhaft zylindrischen, metallischen Behälter für wärmeentwickelnde, hoch radioaktive Abfälle die Nachzerfallswärme ermittelt. Iterativ wird aus der Ermittlung der Nachzerfallswärme in einem zweiten Schritt eine Planung für die Belegung der Einlagerungsstrecken mit Endlagerbehältern und in einem dritten Schritt eine Belegungsplanung für Einlagerungsfelder bestimmt (Aufgabe 2), wobei in jedem Schritt die jeweilige vorgegebene Grenztemperatur berücksichtigt wird.

Abschließend erfolgt die Berechnung der erforderlichen gesamten Endlagerfläche. Für Behälter mit nicht relevant wärmeentwickelnden Abfällen erfolgt eine Endlagerflächenbedarfsermittlung auf der Basis bergbaulicher Anforderungen. Soweit bekannt, werden in die Endlagerflächenermittlung relevante erforderliche Sicherheitsabstände zu Nebengesteinen berücksichtigt.

3.4.1 Aufgabe 1: Berechnung bzw. Ermittlung der Nachzerfallswärme

Der einzelne, in Tabelle 1 genannte Abfallstrom, wird mit einer für ihn spezifischen Nachzerfallswärme beschrieben. Für die im Folgenden aufgeführten Behälter erfolgt die Berechnung bzw. die Ermittlung der Nachzerfallswärme:

- Berechnung der Nachzerfallswärme für Behälter mit ausgedienten Brennelementen aus Leistungsreaktoren (DWR UO₂ + Mox; SWR UO₂ + Mox; WWER-DWR).
- Berechnung bzw. Ermittlung der Nachzerfallswärme für Behälter mit hoch- bzw. mittelradioaktiven Abfällen aus der Wiederaufarbeitung (CSD-V; CSD-B; CSD-C; UK-HAW; HAW-WAK).
- Ermittlung der Nachzerfallswärme für sonstige Behälter (THTR/AVR, KNK incl. Otto Hahn, FRMII, BERII)

3.4.2 Aufgabe 2: Berechnung des erforderlichen Endlagerflächenbedarfs

Wunschgemäß wird für die Wirtsgesteine Salz und Tonstein das Einlagerungskonzept der Streckenlagerung berücksichtigt. Für das Wirtsgestein Granit wird ebenfalls wunschgemäß von einer Einlagerung einzelner Behälter in vertikalen Bohrlöchern analog zum schwedischen Endlagerkonzept ausgegangen. Die erforderliche Endlagerfläche für Behälter mit nicht auslegungsrelevanter Nachzerfallswärme wird in allen Endlagerflächenberechnungen berücksichtigt. Die zu berücksichtigende Teufenlage der Endlager wird mit dem Auftraggeber vor Bearbeitungsbeginn abgestimmt. Mit Blick auf einen aussagekräftigen und widerspruchsfreien Vergleich der zu ermittelnden Flächen wäre eine einheitliche Teufenlage des Endlagerbergwerkes für die zu untersuchenden Einlagerungsvarianten wünschenswert. Aus bergmännischen, geomechanischen und geothermischen Gründen sind unterschiedliche Teufenlagen aber angemessen (Salzstock ca. 900m Teufe, Tonstein und Kristallin ca. 500 bis 600m). Besonders wichtig ist hier zu erwähnen, dass der geothermische Tiefengradient (ca. 3K pro 100m Teufe) direkten Einfluss auf die einlagerbare Menge an wärmeentwickelnden, hoch radioaktiven Abfällen hat und damit auch auf den Flächenbedarf. Dieser Umstand ist bei einem anschließenden Vergleich der Endlagerflächen zu berücksichtigen.

Aufgrund unserer langjährigen Erfahrung bei Endlagerauslegungen und detaillierter Kenntnisse über wirtsgesteinsspezifische Endlagerbehälter und deren mögliches Inventar haben wir in der Angebotsanfrage einen Widerspruch gefunden, den wir auch mit einer Anfrage am 26.10. 2015 formuliert hatten. Hierbei handelt es sich um die sich widersprechenden Vorgaben, dass ein Endlagerbehälter, der das Inventar eines üblichen Zwischenlagerbehälters (Transport- und Lagerbehälter, TLB) beinhalten soll, zugrunde zu legen ist und andererseits Temperaturgrenzwerte von 200°C in Salz und 100°C in allen drei Wirtsgesteinen resp. Einlagerungskonzepten eingehalten werden sollen. Aus einem Projekt, das wir für die Industrie ausgeführt haben, wissen wir, dass das in einem vollständig beladenen TLB enthaltene Inventar eine Wärmeleistung hat, die die Einhaltung der ebenfalls vorgegebenen Grenztemperaturen von 100° C in keinem der zu betrachtenden Wirtsgesteine ermöglicht.

Deshalb schlagen wir zur Bearbeitung der Aufgabenstellung alternative Einlagerungskonzepte vor, die zu einer Lösung führen. Bei der zusätzlich für das Wirtsgestein Salz zu betrachtenden Grenztemperatur von 200° C ist ebenfalls für das vorgegebene Konzept der Streckenlagerung eine Einhaltung der Grenztemperatur nicht möglich. Eine Alternative, die wir hierfür vorschlagen – Einlagerung einzelner Behälter in horizontale Bohrlöcher - würde die Temperaturbedingung erfüllen.

Für die Anwendung der vorgeschlagenen, alternativen Einlagerungskonzepte müsste im Auftragsfalle eine Klärung herbeigeführt werden. In den nachfolgenden Beschreibungen haben wir diese Alternativen unseren Überlegungen zu Grunde gelegt.

3.4.2.1 Wirtsgestein Salz: 200° C Grenztemperatur an der Kontaktfläche Endlagerbehälter/Wirtsgestein

Untersuchungen im Rahmen des von GNS geförderten Projektes DIREGT (Direkte Endlagerung von Transport und Lagerbehältern (TLB bis 160 t)) zeigten, dass bei einer Streckenlagerung von Transport- und Lagerbehältern mit ausgedienten Brennelementen die Einhaltung der Grenztemperatur von 200°C aufgrund der hohen Wärmeleistung eines vollständig beladenen TLBs nicht möglich ist. Es wurde aber rechnerisch nachgewiesen, dass eine Einlagerung einzelner TLBs in horizontalen Kurzbohrlöchern mit geringem Ringraum die Einhaltung der 200° Grenze ermöglicht. Insofern wird für diese Aufgabe vorgeschlagen, die erforderliche Endlagerfläche für das Wirtsgestein Salz bei einer Grenztemperatur von 200° C an der Kontaktfläche Endlagerbehälter/Wirtsgestein für diese abgeänderte Einlagerungsvariante zu berechnen.

Im Einzelnen sind folgende Schritte zur Berechnung der Endlagerfläche vorgesehen:

- Berechnung der Mindestbehälterabstände getrennt für die in Kapitel 3.4.1 aufgeführten drei Behälterarten
- Berechnung des Flächenbedarfs für ein einzelnes Einlagerungsfeld pro Behälterart
- Berechnung des gesamten Flächenbedarfs für diese Einlagerungsvariante incl. der Berücksichtigung von hoch radioaktiven Abfällen mit geringerer Wärmeleistung und der notwendigen Flächen für den Infrastrukturbereich

3.4.2.2 Wirtsgestein Salz: 100° C Grenztemperatur an der Kontaktfläche Endlagerbehälter/Wirtsgestein

Aufgrund der hohen Wärmeleistung eines einzelnen vollständig beladenen TLBs (Behälters) mit ausgedienten Brennelementen oder Wiederaufarbeitungsabfällen ist die geforderte Auslegung für eine Grenztemperatur von 100° C, wie bereits in der Aufgabe davor erwähnt, nicht realisierbar. Als möglicher Lösungsweg wird vorgeschlagen, das POLLUX®-Behältersystem zu wählen und zu untersuchen, ob ggf. auch Behälter mit einer Teilbeladung die geforderte Grenztemperatur von 100 °C einhalten. Mit dem Ergebnis dieser Überprüfung erfolgt die Be-

rechnung der erforderlichen Endlagerfläche unter Berücksichtigung der Grenztemperatur von 100 °C in folgenden Schritten:

- Berechnung der Mindestbehälter- und Streckenabstände getrennt für die in Kapitel 3.4.1 aufgeführten drei Behälterarten
- Berechnung des Flächenbedarfs für ein einzelnes Einlagerungsfeld pro Behälterart
- Berechnung des gesamten Flächenbedarfs für diese Einlagerungsvariante incl. der Berücksichtigung von hoch radioaktiven Abfällen mit geringerer Wärmeleistung und der notwendigen Flächen für den Infrastrukturbereich

3.4.2.3 Wirtsgestein Tonstein: 100 °C Grenztemperatur an der Kontaktfläche Endlagerbehälter/Bentonit

Aufgrund der hohen Wärmeleistung eines einzelnen TLBs mit ausgedienten Brennelementen oder HAW ist auch für diese Einlagerungsvariante im Wirtsgestein Tonstein nach bisherigen Berechnungsergebnissen eine Grenztemperatur von 100° C nicht realisierbar. Bisherige Untersuchungen aus einem FuE-Vorhaben zeigen, dass ein verkleinerter POLLUX®-Behälter, der nur mit den Brennstäben dreier ausgedienter LWR-Brennelemente beladen wird, die Grenztemperatur einhalten kann. Insofern wird in dieser Aufgabenstellung anhand der neuen Randbedingungen (Berücksichtigung von MOX-BE, Einlagerungszeitraum 20150 bis 2080) die Einhaltung der Grenztemperatur überprüft. Mit dem Ergebnis der Prüfung erfolgt die Berechnung der erforderlichen Endlagerfläche für die Grenztemperatur von 100 °C in folgenden Schritten:

- Berechnung der Mindestbehälter- und Streckenabstände getrennt für die in Kapitel 3.4.1 aufgeführten drei Behälterarten
- Berechnung des Flächenbedarfs für ein einzelnes Einlagerungsfeld pro Behälterart
- Berechnung des gesamten Flächenbedarfs für diese Einlagerungsvariante incl. der Berücksichtigung von hoch radioaktiven Abfällen mit geringerer Wärmeleistung und der notwendigen Flächen für den Infrastrukturbereich

3.4.2.4 Wirtsgestein Granit 100 °C Grenztemperatur an der Kontaktfläche Endlagerbehälter/Bentonit

Auch für diese Vorgabe ist aufgrund der hohen Wärmeleistung eines einzelnen TLBs (Behälters) mit ausgedienten Brennelementen oder HAW die Einhaltung der vorgegebenen Grenztemperatur von 100° C nicht realisierbar. Als Behältertyp wird sowohl eine TLB als auch ein POLLUX®-Behälter ausgeschlossen, weil davon ausgegangen werden muss, dass im kristallinen, in der Regel geklüfteten Gestein saline Lösungen angetroffen werden und damit korrosionsresistente Behälter zu wählen sind. Deshalb wird vorgeschlagen, einen mit kupferummantelten Behälter, wie er in den Endlagerkonzepten der SKB und POSVA vorgesehen ist, den Berechnungen zugrunde zu legen. Deshalb wird für die Temperaturberechnungen ein vereinfachtes Behältermodell gewählt. Die Berechnung der erforderlichen

Endlagerfläche für die Grenztemperatur von 100 °C wird dementsprechend in folgenden Schritten durchgeführt:

- Berechnung der Mindestbehälter- und Streckenabstände getrennt für die in Kapitel 3.4.1 aufgeführten drei Behälterarten
- Berechnung des Flächenbedarfs für ein einzelnes Einlagerungsfeld pro Behälterart
- Berechnung des gesamten Flächenbedarfs für diese Einlagerungsvariante incl. der Berücksichtigung von hoch radioaktiven Abfällen mit geringerer Wärmeleistung und der notwendigen Flächen für den Infrastrukturbereich

3.4.3 Vergleichende Gegenüberstellung der Ergebnisse

Zum Abschluss des Gutachtens werden die ermittelten Ergebnisse der Berechnungen zum Endlagerflächenbedarf für die drei Wirtsgesteine und die betrachteten Einlagerungsvarianten einander gegenübergestellt.

4 Referenzen

Die DBE TECHNOLOGY GmbH wurde im Herbst 2000 als 100%ige Tochter der Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe mbH (DBE) gegründet, um deren wissenschaftlich-technisches Know-how zu bündeln und Interessenten im In- und Ausland zur Verfügung zu stellen. Sie soll die umfangreichen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten sowie Planungsaufgaben aus dem Bereich der Entsorgung von radioaktiven Abfällen und der Sicherheit kerntechnischer Anlagen sowie die internationalen Aktivitäten der DBE fortführen und weiterentwickeln. Die Abwicklung von Aufträgen durch DBE TECHNOLOGY GmbH erfolgt im Bedarfsfall in engem Zusammenwirken mit der DBE. Dabei kann sie sich auf die Erfahrungen und die Fachkompetenz des Personals der DBE stützen.

DBE TECHNOLOGY GmbH besitzt langjährige und umfangreiche Erfahrung im Bereich der Konzeption und Auslegung von Endlagerbergwerken in den Wirtsgesteinen Salz, Ton und Kristallin für wärmentwickelnde radioaktive Abfälle und ausgediente Brennelemente. Dazu zählt in besonderem Maße die Dimensionierung des Grubengebäudes für vorgegebene Arten und Mengen an radioaktiven Abfällen. Mittels thermischer und thermomechanischer Berechnungen werden die Rahmenbedingungen für die geometrische Auslegung der Grubenräume im Endlagerbergwerk für die jeweilige in Betracht zu ziehende geologische Gesamtsituation ermittelt. Insofern hat die DBE TECHNOLOGY GmbH die erforderliche Expertise und die notwendigen Werkzeuge, um den Flächenbedarf für Endlagerbergwerke für radioaktive Abfälle und ausgediente Brennelemente in den angefragten drei Wirtsgesteinen zu berechnen.

Nachfolgend haben wir eine Auswahl von für dieses Gutachten besonders relevanten Referenzen zusammengestellt:

- VSG – Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben; Endlagerkonzepte und Endlagerauslegung

Im Rahmen dieses vom BMU finanzierten Verbundvorhabens unter Leitung der GRS wurden von DBE TECHNOLOGY GmbH Endlagerkonzepte als Arbeitsmodelle für die weiterführenden Sicherheitsanalysen entworfen. Dazu zählten die Einlagerungsvarianten Strecken- und Bohrlochlagerung sowie die Direkte Endlagerung von Transport- und Lagerbehältern. In einer weiteren Aufgabenstellung wurden Auslegungsberechnungen und -planungen durchgeführt. Dies beinhaltete die thermische Auslegung des Grubengebäudes sowie die Planung der erforderlichen Transport- und Einlagerungstechnik. Darüber hinaus wurden die Endlagerkonzepte in Hinblick auf die neuformulierten Sicherheitsanforderungen weiterentwickelt und Optimierungsansätze für vorhandene Systeme erarbeitet.

- DIREGT – Direkte Endlagerung von Transport- und Lagerbehältern bis 160 Mg (in Vorbereitung zur Veröffentlichung)

Im Rahmen dieses von der GNS finanzierten Vorhabens wurde von der DBE TECHNOLOGY GmbH auf der Basis der Angaben zu Transport- und Zwischenlagerbehälter für ausgediente Brennelemente und Wiederaufarbeitungsabfälle erstmals ein Einlagerungskonzept entwi-

ckelt. Ein Schwerpunkt war dabei die thermische Auslegung zur Berechnung der Größe eines Einlagerungsfeldes in Abhängigkeit von Wärmeleistung und Einlagerungstechnik. In Konzeptplanungstiefe wurde auch die erforderliche Transport- und Einlagerungstechnik zur Umsetzung des Einlagerungskonzeptes entwickelt.

- Aktualisierung des Konzeptes "Endlager Gorleben"

Im Rahmen dieses von BfS finanziertes Vorhaben wurden 1998 damals aktuelle Abfallmengen zur Ermittlung der räumlichen Ausdehnung eines Endlagers auf der Basis thermomechanischer Rechnungen unter Berücksichtigung von ausgedienten Brennelementen und Wiederaufarbeitungsabfällen berücksichtigt.

- GENESIS "Untersuchungen zur sicherheitstechnischen Auslegung eines generischen Endlagers im Tonstein in Deutschland"

Das Vorhaben setzte sich mit der möglichen Endlagerung von wärmeentwickelndem radioaktivem Abfall in Tonformationen auseinander. Es wurden in Zusammenarbeit mit der BGR-Berlin vier mögliche Referenzmodellgebiete (2 in Norddeutschland und 2 in Süddeutschland) im Tonstein sowohl auf Basis der AkEnd-Richtlinien als auch auf Basis weiterer Abwägungskriterien gewählt, die sich aus der geologischen Situation, insbesondere der Lithologie und der Mineralogie, ableiten ließen. Im Zuge dieses Projektes wurden zwei verschiedene Konzepte der Einlagerung – Bohrlochlagerung und Streckenlagerung – betrachtet. Für beide Konzepte wurden thermische Auslegungsberechnungen zur Bestimmung von notwendigen Zwischenlagerzeiten, Behälterabständen und Bohrloch- bzw. Streckenabständen durchgeführt. Aus den ermittelten Werten wurde ein minimaler Flächenbedarf abgeschätzt, der einen Hinweis auf die Größe des notwendigen „Homogenbereichs“ einer Tonformation in Deutschland gibt.

- ERATO „Referenzkonzept für ein Endlager für radioaktive Abfälle in Tonstein in Deutschland“

In diesem Vorhaben wurde von DBE TECHNOLOGY GmbH erstmalig ein Endlagerkonzept für die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in Tonsteinformationen in Deutschland entwickelt. Dabei wurden unterschiedliche Einlagerungsvarianten für Bohrloch- und Streckenlagerung erarbeitet und systematisch bewertet. Darauf basierend wurde ein Referenz-Grubengebäude für eine ausgewählte Tonsteinformation in Deutschland erstellt, einschließlich der dafür erforderlichen betrieblichen Prozesse wie Transporte, Einlagerungsabläufe und Bewetterung. Grundlage der Grubengebäudekonzeption waren sowohl thermische Auslegungsberechnungen als auch bergmännische Planungen zur Herstellung, zum Ausbau und zur Instandhaltung der Grubenräume.

- ANSICHT "Methodik und Anwendungsbezug eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein HAW-Endlager im Tonstein"

Im Rahmen dieses Verbundvorhabens von BGR, GRS und DBE TECHNOLOGY GmbH für das BMWi wird derzeit ein Sicherheits- und Nachweiskonzept für ein Endlager in einer Tonsteinformation in Deutschland entwickelt. Basierend auf der im AnSichT-Vorhaben entwickelten Sicherheitsphilosophie wird ein Endlagerkonzept sowie ein qualitatives Verfüll- und Verschlusskonzept erarbeitet. Ein Schwerpunkt dabei ist auch die Auslegung des Grubengebäudes auf Grundlage von thermischen Berechnungen. Ausgehend von diesen Grundlagen werden zwei lokationsspezifische FEP-Kataloge (Nord- und Süddeutschland) entwickelt, die alle wesentlichen Prozesse beschreiben, die im und um das Endlager herum ablaufen. Ein wesentlicher Teil der Arbeiten besteht in dem Nachweis der Integrität der geologischen Barriere mittels numerischer Simulationen auf Prozess Level Ebene als auch ingenieurtechnischer Nachweisverfahren. Grundlage des Nachweises sind Integritätskriterien, die in quantitativer Form formuliert wurden.

- URSEL "Site-specific evaluation of safety issues for high-level waste disposal in crystalline rocks"

In unmittelbarem Zusammenhang mit diesem Vorhaben sind die dem Projekt URSEL vorausgegangenen Projekte ASTER "Requirements for site investigation for a HLW repository in hard rock formations" (2002 – 05) und WIBASTA "Performance investigation of engineered and geologic barriers of a HLW repository in magmatic host rocks" (2005 – 08) zu sehen. Dieser Projektverbund zielt auf die mögliche Einlagerung von wärmeentwickelnden radioaktivem Abfall im Kristallin und bezieht sich auf das Untersuchungsgebiete Krasnoyarsk in Russland.

Im Rahmen des URSEL Vorhabens wurden seitens DBE TECHNOLOGY GmbH thermische Auslegungsberechnungen durchgeführt. Diese basierten auf den vorläufigen Endlagerplanungen des russischen Projektpartners, der eine vertikale Bohrlochlagerung favorisiert. Dieses Konzept geht davon aus, dass die Einlagerungsbehälter mit einem Bentonit-Buffer umgeben werden. Als thermisches Grenzkriterium wurde festgelegt, dass der Buffer mit nicht mehr als 150°C belastet werden sollte. In dem Zusammenhang wurde auch berechnet, wie sich eine realitätsnahe zeitlich gestaffelte Einlagerung der Behälter auf das thermische System auswirkt.

- EUGENIA "Entwicklung und Umsetzung von technischen Konzepten für Endlager in tiefen geologischen Formationen in unterschiedlichen Wirtsgesteinen"

Im Rahmen des gemeinsam von BGR und DBE TECHNOLOGY GmbH im Zeitraum 2007 bis 2008 durchgeführten Vorhabens für das BMWi sind die bei der Standorterkundung im Salz (Deutschland), Tonstein (Frankreich, Schweiz) und Kristallin (Schweden, Finnland, Schweiz) eingesetzten geologisch-geophysikalischen Untersuchungsmethoden und wesentliche dabei erzielte Ergebnisse zusammengestellt worden. Für die unterschiedlichen Wirtsgesteinstypen

wurden einige endlagerrelevante Gesteinseigenschaften zusammenfassend dargestellt. Darüber hinaus wurde der Stand der Technik bei den technischen Konzepten für die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in den vorgenannten Wirtsgesteinen recherchiert und zusammenfassend beschrieben. Dies schloss die Beschreibung der technischen Maßnahmen und Systeme zum Bau, Betrieb und zum Verschluss von Endlagern mit ein.