

**Status quo der Lagerung ausgedienter
Brennelemente aus stillgelegten / rück-
gebauten deutschen Forschungsreaktoren
und Strategie (Lösungsansatz) zu deren
künftigen Behandlung / Lagerung**

LABRADOR

Abschlussbericht

**Status quo der Lagerung ausgedienter
Brennelemente aus stillgelegten / rück-
gebauten deutschen Forschungsreaktoren
und Strategie (Lösungsansatz) zu deren
künftigen Behandlung / Lagerung**

LABRADOR

Abschlussbericht

S. Dörr, W. Bollingerfehr, W. Filbert, M. Tholen

DBE TECHNOLOGY GmbH
Eschenstraße 55
D-31224 Peine

Dezember 2011

Die dieser Studie zugrunde liegenden Arbeiten wurden im Auftrag des BMBF vertreten durch den Projektträger des Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Bereich Wassertechnologie und Entsorgung, (PTKA-WTE) unter dem Förderkennzeichen 02 S 8679 von DBE TECHNOLOGY GmbH durchgeführt. Die Verantwortung für den Inhalt liegt jedoch allein bei den Autoren.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	5
2	Aktuelle Bestandsaufnahme der in Deutschland zu entsorgenden Brennelemente/Brennstäbe aus Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken sowie aus Forschungsreaktoren	7
3	Zusammenfassende Beschreibung der Brennelemente/Brennstäbe	13
3.1	Brennelemente der Arbeitsgemeinschaft Versuchsreaktor (AVR)	13
3.2	Brennelemente des Thorium-Hochtemperaturreaktors (THTR 300)	14
3.3	Brennstäbe der Kompakten Natriumgekühlten Kernreaktoranlage KNK II und des Nuklearschiffs Otto-Hahn	15
3.4	Brennelemente des Rossendorfer Forschungsreaktors RFR	15
3.5	Brennelemente des Forschungsreaktors München FRM II	16
3.6	Brennelemente des Forschungsreaktors Berlin BER II	16
3.7	Brennelemente des Forschungsreaktors Mainz FRMZ	17
4	Charakteristik der Brennelemente/Brennstäbe	19
4.1	Brennelemente der Arbeitsgemeinschaft Versuchsreaktor (AVR)	19
4.2	Brennelemente des Thorium-Hochtemperaturreaktors (THTR 300)	21
4.3	Brennstäbe der Kompakten Natriumgekühlten Kernreaktoranlage KNK II	21
4.4	Brennstäbe des Nuklearschiffes Otto-Hahn	23
4.5	Brennelemente des Rossendorfer Forschungsreaktors RFR	24
4.6	Brennelemente des Forschungsreaktors München FRM II	27
4.7	Brennelemente des Forschungsreaktors Berlin BER II	28
4.8	Brennelemente des Forschungsreaktors Mainz FRMZ	29
5	Konzeptionelle Überlegung zu den Endlagerbehältern	31
5.1	CASTOR® THTR/AVR	31
5.2	CASTOR® KNK	33
5.3	CASTOR® MTR 2	36
5.4	Brennstabkokille	38
5.5	Übersicht über Massen und Volumina der Endlagerbehälter für Brennelemente/Brennstäbe	43
6	Inventar der Endlagerbehälter mit Brennelementen/Brennstäben – Gesamtaktivitäten, Massen und Volumina	45

7	Untersuchungen zur Beurteilung der Notwendigkeit von Anpassungsmaßnahmen an Transport- und Lagerbehälter als Endlagerbehälter	49
8	Technisches Konzept zur Integration der Endlagerbehälter in bestehenden Endlagerkonzeptionen	53
8.1	Wirtsgestein Salz	53
8.1.1	Randbedingungen bei einer Einlagerung im Wirtsgestein Salz	53
8.1.2	Streckenlagerung im Wirtsgestein Salz	54
8.1.3	Bohrlochlagerung im Wirtsgestein Salz	57
8.2	Wirtsgestein Ton	60
8.2.1	Randbedingungen bei der Einlagerung im Wirtsgestein Ton	61
8.2.2	Streckenlagerung im Wirtsgestein Ton	63
8.2.3	Bohrlochlagerung im Wirtsgestein Ton	64
9	Betriebssicherheit	69
9.1	Wirtsgestein Salz	69
9.2	Wirtsgestein Ton	70
10	Zusammenfassung und Empfehlung	71
	Abbildungsverzeichnis	75
	Tabellenverzeichnis	77
	Abkürzungsverzeichnis	79
	Literaturverzeichnis	81

1 Einleitung

Ausgediente Brennelemente aus deutschen Prototyp- und Versuchs-Kernkraftwerken sowie aus Forschungsreaktoren werden nach bisherigen Regelungen/Vereinbarungen entweder in die USA oder andere Länder zwecks Verbleib bzw. Wiederaufarbeitung verbracht oder sie werden zunächst für einen auf maximal 40 Jahre begrenzten Zeitraum in Deutschland zwischengelagert. Für die in Deutschland zu entsorgenden Brennelemente aus den Prototyp- und Versuchs-Kernkraftwerken sowie den Forschungsreaktoren gibt es derzeit keine über den Zeitraum der begrenzten Zwischenlagerung hinausgehenden Planungen.

Im Rahmen des vorliegenden Vorhabens erfolgte eine aktuelle Beschreibung der in Deutschland zu entsorgenden Brennelemente/Brennstäbe aus Prototyp- und Versuchs-Kernkraftwerken sowie aus Forschungsreaktoren einschließlich der für die Brennelemente/Brennstäbe in Frage kommenden Behälter für die Endlagerung. Auf dieser Basis wurde ein Lösungsansatz für die Entsorgung dieser Brennelemente bzw. Brennstäbe entwickelt.

Die in den nachfolgenden Kapiteln dargestellten Ergebnisse wurden in fünf Schritten erarbeitet.

Im ersten Schritt erfolgte die Bestandsaufnahme der Brennelemente/Brennstäbe aus Prototyp- und Versuchs-Kernkraftwerken sowie aus Forschungsreaktoren, die für eine Endlagerung in Deutschland zu berücksichtigen sind.

Im zweiten Schritt wurden die in Deutschland endzulagernden Brennelemente/Brennstäbe aus Prototyp- und Versuchs-Kernkraftwerken sowie aus Forschungsreaktoren auf Basis von Angaben in den Zulassungsscheinen der Transport- und Lagerbehälter, d. h. der CASTOR®-Behälter, beschrieben und durch die Zusammenstellung weiterer Daten, die durch eigene Recherche ermittelt wurden, charakterisiert.

In einem dritten Schritt wurden die Behälter, die für eine Endlagerung der Brennelemente/Brennstäbe aus heutiger Sicht als geeignet erscheinen beschrieben. Zu diesen Behältern zählen die Transport- und Lagerbehälter und alternativ dazu die für die Bohrlochlagerung für die Brennstäbe deutscher Leistungsreaktoren vorgesehenen Brennstabkokillen (BSK). Es erfolgt eine Beschreibung der Gesamtaktivitäten, Volumina und Massen der Abfallgebände. Des Weiteren erfolgt eine Beurteilung der Notwendigkeit von Anpassungsmaßnahmen der Transport- und Lagerbehälter für die Endlagerung.

Im vierten Schritt wurde ein Lösungsansatz für die Endlagerung der Brennelemente/Brennstäbe aus Prototyp- und Versuchs-Kernkraftwerken sowie aus Forschungsreaktoren entwickelt. Dazu werden die Brennelemente/Brennstäbe in bestehende Endlagerkonzeptionen für die Brennelemente/Brennstäbe aus Leistungsreaktoren und Wiederaufarbeitungsabfälle für die Wirtsgesteine Salz und Ton integriert. Darüber hinaus wurden die Randbedingungen für eine Einlagerung in den beiden Wirtsgesteinen beschrieben. Des Weiteren erfolgte eine Beschreibung der Transportabläufe über und unter Tage und eine Grubengebäudeplanung zu möglichen Einlagerungsfeldern für die unterschiedlichen Einlagerungs-

varianten in den Wirtsgesteinen Salz und Ton. Ergänzend dazu erfolgte eine Abschätzung relevanter Konsequenzen für die Betriebs- und Langzeitsicherheit.

Im fünften und letzten Schritt wurden die Ergebnisse zusammengefasst und es erfolgt eine Beschreibung der sich aus den Ergebnissen ableitenden Empfehlungen für konkrete Planungsschritte zur Lösung der Aufgabe.

2 Aktuelle Bestandsaufnahme der in Deutschland zu entsorgenden Brennelemente/Brennstäbe aus Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken sowie aus Forschungsreaktoren

In der Bundesrepublik Deutschland wurden sieben Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerke betrieben, die alle stillgelegt sind. Dabei handelt es sich um die folgenden Anlagen /BMU 2011/:

- Arbeitsgemeinschaft Versuchsreaktor (AVR), Jülich
- Thorium-Hochtemperaturreaktor (THTR 300), Hamm-Uentrop
- Mehrzweckforschungsreaktor (MZFR), Karlsruhe
- Kompakte Natriumgekühlte Kernreaktoranlage (KNK II), Karlsruhe
- Versuchsatomkraftwerk Kahl (VAK)
- Kernkraftwerk Niederaichbach (KKN)
- Heißdampfreaktor (HDR), Großwelzheim

Bei dem vollständig beseitigten Heißdampfreaktor in Großwelzheim und dem ebenfalls vollständig beseitigten Versuchsatomkraftwerk Kahl handelte es sich um Siedewasserreaktoren mit schwach angereicherten Urandioxid-Pellets (im VAK teilweise auch MOX) als Brennstoff. Zwei weitere Reaktoren, der AVR in Jülich und der THTR 300 in Hamm-Uentrop, waren heli-umgekühlte, graphitmoderierte Hochtemperaturreaktoren, bei denen der mittel- und hochangereicherte, aus Uran-/Thoriumoxid-Partikeln bestehende Brennstoff in Graphitkugeln eingebettet war. Der MZFR in Karlsruhe war ein Schwerwasserreaktor mit sehr schwach angereichertem Brennstoff aus Urandioxid. Die Kompakte Natriumgekühlte Kernreaktoranlage KNK II in Karlsruhe verwendete Brennelemente aus hochangereichertem Uran- und Uran-/Plutonium-Mischoxid. Das Kernkraftwerk Niederaichbach (KKN) war als Prototyp-Anlage mit einem schwerwassermoderierten und CO₂-gasgeköhlten Druckröhrenreaktor, in dem Natur-uran als Brennstoff verwendet wurde, in Betrieb /BfS 2008/.

Aus dem Betrieb des AVR in Jülich sind 288.033 Stück und aus dem Betrieb des Hochtemperaturreaktors THTR 300 in Hamm-Uentrop 617.878¹ Stück kugelförmige graphitische Brennelemente zur Entsorgung angefallen. Die gesamte Schwermetallmasse einschließlich des Thoriums der Brennelementkugeln aus dem AVR beträgt etwa 1,8 tSM. Die gesamte Schwermetallmasse der bestrahlten Brennelemente des THTR einschließlich des Thoriums beträgt 6,9 tSM /BfS 2008/.

Die bestrahlten Brennelemente (171 tSM) der weiteren Prototypreaktoren MZFR, VAK, KKN und HDR sind bereits entsorgt. Sie wurden im Ausland und in der Wiederaufarbeitungsanlage Karlsruhe zum größten Teil aufgearbeitet. Aus diesen Anlagen sind zukünftig keine bestrahlten Brennelemente mehr zu entsorgen /BfS 2008/.

Die Brennelemente des KNK II sind zum Forschungszentrum Cardarache und zum Forschungszentrum Mol zur Wiederaufarbeitung und zu Forschungszwecken gebracht worden.

¹ Gemäß dem Schreiben vom 02.02.2012 der HKG(Hochtemperatur-Kernkraftwerk GmbH) handelt es sich um 617.606 BE /HKG 2012/.

Eine Teilmenge dieser Brennelemente (2.413 Brennstäbe aus 27 Brennelementen aus Caradache und 68 bestrahlte und 3 unbestrahlte aus Mol /JK 2006/) konnte wegen Schwerlöslichkeit nicht wiederaufgearbeitet werden und wurde im Dezember 2010 zum Zwischenlager Nord (Lubmin) gebracht /BMU 2011/. Es handelt sich dabei um eine Menge von 513 kg Schwermetall /BfS 2008/ in vier Behältern der Bauart CASTOR® KNK.

In Deutschland befinden sich acht Forschungs- und Unterrichtsreaktoren in Betrieb /BfS 2011a/. Dies sind:

- Forschungsreaktor Berlin (BER II)
- Forschungsreaktor München II (FRM II)
- Forschungsreaktor Mainz (FRMZ)
- Siemens-Unterrichtsreaktoren (SUR) in Furtwangen, Stuttgart, Ulm und Hannover
- Ausbildungsreaktor AKR/AKR-2, Dresden

Der Forschungsreaktor Geesthacht I (FRG-I) wurde 2010 endgültig abgeschaltet /BfS 2011b/ und befindet sich in der Nachbetriebsphase. Weiterhin sind neun Anlagen mit thermischen Leistungen von > 1 MW abgeschaltet und befinden sich in unterschiedlichen Stadien der Stilllegung /BfS 2011b/:

- Forschungs- und Messreaktor Braunschweig (FMRB)
- Forschungsreaktor 2 (FR-2), Karlsruhe
- Forschungsreaktor Geesthacht 2 (FRG-2)
- Forschungsreaktor Jülich 1 (FRJ-1, MERLIN)
- Forschungsreaktor Jülich 2 (FRJ-2, DIDO)
- Forschungsreaktor München (FRM)
- Forschungsreaktor Neuherberg (FRN)
- Nuklearschiff Otto-Hahn, Geesthacht
- Rossendorfer Forschungsreaktor (RFR)

Die Brennelemente der bereits abgeschalteten Forschungsreaktoren wurden weitestgehend entsorgt. Von den drei seit 1991 abgeschalteten Forschungsreaktoren in Rossendorf sind die im RFR angefallenen bestrahlten Brennelemente mit 349 kg Uran, davon 55 kg U-235 und 2 kg Pu-239 zurzeit im Zwischenlager Ahaus zwischengelagert. Sie sollen später möglichst direkt endgelagert werden. Die Brennelemente der beiden anderen Reaktoren sind nach Russland rückgeführt worden /BfS 2008/.

Entsorgungsbedarf ergibt sich für Restmengen an Brennstäben des Nuklearschiffs Otto-Hahn mit einer Gesamtmasse von ca. 32 kg (52 Brennstäbe) und auch für die in Betrieb bzw. Nachbetrieb befindlichen Reaktoren in Berlin (BER II), Garching (FRM II), Geesthacht (FRG-1), Jülich (FRJ-2) sowie Mainz (FRMZ). Aus dem bisherigen und geplanten Mindestbetrieb dieser Forschungsreaktoren ergibt sich für den Zeitraum bis 2025 eine zu entsorgende

Gesamtmasse² bestrahlter Brennelemente von ca. 9,8 t /BfS 2008/.

Die Brennelemente der bereits stillgelegten Siemens-Unterrichtsreaktoren (SUR) Darmstadt, München, Hamburg und Bremen sind an der TU München am Institut für Radiochemie konditioniert und zu Advanced Nuclear Fuel (ANF) Lingen überführt und verwertet worden. Es handelt sich um 42 Brennelemente mit einem Entsorgungsgewicht von ca. 14 kg. Alle übrigen SUR-Brennelemente befinden sich an den jeweiligen Reaktorstandorten; insgesamt sind 174 kg SUR-Brennelemente zu entsorgen /BfS 2008/.

Der AKR-2 hat eine unbefristete Betriebsgenehmigung, im Einsatz sind Brennelemente mit einem Gesamtgewicht von ca. 4,9 kg Uran, davon 1 kg U-235. Aus dem Betrieb des AKR wurden drei unbestrahlte Brennelemente mit einem Entsorgungsgewicht von ca. 0,6 kg Uran, davon 110 g U-235, die nicht mehr benötigt werden, an den Verein für Kernverfahrenstechnik und Analytik (VKTA) Rossendorf abgegeben. Die Brennstoffplatten wurden im März 2008 an die TU München geliefert und sollen ebenfalls zur Verwertung an ANF Lingen abgegeben werden. Aus dem Ausbildungsreaktor in Zittau (ZLFR), der eine thermische Leistung von 10 Watt besaß und 2005 abgeschaltet wurde, sind Brennelemente mit 10 kg Uran, davon 3,7 kg U-235 nach Russland rückgeführt worden /BfS 2008/.

Die THTR- und AVR-Brennelemente sollen direkt endgelagert werden. Die bestrahlten Brennelemente des THTR 300 werden derzeit in 305 Behältern der Bauart CASTOR® THTR/AVR in Ahaus zwischengelagert. Die bestrahlten Brennelemente des AVR befinden sich im AVR-Behälterlager Jülich auf dem Gelände des Forschungszentrums Jülich in 145 CASTOR® THTR/AVR und verschiedenen Kannen, die erst noch in weitere 7 CASTOR® THTR/AVR verpackt werden müssen. Die Brennelemente des THTR und AVR sollen verpackt in CASTOR® THTR/AVR endgelagert werden /BfS 2008/.

Der verbliebenen 52 Brennstäbe aus dem Nuklearschiff Otto-Hahn wurden im Dezember 2010 zusammen mit dem restlichen Kernbrennstoff des KNK II in vier Behältern der Bauart CASTOR® KNK zum Zwischenlager Nord (Lubmin) gebracht /BMU 2011/. Nach der Zwischenlagerung im ZLN sollen diese ebenfalls direkt endgelagert werden /BfS 2008/.

Die deutschen Forschungsreaktoren haben in der Vergangenheit bestrahlte Brennelemente regelmäßig im Ausland entsorgt. Die Brennelemente aus seit längerem abgeschalteten Anlagen sind deshalb vollständig entsorgt. In der Vergangenheit erfolgte in europäischen Anlagen (Belgien, Frankreich, Großbritannien) die Wiederaufarbeitung bestrahlter und unbestrahlter Kernbrennstoffe aus deutschen Forschungsreaktoren. Als weitere Entsorgungsvariante wurden bestrahlte Brennelemente amerikanischen Ursprungs in die USA gebracht und dort in den Anlagen des U.S. Department of Energy (DOE) wiederaufgearbeitet. Aufgrund bestehender Verträge mit dem DOE werden auch die bestrahlten Brennelemente, die derzeit noch in den in Betrieb befindlichen deutschen Forschungsreaktoren eingesetzt sind, bis zum Jahr 2019 (Entladung in 2016) in die USA zum endgültigen Verbleib rückgeführt. Es

² Während für die Brennelementmassen der Leistungs- und Prototypreaktoren als Masseneinheit Tonnen Schwermetall (tSM) gebräuchlich ist, wird bei Brennelementen aus Forschungs- und Unterrichtsreaktoren das "Entsorgungs- oder Gesamtgewicht" verwendet. Es umfasst neben der Gesamtmasse des Kernbrennstoffs auch die Masse der nicht abtrennbaren Hüll- und Konstruktionsmaterialien.

handelt sich dabei um 2,4 t bestrahlte Kernbrennstoffe aus den Forschungsreaktoren BER II (Berlin), FRG-1 (Geesthacht), FRJ-2 (Jülich) und TRIGA in Mainz (FRMZ) /BfS 2008/.

Die 4,7 t Brennelemente aus dem FRM II, die Uran sowohl aus den USA als auch aus Russland enthalten, werden nicht in die USA verbracht. Sie sollen verpackt in 38 Behältern der Bauart CASTOR[®] MTR 2 direkt endgelagert werden. Die bestrahlten Brennelemente des Rossendorfer Forschungsreaktors RFR mit einer Gesamtmasse von ca. 2,3 t werden seit 2005 in 18 CASTOR[®] MTR 2 in Ahaus zwischengelagert. Diese 18 CASTOR[®] MTR 2 beinhalten insgesamt 803 WWR-M/M2-Brennelemente, 147 EK-10 Brennelemente und ein Brennstabbehälter mit 16 Brennstäben aus einem EK-10-Brennelement /VKTA 1994/. Diese Brennelemente sollen ebenfalls direkt endgelagert werden. Weiterhin werden nach Ablauf des Vertrages mit DOE und Weiterbetrieb des Forschungsreaktors Berlin (BER II) nach 2016 bis etwa 2040 noch 287 bestrahlte Brennelemente anfallen, die in 9 CASTOR[®] MTR 2 direkt endgelagert werden sollen. Die bestrahlten Brennelemente des Forschungsreaktors Mainz (FRMZ) sollen ebenfalls über eine Zwischenlagerung in Ahaus und anschließender direkter Endlagerung entsorgt werden. /BfS 2008/. Es handelt sich dabei um maximal 89 Brennelemente /FZJ 2003/, die in einen CASTOR[®] MTR 2 verpackt werden.

Seit Oktober 2011 liegt eine verkehrsrechtliche Zulassung für den CASTOR[®] MTR 2 mit einem angepassten Inventar vor. Für die damit nicht mehr erfassten Inventare ist eine weitere Zulassung in Vorbereitung (CASTOR[®] MTR 3) /GNS 2011/. Die in diesem Bericht enthaltenen Angaben zu CASTOR[®] MTR 2 haben daher zum Teil auch Gültigkeit für den CASTOR[®] MTR 3, z. B. für die Beschreibung der Verpackungen bzw. Behälter einschließlich schematischer Darstellung (s. Kapitel 5.3); Angaben zum Inventar des CASTOR[®] MTR 2 betreffend FRM II, BER II und FRMZ werden zukünftig ausschließlich dem CASTOR[®] MTR 3 zugeordnet (s. Kapitel 5.3).

Die noch betriebenen Siemens-Unterrichtsreaktoren (SUR) sollen in den nächsten Jahren außer Betrieb genommen werden. Die SUR-Brennelemente werden durch die TU München konditioniert, d. h. das U_3O_8 soll thermisch vom Polyethylen getrennt und anschließend auf einen Uran-235 Gehalt von kleiner 5 % heruntergeblendet werden. Das dabei zurück gewonnene Uran soll zur Brennelementfertigung an ANF Lingen abgegeben werden. Der Ausbildungsreaktor in Zittau (ZLFR) wurde im März 2005 außer Betrieb genommen. Das Brennelementinventar des ZLFR wurde im Dezember 2005 zur sicheren Verwahrung und Vorbereitung der weiteren Entsorgung zum VKTA Rossendorf überführt. Der Ausbildungsreaktor AKR-2 der TU Dresden verfügt seit dem 23.03.2004 über eine unbefristete Betriebsgenehmigung nach § 7 AtG. /BfS 2008/ Da das Brennelementinventar des ZLFR zwischenzeitlich nach Russland exportiert wurde und eine Konditionierung der SUR-Brennelemente und der Brennelemente des AKR-2 durch die TU München wahrscheinlich ist /VKTA 2010/, werden diese Brennelemente im Folgenden nicht weiter hinsichtlich der Strategie zur zukünftigen Behandlung/ Lagerung bzw. direkten Endlagerung betrachtet.

Die Tabelle 2-1 gibt einen Überblick über die Anzahl der Brennelemente/Brennstäbe aus Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken sowie aus Forschungsreaktoren, die in Deutschland zu entsorgen sein werden, und die dazugehörige Anzahl an Transport- und Lagerbehältern.

Tabelle 2-1: Anzahl der Brennelemente/Brennstäbe aus Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken sowie aus Forschungsreaktoren und Anzahl der dazugehörigen Transport- und Lagerbehälter

Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerk/ Forschungsreaktor	Anzahl an Brennelementen/ Brenn- stäben	Transport- und Lagerbehälter	Anzahl an Transport- und Lagerbehälter
AVR	288.033 BE	CASTOR® THTR/AVR	152
THTR	617.606 ³ BE		305
KNK II	2.484 BS	CASTOR® KNK	4
Otto-Hahn	52 BS		
RFR	951 BE	CASTOR® MTR 2	18
FRM II	190 BE	CASTOR® MTR 3	38
BER II	287 BE		9
FRMZ	89 BE		1

³ Gemäß dem Schreiben vom 02.02.2012 der HKG(Hochtemperatur-Kernkraftwerk GmbH) handelt es sich um 617.606 BE anstatt der im Dezember 2011 angegebenen 617.878 BE /HKG 2012/.

3 Zusammenfassende Beschreibung der Brennelemente/Brennstäbe

In den folgenden Kapiteln erfolgt eine Beschreibung der aus heutiger Sicht in Deutschland endzulagernden Brennelemente/Brennstäbe aus Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken sowie aus Forschungsreaktoren. Es sind die im Zusammenhang mit der Zulassung der Transport- und Lagerbehälter der Bauart CASTOR® als Versandstück des Typs B(U) vorliegende Beschreibungen der Brennelemente/Brennstäbe dargestellt. Weitere Angaben zur Charakteristik der Brennelemente/Brennstäbe enthält Kapitel 4.

3.1 Brennelemente der Arbeitsgemeinschaft Versuchsreaktor (AVR)

Brennelemente aus dem Hochtemperaturreaktor der Arbeitsgemeinschaft Versuchsreaktor (AVR-BE) sind kugelförmig (Durchmesser 60 mm). Die AVR-BE bestehen aus einer im Zentrum liegenden Graphitmatrix (Durchmesser 50 mm), die den Brennstoff in Form beschichteter Partikel enthält, und einer äußeren Graphitschale (Dicke 5 mm). Die beschichteten Partikel bestehen aus einem Brennstoffkern aus karbidischen oder oxidischen Uran- und/oder Thoriumverbindungen und den Brennstoffkern umgebenden Beschichtungen zur Rückhaltung der Spaltprodukte. Die Beschichtungen bestehen aus einer porösen Pufferschicht, die entweder mit zwei Schichten aus Pyrokohlenstoff (BISO) oder zwei Schichten aus Pyrokohlenstoff mit eingefügter Siliciumcarbidschicht (TRISO) umgeben ist. Die AVR-BE haben eine Masse von ca. 214 g je BE. In der Tabelle 3-1 sind die Spezifikationswerte der AVR-BE aufgeführt /BfS 2007/.

Tabelle 3-1: Spezifikationswerte der Brennelementkugeln der Arbeitsgemeinschaft Versuchsreaktor (AVR)

Durchmesser	60 mm
Gesamtmasse	ca. 214 g
Masse an Uran-235 (vor Bestrahlung) - bei einem Anreicherungsgrad von max. 93 % - bei einem Anreicherungsgrad von max. 17 %	1 g 1,4 g
Max. Abbrand	194 GWd/tSM
Mindestabklingzeit der Brennelemente ¹	15 Jahre

1: vor Beladung des CASTOR®-Behälters

Bei den Betriebselementen (BTE) handelt es sich um spaltstofffreie Absorber- und Graphitelemente (Durchmesser jeweils 60 mm). Bei den Absorberelementen ist dem Graphit im Kugelzentrum (bis 50 mm Durchmesser) als Neutronenabsorber Hafnium und Bor zugegeben. Die Masse dieser Elemente beträgt ca. 206 g je BTE /BfS 2007/.

3.2 Brennelemente des Thorium-Hochtemperaturreaktors (THTR 300)

Brennelemente aus dem Thorium-Hochtemperaturreaktor (THTR-BE) sind wie die AVR-BE kugelförmig (Durchmesser 60 mm). Die THTR-BE bestehen aus einer im Zentrum liegenden Graphitmatrix (Durchmesser 50 mm), die den Brennstoff in Form beschichteter Partikel enthält, und einer äußeren Graphitschale (Dicke 5 mm). Die beschichteten Partikel bestehen aus einem Brennstoffkern aus oxidischen Uran- und/oder Thoriumverbindungen und den Brennstoffkern umgebenden Beschichtungen zur Rückhaltung der Spaltprodukte. Die Beschichtungen bestehen aus einer porösen Pufferschicht, die mit zwei Schichten aus Pyrokohlenstoff (BISO) umgeben ist. Die THTR-BE haben eine Masse von ca. 203 g je BE. In der Tabelle 3-2 sind die Spezifikationswerte der THTR-BE aufgeführt /BfS 2007/.

Tabelle 3-2: Spezifikationswerte der Brennelementkugeln des Thorium-Hochtemperaturreaktors (THTR 300)

Durchmesser	60 mm
Gesamtmasse	ca. 203 g
Masse an Uran-235 (vor Bestrahlung)	0,96 g
Max. Anreicherungsgrad an U-235 (ursprünglich)	93 %
Max. Abbrand	114 GWd/tSM
Mindestabklingzeit der Brennelemente ¹	15 Jahre

1: vor Beladung des CASTOR®-Behälters

Bei den Betriebselementen (BTE) handelt es sich um spaltstofffreie Absorber- und Graphitelemente (Durchmesser jeweils 60 mm). Bei den Absorberelementen ist dem Graphit im Kugelzentrum (bis 50 mm Durchmesser) als Neutronenabsorber Hafnium und Bor zugegeben. Die Masse dieser Elemente beträgt ca. 190 g je BTE /BfS 2007/.

Abbrandmessreaktor-Brennelemente (AMR-BE) setzen sich aus homogenen, unbeschichteten rechteckigen Platten zusammen, die aus einer Aluminiumlegierung mit einem Massenanteil von 80 % an Aluminium und einem Massenanteil von 20 % an Uran bestehen. In der Tabelle 3-3 sind die Spezifikationswerte der AMR-BE aufgeführt /BfS 2007/.

Tabelle 3-3: Spezifikationswerte der Abbrandmessreaktor-Brennelemente des Thorium-Hochtemperaturreaktors (THTR 300)

Breite	15 mm
Länge	89 bis 711 mm
Stärke/Dicke	1,1 mm
Max. Anreicherungsgrad an U-235 (ursprünglich)	93 %
Max. Abbrand	0,13 GWd/tSM
Mindestabklingzeit der Brennelemente ¹	15 Jahre

1: vor Beladung des CASTOR®-Behälters

3.3 Brennstäbe der Kompakten Natriumgekühlten Kernreaktoranlage KNK II und des Nuklearschiffs Otto-Hahn

Die verfügbaren Daten aus dem Zulassungsschein des CASTOR® KNK sind in Kapitel 5.2 dargestellt.

3.4 Brennelemente des Rossendorfer Forschungsreaktors RFR

Die Tabelle 3-4 enthält die Spezifikationswerte für EK-10-Brennelemente und EK-10-Brennstabbehälter /BfS 2005/.

Tabelle 3-4: Spezifikationswerte für EK-10-Brennelemente und –Brennstabbehälter des Rossendorfer Forschungsreaktors RFR

BE-Typ		EK-10-BE	EK-10-BE-Behälter
Max. BE-Länge (unbestrahlt, nominal)	[mm]	750	750
Max. BE-Querschnitt (unbestrahlt, nominal)	[mm x mm]	68 x 68	69 x 69
Max. Masse	[kg]	3,3	6,0
Max. Anfangsanreicherung U-235	[%]	10	10
Max. Anfangsmasse Uran	[g]	1.287,5	1.287,5
Max. Anfangsmasse U-235	[g]	128,8	128,8
Max. Abbrand	[MWd/BE]	39,5	39,5
Min. Abklingzeit ¹	[a]	30,4	30,4
Max. Nachzerfallsleistung	[W]	1	1

1: vor Beladung des CASTOR®-Behälters

In der Tabelle 3-5 sind die Spezifikationswerte für die verschiedenen BE-Typen (WWR-M- und WWR-M2-Brennelemente) des Rossendorfer Forschungsreaktors RFR aufgeführt /BfS 2005/.

Tabelle 3-5: Spezifikationswerte für WWR-M- und WWR-M2-Brennelemente des Rossendorfer Forschungsreaktors RFR

BE-Typ		WWR-M einfach	WWR-M dreifach	WWR-M2 einfach	WWR-M2 dreifach
Max. BE-Länge (unbestrahlt, nominal)	[mm]	865			
Max. BE-Querschnitt (SW Außenrohr, unbestrahlt, nom.)	[mm]	35	70	35	70
Max. Masse	[kg]	1,1	3,3	1,1	3,3
Max. Anfangsanreicherung U-235	[%]	37,3	37,3	36,6	36,6
Max. Anfangsmasse Uran	[g]	112,5	335,6	124,9	374,7
Max. Anfangsmasse U-235	[g]	41,4	123,5	45,7	137,1
Max. Abbrand	[MWd/BE]	29,4	79,1	11,6	35,0
Min. Abklingzeit ¹	[a]	11	11,1	6,9	7,1
Max. Nachzerfallsleistung	[W]	1	3	1	3

1: vor Beladung des CASTOR®-Behälters

3.5 Brennelemente des Forschungsreaktors München FRM II

In der Tabelle 3-6 sind die Spezifikationswerte der Kompaktbrennelemente des Forschungsreaktors München FRM II aufgeführt /BfS 2005/.

Tabelle 3-6: Spezifikationswerte für Kompaktbrennelemente des Forschungsreaktors München FRM II

Max. BE-Länge (geschnitten)	[mm]	906
Max. BE-Durchmesser (Kopfteil entfernt)	[mm]	244
Max. Masse	[kg]	45
Max. Anfangsanreicherung U-235	[%]	93,2
Max. Anfangsmasse Uran	[g]	8.186
Max. Anfangsmasse U-235	[g]	7.613
Max. Abbrand	[MWd/BE]	1.040 ²
Min. Abklingzeit ¹	[a]	5,0 ³
Max. Nachzerfallsleistung	[W]	60

1: vor Beladung des CASTOR®-Behälters

2: 1.300 /GNS 2011/

3: 6,5 /GNS 2011/

3.6 Brennelemente des Forschungsreaktors Berlin BER II

Die Tabelle 3-7 enthält die Spezifikationswerte der kastenförmigen MTR-Brennelemente des Forschungsreaktors Berlin BER II /BfS 2005/.

Tabelle 3-7: Spezifikationswerte für kastenförmige MTR-Brennelemente des Forschungsreaktors Berlin BER II

Max. BE-Länge (unbestrahlt, nominal)	[mm]	874	
Max. BE-Querschnitt (unbestrahlt, nominal)	[mm x mm]	81 x 77	
Max. Masse	[kg]	7,0	
Anreicherungstyp		HEU	LEU
Max. Anfangsanreicherung U-235	[%]	95,4	20,2
Max. Anfangsmasse Uran	[g]	207	1.673
Max. Anfangsmasse U-235	[g]	184	327
Max. Abbrand	[MWd/BE]	76	187
Min. Abklingzeit ¹	[a]	4,5	
Max. Nachzerfallsleistung	[W]	25	

1: vor Beladung des CASTOR®-Behälters

3.7 Brennelemente des Forschungsreaktors Mainz FRMZ

Die Tabelle 3-8 enthält die Spezifikationswerte für TRIGA-Brennelemente des Forschungsreaktors Mainz FRMZ /BfS 2005/.

Tabelle 3-8: Spezifikationswerte für TRIGA-Brennelemente des Forschungsreaktors Mainz FRMZ

Max. BE-Länge (z. T. geschnitten)	[mm]	733	
Max. BE-Durchmesser (unbestrahlt, nominal)	[mm]	38,5	
Max. Masse	[kg]	3,5	
Hüllrohrmaterial		Aluminium	Edelstahl
Max. Anfangsanreicherung U-235	[%]	21,8	20,6
Max. Anfangsmasse Uran	[g]	201	
Max. Anfangsmasse U-235	[g]	39,2	
Max. Abbrand	[MWd/BE]	5	
Min. Abklingzeit ¹	[a]	1,0	
Max. Nachzerfallsleistung	[W]	0,35	

1: vor Beladung des CASTOR[®]-Behälters

4 Charakteristik der Brennelemente/Brennstäbe

In den folgenden Kapiteln erfolgt eine weitere Charakterisierung der Brennelemente/Brennstäbe aus den Versuchs- und Prototyp-Kraftwerken sowie aus den Forschungsreaktoren. Diese Daten wurden aus den Angaben der Betreiber der Versuchs- und Prototyp-Kraftwerken sowie der Forschungsreaktoren, aus den Angaben der Brennelement/Brennstab-Hersteller, aus der Suche mit der INIS-Datenbank, aus der Suche mit der Datenbank „Juelicher Wissenschaftliche Elektronische Literatur (JUWEL)“ und aus Tagungsbeiträgen ermittelt.

4.1 Brennelemente der Arbeitsgemeinschaft Versuchsreaktor (AVR)

Die Brennelemente der Arbeitsgemeinschaft Versuchsreaktor (AVR-BE) enthalten Kernbrennstoff in Form von beschichteten Teilchen (coated particles), die im Kern Uran, Thorium-Uran oder Thorium in karbidischer oder oxidischer Form enthalten und von den Schichten aus Pyrokohlenstoff oder Siliciumcarbid bedeckt sind. Die beschichteten Teilchen sind in einer Graphitmatrix eingebettet und von einer ca. 5 mm dicken Graphitschale umgeben. /BfS 2005a/.

Auf dem Kern der coated particles sind mehrere verschiedene Schichten aus Pyrokohlenstoff (PyC) oder Siliziumcarbid (SiC) abgeschieden. Die TRISO-Partikel sind 2-fach mit PyC beschichtet und mit einer SiC-Zwischenschicht (tri-isotropic); die BISO-Partikel sind 2-fach mit PyC beschichtet (bi-isotropic). Im Rahmen der HTR- und HTR-BE-Entwicklung wurde eine Vielzahl von Brennelementen getestet und hinsichtlich ihrer Eignung für einen Einsatz im HTR untersucht. Eine Übersicht der im AVR eingesetzten Brennelemente sind in der Tabelle 4-1 dargestellt /Battelle 1991/, /FZJ 2000/.

Tabelle 4-1: Charakteristik der AVR-BE

Brennelementtyp		Brennstoff	Beschichtung der Partikel	Brennstoff pro BE			Zahl der im AVR eingesetz- ten BE ¹	Zahl der im AVR eingesetz- ten BE ²
				U-235 [g]	U _{ges} [g]	Th [g]		
Erstkern-BE		(U, Th) C ₂	HTI-BISO	1,00	1,08	5	30.155	30.155
Tapeten-BE		(U, Th) C ₂	HTI-BISO	1,00	1,07	5	7.504	7.504
Isostatisch gepresst	karbidisch	(U, Th) C ₂	HTI-BISO	1,00	1,08	5	50.840	50.794
	oxidisch	(U, Th) O ₂	HTI-BISO	1,00	1,08	5	72.418	90.369
		(U, Th) O ₂	LTI-TRISO	1,00	1,08	5	6.083	
	(THTR-BE)	(U, Th) O ₂	HTI-BISO	0,96	1,03	10,2	35.415	35.415
	getrennte Abbrand- und Brutpartikel	UO ₂ , ThO ₂	LTI-BISO, LTI-BISO	1,00	1,08	10	1.440	20.340
		UO ₂ , ThO ₂	LTI-TRISO, LTI-BISO	1,00	1,08	10	1.610	
		UC ₂ , ThO ₂	LTI-TRISO, LTI-BISO	1,00	1,08	5	6.067	
		UC ₂ , ThO ₂	LTI-TRISO, LTI-BISO	1,00	1,08	5	5.860	
		UCO, ThO ₂	LTI-TRISO, LTI-TRISO	1,00	1,08	5	5.363	
	oxidisch, niedrig angereichert	UO ₂	LTI-BISO	1,40	20	-	2.400	2.400
		UO ₂	LTI-BISO	1,00	10	-	24.611	24.611
		UO ₂	LTI-BISO	1,00	6	-	29.090	29.090
Summe							278.856	290.705

1) aus /Battelle 1991/; 2) aus /FZJ 2000/

In der Abbildung 4-1 sind die Brennelement-Kugeln der beiden Hochtemperaturreaktoren abgebildet.

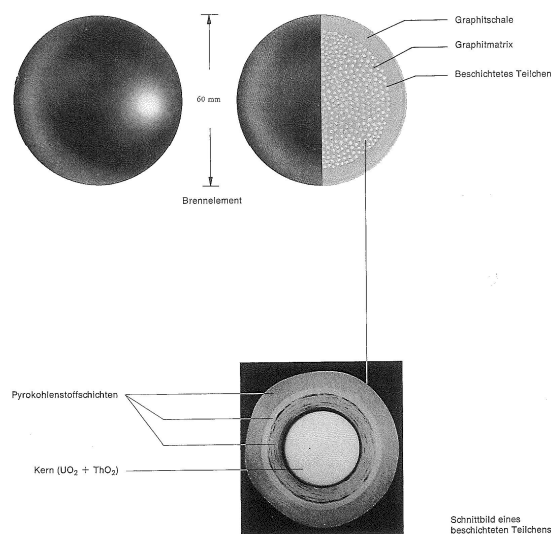


Abbildung 4-1: Brennelement der Hochtemperaturreaktoren AVR und THTR 300

4.2 Brennelemente des Thorium-Hochtemperaturreaktors (THTR 300)

Die Brennelemente des Thorium-Hochtemperaturreaktor (THTR-BE) enthalten wie die AVR-BE Kernbrennstoff in Form von beschichteten Teilchen (coated particles), die im Kern Uran, Thorium-Uran oder Thorium in karbidischer oder oxidischer Form enthalten und von den Schichten aus Pyrokohlenstoff oder Siliciumcarbid bedeckt sind. Die beschichteten Teilchen sind in einer Graphitmatrix eingebettet und von einer ca. 5 mm dicken Graphitschale umgeben /BfS 2005a/.

Im THTR 300 wurden isostatisch gepresste Brennelemente vom Typ THTR-BE (siehe Tabelle 4-1) eingesetzt. Insgesamt handelt es sich dabei um eine Anzahl von 619.804 Stück. Da nicht alle Brennelemente aus dem Kern entladen werden konnten, ist ein geringer Anteil (ca. 2.000 Stück) im Kern verblieben. /FZJ 2000/. Aus diesem Grund sind für eine Endlagerung in Deutschland eine Anzahl von 617.606⁴ Brennelemente (vgl. Tabelle 2-1) zu berücksichtigen. Zu den Abbrandmessreaktor-Brennelementen sind keine weiteren Daten verfügbar.

4.3 Brennstäbe der Kompakten Natriumgekühlten Kernreaktoranlage KNK II

Die Brennstäbe der Kompakten Natriumgekühlten Kernreaktoranlage KNK, die für eine Endlagerung in Deutschland zu berücksichtigen sind, sind in den Forschungszentren Cadarache (Frankreich) und Mol (Belgien) zwischengelagert worden.

Bei den Brennstäben aus der Kompakten Natriumgekühlten Kernreaktoranlage KNK aus dem Forschungszentrum Cadarache handelt es sich um 2.413 bestrahlte Brennstäbe aus 27 Brennelementen mit U-/Pu-Mischoxidbrennstoff. Die maximale Anfangsanreicherung an U 235 beträgt 93 %, der maximale Pu-Gehalt beträgt ca. 35 %. Die Brennstäbe sind in insgesamt 33 Brennstabbüchsen vom Typ KfK bzw. CEA verpackt /JK 2006/.

Bei den Kernbrennstoffen des KNK II, die zwischenzeitlich für Bestrahlungsexperimente im belgischen Forschungszentrum Mol genutzt wurden, handelt es sich um 68 bestrahlte Brennstäbe mit U-/Pu-Mischoxidbrennstoff sowie drei unbestrahlte Brennstäbe mit U-/Pu-Carbidbrennstoff aus dem europäischen Versuchsprogramm für die Entwicklung Schneller Brüter, an dem das Forschungszentrum Karlsruhe beteiligt war. 19 der bestrahlten KNK-Brennstäbe liegen als ein Brennstoffbündel vor, das für Nuklearexperimente verwendet wurde. Die maximale Anfangsanreicherung an U-235 beträgt 93 %, der maximale Pu-Gehalt 30 % /JK 2006/.

In der Abbildung 4-2 ist ein Brennstab und ein Brennelement der Kompakten Natriumgekühlten Kernreaktoranlage dargestellt /Interatom 1986/.

⁴ Gemäß dem Schreiben vom 02.02.2012 der HKG(Hochtemperatur-Kernkraftwerk GmbH) handelt es sich um 617.606 BE anstatt der im Dezember 2011 angegebenen 617.878 BE /HKG 2012/.

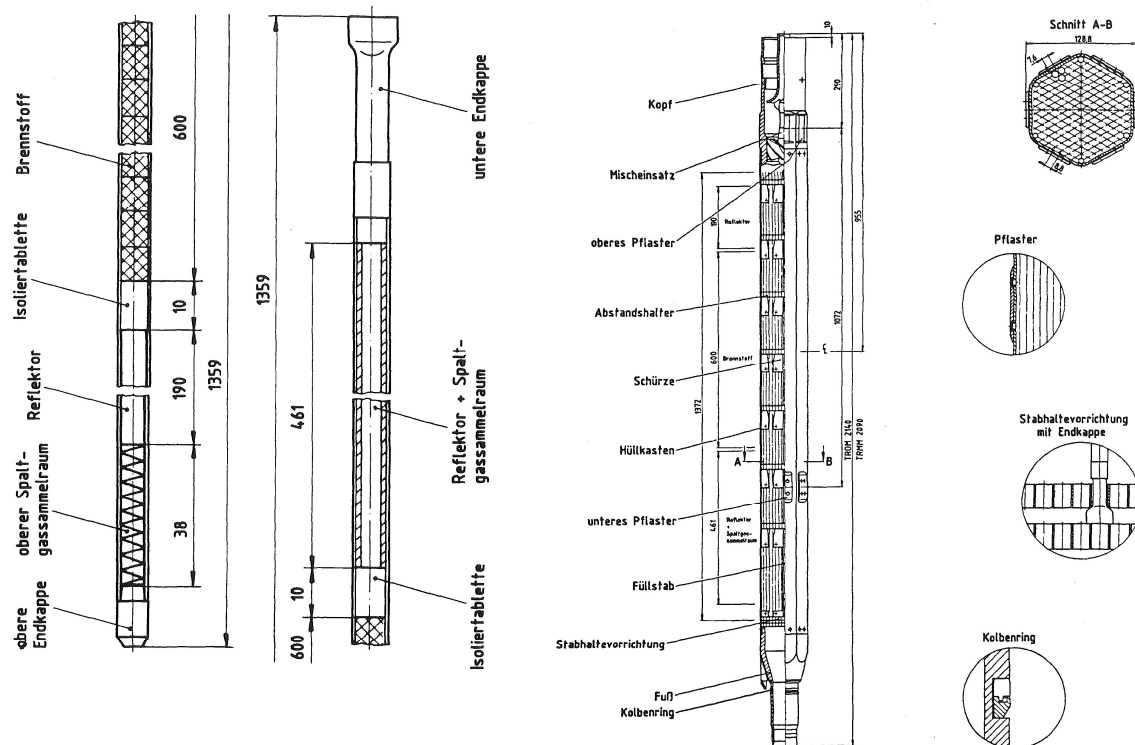


Abbildung 4-2: Brennstab (links) und Brennelement (rechts) der Kompakten Natriumgekühlten Kernreaktoranlage

Die Treiberzonenelemente des 3. Kerns der Natriumgekühlten Kernreaktoranlage KNK II bestehen aus dem Kopf mit dem Mischeinsatz, dem Hüllkasten mit dem Brennstabbündel und dem Fuß. Die Brennstäbe bestehen aus der unteren Endkappe, dem Stützrohr im unteren Spaltgassammelraum, der unteren Isoliertablette, der Brennstofftablettensäule, der oberen Isoliertablette, der oberen Reflektorstange, der Feder im oberen Spaltgassammelraum und der oberen Endkappe.

Der Brennstoff in allen Brennstäben der Treiber Elemente besteht aus UO_2 -Tabletten mit einer U-235 Anreicherung von 60 % (für Treiberzonenelemente mit Moderator - TRMM) und 50 % (für Treiberzonenelemente ohne Moderator - TROM). In zwei Reserve-Treiber Elementen mit Moderatorstäben sind Brennstäbe aus der Fertigung für den 2. Kern enthalten. Die konstruktiven Auslegungsdaten der Brennstäbe sind in der Tabelle 4-2 dargestellt /Interatom 1986/.

Tabelle 4-2: Konstruktive Auslegungsdaten Brennstäbe KNK II

BE-Typ		3. Kern TROM	3. Kern TRMM
Hüllrohr		Werkstoff Nr. 1.4970 kaltverformt	
Außendurchmesser	[mm]	7,6	
Innendurchmesser	[mm]	6,6	
Brennstoff		UO ₂	
Tablettendurchmesser	[mm]	6,41	
Dishing	[Vol-%]	2,0	
Tablettendichte	[%TD]	91,0	
Theoretische Dichte	[g/cm ³]	10,89	10,90
U-235-Anreicherung	[%]	60	50
Stöchiometrie		2,00	
Längengewicht	[g/cm]	3,13	3,14
Schmierdichte	[%TD]	84,1	
Säulenlänge	[mm]	600	
Reflektor		Werkstoff Nr. 1.4541	
Außendurchmesser (oben)	[mm]	6,0	
Außendurchmesser (unten)	[mm]	6,0	
Innendurchmesser (unten)	[mm]	3,84	
Säulenlänge (oben)	[mm]	190	
Säulenlänge (unten)	[mm]	461	
Isoliertablette		Werkstoff Al ₂ O ₃	
Außendurchmesser	[mm]	6,0	
Tablettenhöhe	[mm]	10,0	
Stab			
Füllgas He/Ar/Sonst.	[Vol-%]	85 / 10 / 5	
Füllgasdruck	[bar]	1,0	
Länge des - oberen Plenumm - unteren Plenums	[mm] [mm]	38 461	
Strukturteil im - oberen Plenumm - unteren Plenums	[Vol-%] [Vol-%]	14,1 48,8	

4.4 Brennstäbe des Nuklearschiffes Otto-Hahn

Während der Betriebszeit der Otto-Hahn wurden zwei unterschiedliche Kerne mit jeweils 16 Brennelementen (12 quadratische und 4 in Dreiecksform) verwendet /BfS 2004/. Der erste Kern der Otto-Hahn bestand aus UO₂ mit einer mittleren U-235-Anreicherung von 4,03 % und einer Gesamtbrennstoffmasse von 2.810 kg. Als Hüllrohrmaterial der Brennstoffrohre wurde rostfreier Stahl eingesetzt /BfS 2004/. Der zweite Kern der Otto-Hahn bestand aus UO₂ mit einer mittleren U-235-Anreicherung von 5,42 % und einer Gesamtbrennstoffmasse von 2.312 kg. Als Hüllrohrmaterial der Brennstoffrohre wurde Zirkaloy-4 eingesetzt /BfS 2004/.

Bei den Kernbrennstoffen des Nuklearschiffes Otto-Hahn, die für eine Endlagerung zu berücksichtigen sind, handelt es sich um 49 bestrahlte und drei unbestrahlte Brennstäbe mit U-

Brennstoff aus dem Reaktor des Nuklearschiffs. Die maximale Anfangsanreicherung an U-235 beträgt 6,6 % /JK 2006/.

4.5 Brennelemente des Rossendorfer Forschungsreaktors RFR

Der Rossendorfer Forschungsreaktor RFR wurde von 1957 bis 1967 mit Brennelementen des Typs EK-10 betrieben. Mit der Leistungserhöhung des Reaktors von 10 MW auf 20 MW kamen von 1967 bis Ende 1986 WWR-M Brennelemente und nach der Rekonstruktion des RFR ab Ende 1989 WWR-M2 Brennelemente zum Einsatz. Die Letztgenannten beiden Typen sind geometrisch identisch und unterscheiden sich nur im Urangehalt /VTKA 1994/.

Die EK-10 Brennelemente mit Al-Blechgehäuse als Halterung für 16 Brennstäbe haben einen quadratischen Querschnitt und sind entweder 0-fach abgeschrägt oder mit 2 und 3 abgeschrägten Kanten (2- und 3-fach abgeschrägt). Die WWR-M/M2 Brennelemente haben einen hexagonalen Querschnitt als Einzelbrennelement (BE einfach) und als Dreier-Verbund (BE dreifach). Darüber hinaus sind 16 einzelne Brennstäbe aus einem demontierten EK-10 Brennelement in einem Brennstabbehälter zu entsorgen. Anzahl und weitere charakteristischen Daten zu den Brennelementen sind in der Tabelle 4-3 enthalten /VTKA 1994/.

Tabelle 4-3: Charakteristik der EK-10-Brennelemente (RFR)

Anzahl	[Stück]	147 BE + 16 BS
Anzahl BS pro BE	[Stück]	16
Masse BE	[kg]	3,25
Masse BS	[kg]	0,17
Abmessungen BE	[mm]	68 x 68 x 750
Abmessungen BS	[mm]	Ø 10 x 587
Äußere Kontur BE		Rechteck 0-, 2-, 3-fach abgeschrägt
Brennstofflänge	[mm]	500
Brennstoffdicke	[mm]	Ø 7
Cladding BS	[mm]	1,5 Al
Wanddicke BE-Gehäuse	[mm]	2,0 Al
Anfangsmasse Uran im BE	[g]	1,287,5 ¹⁾
Anfangsmasse Uran im BS	[g]	76,2 ¹⁾
Anfangsmasse U-235 im BE	[g]	128,8 ¹⁾
Anfangsmasse U-235 im BS	[g]	7,6 ¹⁾
Anreicherung U-235	[%]	10
Mittlere Standzeit	[d]	201
Mittlere Leistung	[MW/t]	70
Mittlerer Abbrand	[MWd/t]	14.165
Mittlere Abklingzeit (bis 31.12.1995)	[d]	10.343
Brennstoffmatrix		UO ₂ -Mg; 13 Gew.%

¹⁾ Berechnete Mittelwerte aus Gesamtmasse und Stückzahl

Die WWR-M-Brennelemente haben einen hexagonalen Querschnitt und liegen als Einzel-Brennelement (BE einfach) oder als Dreier-Verbund (BE dreifach) vor. Die WWR-M2-Brennelemente unterscheiden sich von den WWR-M-Brennelementen durch einen höheren

Spaltstoffanteil. Die charakteristischen Daten zu den Brennelementen sind in der Tabelle 4-4 enthalten /VKTA 1994/.

Tabelle 4-4: Charakteristik der WWR-M/M2-Brennelemente (RFR)

BE-Typ		WWR-M Einfach	WWR-M Dreifach	WWR-M2 Einfach	WWR-M2 dreifach
Anzahl	[Stück]	269	456	42	36
Brennstoffrohre		3	9	3	9
Masse eines BE	[kg]	1,03	3,03	1,03	3,03
Abmessungen BE SW x L	[mm]	35 x 865	70 x 865	35 x 865	70 x 865
Äußere Kontur BE		Sechskant- rohr	Verbund von 3 Sechskant- rohren	Sechskant- rohr	Verbund von 3 Sechskant- rohren
Abmessungen Brennstoffrohre SW x W D x W D x W	[mm] [mm] [mm]	SK 32 x 2,5 Ø 22 x 2,5 Ø 11 x 2,5	Verbund von 3 BE einfach	SK 32 x 2,5 Ø 22 x 2,5 Ø 11 x 2,5	Verbund von 3 BE einfach
Brennstofflänge	[mm]	600	600	600	600
Brennstoffdicke	[mm]	0,7	0,7	1,0	1,0
Cladding der Brennstoffrohre	[mm]	0,9 Al	0,9 Al	0,75 Al	0,75 Al
Anfangsmasse Uran im BE	[g]	105,5 ¹⁾	316,6 ¹⁾	122,2 ¹⁾	366,6 ¹⁾
Anfangsmasse U-235 im BE	[g]	38,4 ¹⁾	115,3 ¹⁾	44,3 ¹⁾	132,9 ¹⁾
Anreicherung U-235	[%]	36	36	36	36
Mittlere Standzeit	[d]	559		157	
Mittlere Leistung	[MW/t]	312		598	
Mittlerer Abbrand	[MWd/t]	174.408		93886	
Mittlere Abklingzeit (bis 31.12.1995)	[d]	7522		1636	
Brennstoffmatrix		UO ₂ -Al-Dispersion			

¹⁾ Berechnete Mittelwerte aus Gesamtmasse und Stückzahl

In der Abbildung 4-3 sind Brennelemente des RFR schematisch dargestellt /VKTA 994/.

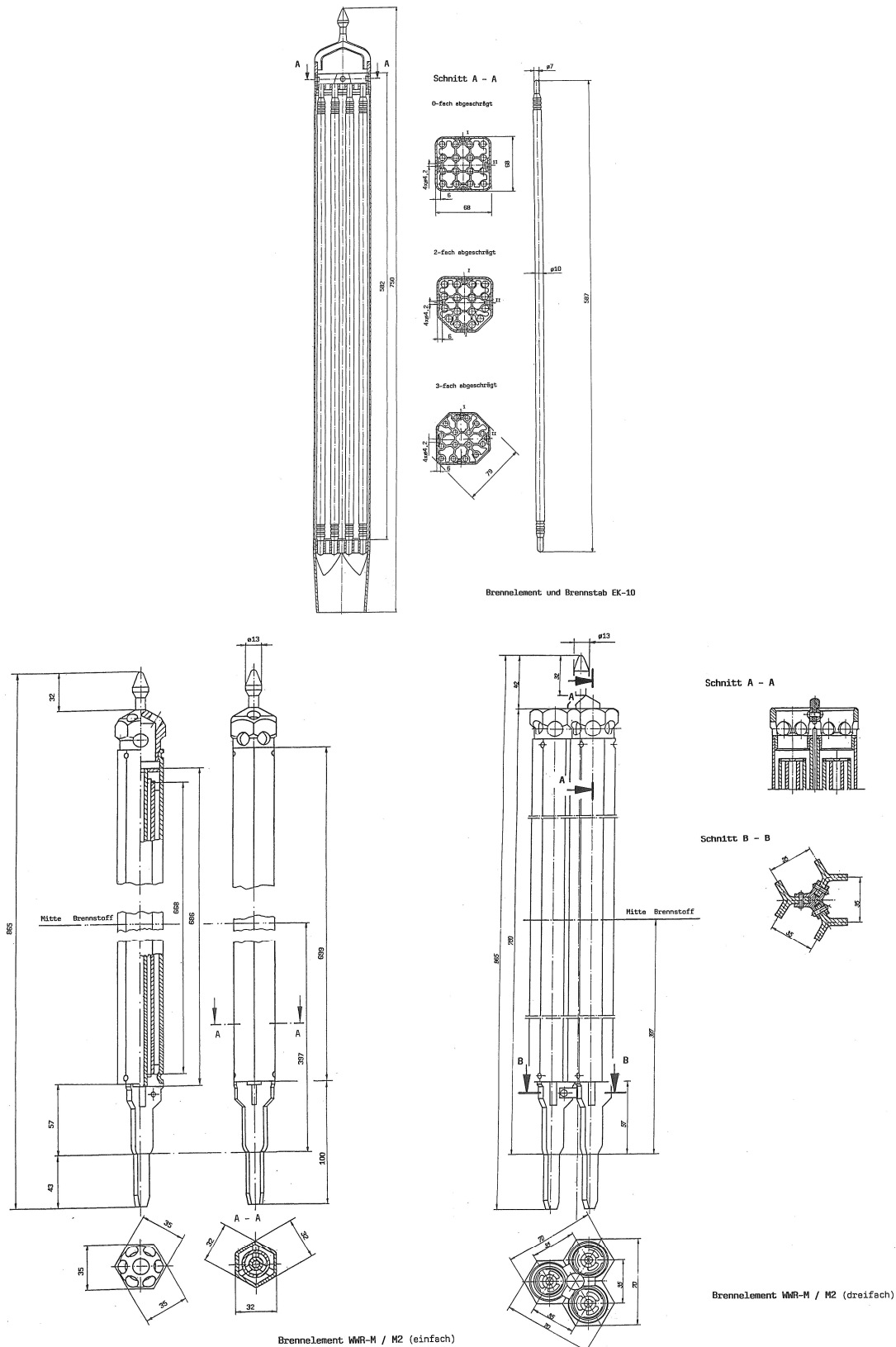


Abbildung 4-3: Brennelemente des RFR

4.6 Brennelemente des Forschungsreaktors München FRM II

Der Kern des FRM II besteht aus einem zylindrischen Brennelement mit einer aktiven Höhe von 70 cm, einem Außendurchmesser von 24,3 cm und einem Innendurchmesser von ca. 11,8 cm. Im Innenkanal wird der Regelstab bewegt. Insgesamt ist das Brennelement ca. 1,3 m hoch und am oberen Ende mit einem äußeren Kugelsitz zur Fixierung in der Betriebsposition versehen /FRM2 2011/. Das Brennelement enthält bei einer Anreicherung von ca. 93 % eine Menge von ca. 7.500 g U-235 und eine Gesamtmasse von ca. 8.100 g Uran /RRFM 2004/.

Zwischen dem Außen- und dem Innenrohr des Brennelements sind 113 identische Brennstoffplatten eingeschweißt. Jede der Platten ist 1,36 mm dick und evolenförmig geformt, so dass die Abstände zwischen ihnen überall gleich sind. Zwischen den Brennstoffplatten befinden sich 2,2 mm große Zwischenräume, durch die das Kühlwasser strömt. /www.frm2/tum.de/. Jede der Brennstoffplatten enthält ca. 66 g spaltbares Material /RRFM 2004/.

Die Brennstoffplatten werden mit der sogenannten Bilderrahmenteknik hergestellt. Sie bestehen aus drei Schichten. Außen jeweils eine Schicht aus einer Aluminiumlegierung (AlFeNi) und innen eine Schicht aus U_3Si_2 in einer Aluminium-Matrix /RRFM 2004/. Bei der Bilderrahmenteknik werden Brennstoffpulver und Aluminiumpulver homogen vermischt und zum Bildchen (Brennstoffkern) verpresst. Dieses wird in einem Rahmen aus Aluminiumblech eingesetzt und mit Deckblechen abgedeckt. Durch Walzen mit erhöhter Temperatur werden Rahmen und Brennstoff mit den Deckblechen fest verbunden. Während dieser Walzverformung wird das Hüllrohrmaterial mit dem Aluminium des Brennstoffkerns in mehreren Schritten bei unterschiedlichen Temperaturen so fest verschweißt, dass eine stoffschlüssige Verbindung zwischen Brennstoffkern und Hülle entsteht. Zur Erhöhung der Korrosionsbeständigkeit werden die Brennstoffplatten oberflächenvergütet. /NUKEM 1992/

Zur optimalen Verteilung der Leistungsdichte ist in dem Brennelement Brennstoff in zwei unterschiedlichen Dichten enthalten. Vorwiegend handelt es sich um Brennstoff mit einer Dichte von $3,0 \text{ g/cm}^3$. In einem schmalen Außenstreifen wird Brennstoff mit einer Dichte von $1,5 \text{ g/cm}^3$ verwendet /RRFM 2004/. Die Zyklusdauer eines Brennelements beträgt ca. 50 Tage bei einer konstanten thermischen Leistung von 20 MW /FRM2 2011/.

In der Abbildung 4-4 ist ein Brennelement des FRM 2 dargestellt /FRM2 2011/.

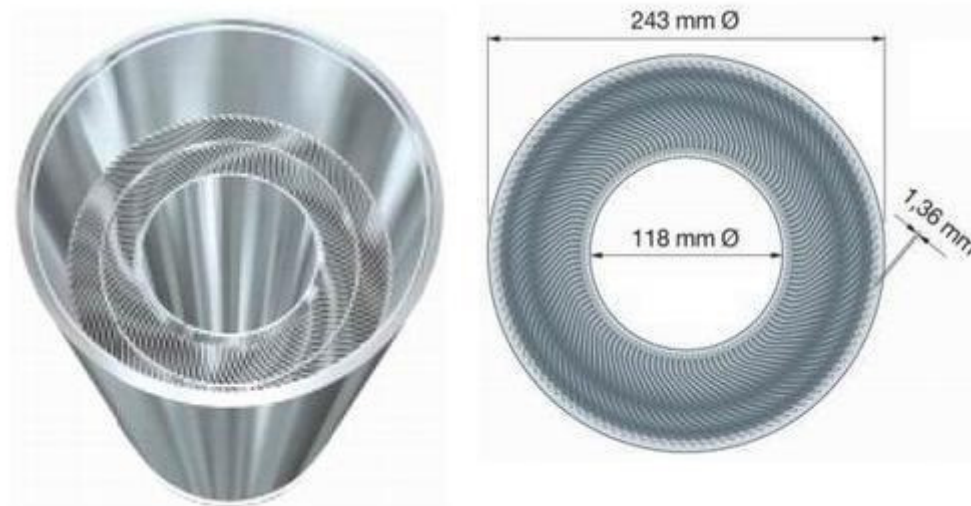


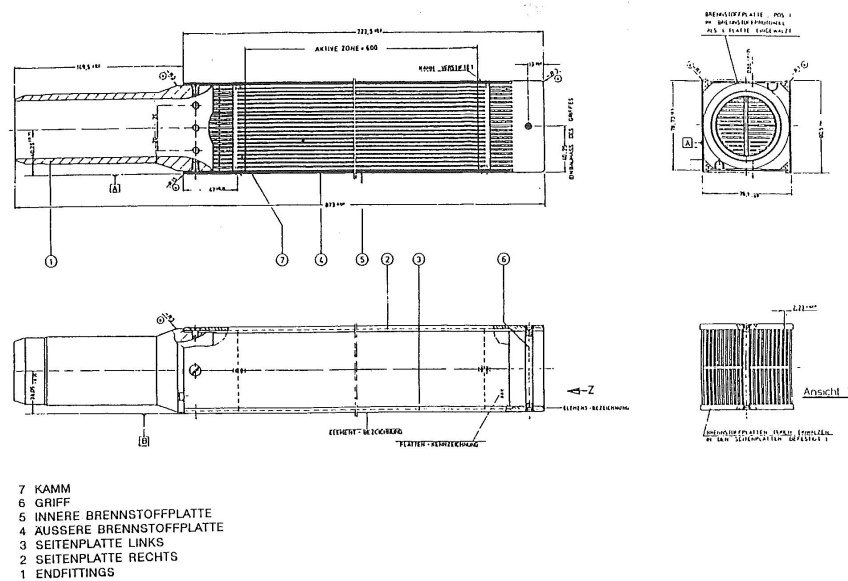
Abbildung 4-4: Brennelement des FRM 2

4.7 Brennelemente des Forschungsreaktors Berlin BER II

Der Kern des BER II besteht aus sogenannten MTR-Brennelementen, die in vielen Forschungsreaktoren eingesetzt werden (z. B. FRG-1). Im BER II werden seit dem Jahr 2000 nur noch Brennelemente aus low enriched uranium (LEU) Brennstoff eingesetzt. Die MTR-Brennelemente sind kastenförmig und besitzen ebene Brennstoffplatten. Der Brennstoff ist in diesen Platten als dünne Schicht in einem Aluminiumrahmen mit Aluminiumdeckplatten zusammengewalzt /NUKEM 1992/. Diese Brennelemente werden nach der sogenannten Bilderrahmenteknik hergestellt (siehe Kapitel 4.6) /NUKEM 1992/.

Typische Maße für die Dicke der Brennstoffplatten sind 1,36 mm Plattenstärke mit einer ca. 0,6 mm dicken Brennstoffschicht und einer ca. 0,38 mm dicken Aluminiumhüllung. Die Plattendistanz im Brennelement beträgt ca. 2,2 mm. Der Hohlraumanteil der Brennelemente liegt bei etwa 30 % /NUKEM 1992/.

In der Abbildung 4-5 ist ein Brennelement des BER II schematisch dargestellt /NUKEM 1992/.


Abbildung 4-5: Brennelement des BER II

4.8 Brennelemente des Forschungsreaktors Mainz FRMZ

Die Brennelemente des FRMZ sind stabförmig und bestehen aus einer homogenen Mischung von etwa 8 Gew. % Uran, mit einer U-235-Anreicherung von ca. 20 %, 91 Gew. % Zirkon und 1 Gew. % Wasserstoff. Das Zirkonhydrid bildet eine feste Verbindung, in die das Uran homogen eingelagert ist. Die Einlagerung des Spaltstoffes in Zirkonhydrid bewirkt, dass durch die Spaltung entstehende Gase nur schwer aus dem Gitter herausdiffundieren können /NUKEM 1992/. Des Weiteren fungiert das Zirkonhydrid als Moderator, der bei hohen Temperaturen schlechter moderiert /TUW 2004/. Das gesamte Brennelement ist mit einer relativ dicken Hülle aus Aluminium (0,76 mm /TUW 2004/) bzw. Stahl (0,51 mm /TUW 2004/) versehen, die heliumdicht verschweißt ist. Hohlräume innerhalb des Brennelements liegen in der Größenordnung von 1 % vor /NUKEM 1992/.

In der Abbildung 4-6 ist ein Brennstab und ein Brennelement des FRMZ abgebildet /TRIGA 2011/.

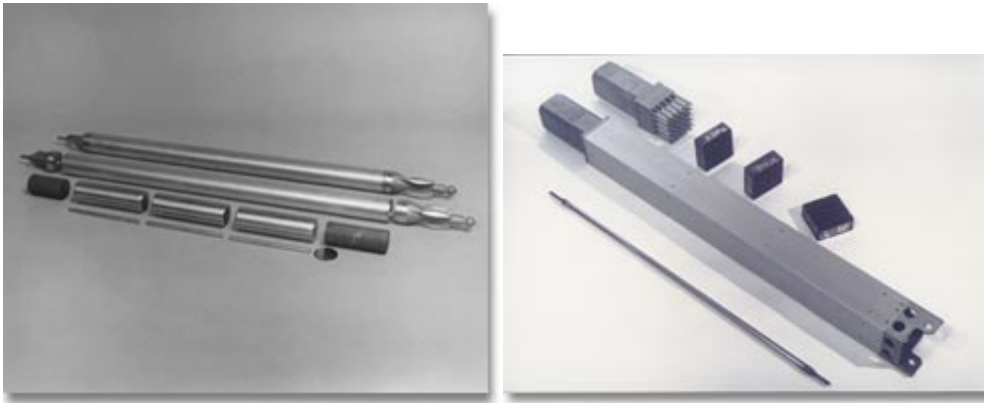


Abbildung 4-6: Brennstab (links) und Brennelement (rechts) des FRMZ

5 Konzeptionelle Überlegung zu den Endlagerbehältern

Für die Endlagerung ausgedienter Brennelemente aus Leistungsreaktoren werden zwei unterschiedliche Einlagerungsvarianten betrachtet. Dabei handelt es sich einerseits um die Einlagerung von vollabgeschirmten POLLUX[®]-Behältern in horizontalen Strecken und alternativ dazu um die Einlagerung von teilabgeschirmten Brennstabkokillen (BSK-3) in vertikalen Bohrlöchern. Als erste konzeptionelle Überlegung werden für die Endlagerung von ausgedienten Brennelementen/Brennstäben aus Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken sowie aus Forschungsreaktoren für die Streckenlagerung als abgeschirmte Behälter die Transport- und Lagerbehälter (CASTOR[®]) und für die Bohrlochlagerung die Brennstabkokille (BSK) betrachtet. In den Kapiteln 5.1 bis 5.3 wird ein zusammenfassender Überblick über die im Zusammenhang mit der Zulassung der Transport- und Lagerbehälter CASTOR[®] THTR/AVR, CASTOR[®] KNK und CASTOR[®] MTR 2 als Versandstück des Typs B(U) vorliegenden Beschreibungen der Verpackungen bzw. der Behälter gegeben. In Kapitel 5.4 erfolgt die Beschreibung der Brennstabkokillen BSK THTR/AVR, BSK KNK und BSK MTR.

5.1 CASTOR[®] THTR/AVR

Der Transport- und Lagerbehälter der Bauart CASTOR[®] THTR/AVR besteht aus einem zylindrischen Grundkörper aus Gusseisen mit Kugelgraphit und aus zwei übereinanderliegenden, einzeln abgedichteten Deckeln (Primär- und Sekundärdeckel) und enthält einen zylindrischen Innenraum zur Aufnahme einer THTR-Kanne (Inhalt 1) oder zwei ABL-Lagergestellbehältern (Inhalt 2) oder zwei AVR-Trockenlagerkannen (Inhalt 3). In Abhängigkeit vom Inhalt können drei unterschiedliche Varianten des Primärdeckels zum Einsatz kommen:

- Variante A mit dem Primärdeckel aus Gusseisen mit Kugelgraphit oder Stahl für die Inhalte 1 und 2.
- Variante B mit dem Primärdeckel aus Stahl für den Inhalt 3.
- Variante C mit untergeschraubter Abschirmplatte mit dem Deckel und der Abschirmplatte aus Stahl für die Inhalte 1 oder 2 /BfS 2007/.

Der Sekundärdeckel besteht aus Stahl. Über dem Sekundärdeckel befindet sich die Schutzplatte. Im oberen und unteren Bereich des Behältermantels sind jeweils zwei Bohrungen angebracht, in die oben zwei lange Tragzapfen für die Handhabung des Behälters und unten zwei kurze Tragzapfen für den Transport eingeschraubt werden /BfS 2007/.

Die dichte Umschließung wird gebildet mit dem Behälterkörper, dem verschraubten Primärdeckel mit seiner Metall-O-Ring-Dichtung und der verschraubten Schutzkappe im Primärdeckel mit seiner Metall-O-Ring-Dichtung („Dichte Umschließung Primärdeckel“) oder mit dem Behälterkörper, dem verschraubten Sekundärdeckel mit seiner Metall-O-Ring-Dichtung, der verschraubten Schutzkappe im Sekundärdeckel mit seiner Metall-O-Ring-Dichtung und dem verschraubten Blindflansch mit seiner Metall-O-Ring-Dichtung („Dichte Umschließung Sekundärdeckel“) /BfS 2007/.

Die Abbildung 5-1 zeigt eine schematische Darstellung eines CASTOR® THTR/AVR mit zwei AVR-Trockenlagerkannen für AVR-BE (linke Seite) und mit einer THTR-Kanne (Stahlkanne) für THTR-BE (rechte Seite).

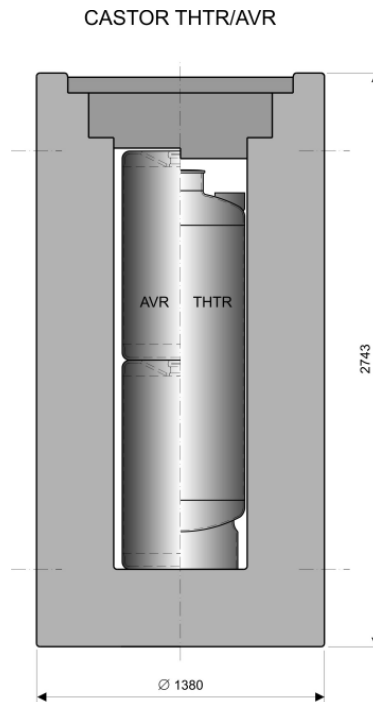


Abbildung 5-1: Schematische Darstellung eines CASTOR® THTR/AVR mit zwei AVR-TL-Kannen für AVR-BE (linke Seite) und mit einer THTR-Kanne (Stahlkanne) für THTR-BE (rechte Seite)

Der CASTOR® THTR/AVR ist für folgende Inhalte zulassen /BfS 2007/:

1. Bestrahlte (unbeschädigte und beschädigte) THTR-BE in einer THTR-Kanne (Stahlkanne, Bruchkanne, Abfallkanne). Anstelle der THTR-BE können in der THTR-Kanne auch (unbeschädigte und beschädigte) spaltstofffreie Betriebselemente (BTE) enthalten sein. Je Versandstück beträgt die Gesamtwärmeleistung max. 217 W und die Gesamtaktivität max. 1,5 PBq.
 - a) Beladevariante „Stahlkanne“
max. 2.110 THTR-BE mit einem max. Abbrand von 114 GWd/tSM und einer Mindestabklingzeit von 15 Jahren in einer Stahlkanne.
 - b) Beladevariante „Bruchkanne“
max. 2.320 THTR-BE mit einem max. Abbrand von 114 GWd/tSM und einer Mindestabklingzeit von 15 Jahren in einer Bruchkanne.
 - c) Beladevariante „Abfallkanne“
max. 2.100 THTR-BE mit einem max. Abbrand von 70 GWd/tSM und einer Mindestabklingzeit von 15 Jahren, zusammen mit ca. 0,5 kg Erodiergut und ca. 9 kg Molekularsieb (Metall-Aluminiumsilikat) sowie ca. 2 dm³ Rekombinationskatalysator (Al₂O₃ mit 5 Gew.-% Pd) in zwei Trägergehäusen, in einer Abfallkanne.

Die Spezifikation der Brennelemente ist in Tabelle 3-2 zusammengestellt.

2. Abbrandmessreaktor-Brennelemente (AMR-BE) mit insgesamt max. 2,58 kg Uran mit einem max. Abbrand von 0,13 GWd/tSM und einer Mindestabklingzeit von 15 Jahren in zwei AMR-BE-Lagergestellbehältern (ABL), die im Versandstück übereinander angeordnet sind. Je Versandstück beträgt die Gesamtwärmeleistung max. 0,7 W und die Gesamtaktivität max. 1,5 PBq.

Die Spezifikation der Brennelemente ist in Tabelle 3-3 zusammengestellt.

3. Maximal 1.900 bestrahlte (unbeschädigte) AVR-BE mit einem max. Abbrand von 194 GWd/tSM und einer Mindestabklingzeit von 15 Jahren in zwei AVR-Trockenlagerkannen, die im Versandstück übereinander angeordnet sind, wobei in einer AVR-TL-Kanne bis zu 960 AVR-BE enthalten sein können. Anstelle der AVR-BE können in den AVR-TL-Kannen auch (unbeschädigte) spaltstofffreie Betriebselemente (BTE) enthalten sein. Je Versandstück beträgt die Gesamtwärmeleistung max. 141 W und die Gesamtaktivität max. 1,5 PBq.

Die Spezifikation der Brennelemente ist in Tabelle 3-1 zusammengestellt.

Die Tabelle 5-1 enthält Angaben zu Werkstoffen und Massen der wesentlichen Behälterbauteile eines CASTOR[®] THTR/AVR /BfS 2007/, /HKG 1992/, /KFA 1988/.

Tabelle 5-1: Werkstoffe und Massen der wesentlichen Behälterbauteile eines CASTOR[®] THTR/AVR (unbeladen)

Bauteil	Werkstoff	Masse [kg]
Behältergrundkörper	Gusseisen mit Kugelgraphit	
Abschirmplatte	Stahl	
Primärdeckel	Gusseisen mit Kugelgraphit oder Stahl	
Sekundärdeckel	Stahl	
Primärdeckeldichtung	Metall	
Sekundärdeckeldichtung	Metall	
1 THTR-Kanne (Stahlkanne) für THTR-BE	Stahl	
2 AVR-TL-Kannen für AVR-BE	Stahl	
Summe		ca. 22.450

5.2 CASTOR[®] KNK

Der Transport- und Lagerbehälter CASTOR[®] KNK besteht im Wesentlichen aus einem dickwandigen zylindrischen Behälterkörper aus überwiegend ferritischem Gusseisen mit Kugelgraphit. Der Behälterschacht wird mit einem aufgeschraubten Primärdeckel aus Stahl und einer Metaldichtung verschlossen. Der Primärdeckel hat einen Handhabungsanschluss, der zur Befüllung des Schachtes mit einem Inertgas dient. Oberhalb des Primärdeckels wird

zusätzlich ein Sekundärdeckel aus Stahl mit einer Metaldichtung an den Behälterkörper angeschraubt. Oberhalb des Sekundärdeckels wird eine Schutzplatte aus Stahl montiert /JK 2006/.

Der Tragkorb zur Aufnahme der Brennstabbüchsen besteht im Wesentlichen aus neun Stahlrohren, die über sieben angeschweißte Stahlscheiben positioniert werden. Zur Einhaltung der Kritikalitätssicherheit der teilweise bis 93 % mit U-235 angereicherten Kernbrennstoffe werden rohrförmig gewalzte Bleche aus boriiertem Aluminium (20 Gew.-% Borcarbid) als Absorberkomponenten im Tragkorb eingesetzt /JK 2006/.

Ein Tragkorb nimmt jeweils 9 verschweißte Büchsen mit Kernbrennstoffen auf. Es existieren zwei Tragkorbvarianten. Die Variante 1 nimmt neun Büchsen vom Typ Phenix, die Variante 2 nimmt acht Büchsen vom Typ Phenix und in der zentralen Tragkorbposition eine Büchse vom Typ OH auf. Die Phenix-Büchsen enthalten Kernbrennstoffe aus der Kompakten Natriumgekühlten Kernreaktoranlage KNK II (33 Stück) und Kernbrennstoffe aus Nuklearexperimenten (2 Stück: Mol-1 und Mol-2). In der OH-Büchse sind Kernbrennstoffe aus dem Nuklearschiff Otto-Hahn verpackt /WTI 2006/. Die Abbildung 5-2 zeigt eine schematische Darstellung eines CASTOR® KNK mit Phenix-Büchsen.

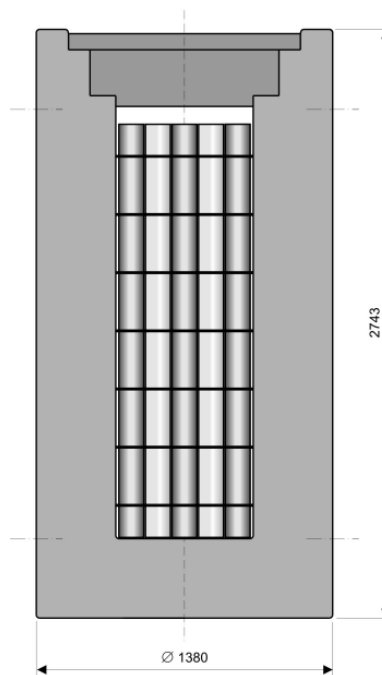


Abbildung 5-2: Schematische Darstellung eines CASTOR® KNK

Die Behälter der Bauart CASTOR® KNK dürfen wie folgt beladen werden /BfS 2009/:

1. Seriennummer 01 bis einschließlich 03:

- jeweils 9 CEA- bzw. KfK-Büchsen mit bestrahlten Brennstäben und in Kapseln eingeschweißten bestrahlten Brennstäben und Brennstabstücken aus der KNK II, jeweils verpackt in Phenix-Büchsen.

2. Seriennummer 04:

- 5 CEA-Büchsen und eine KfK-Büchse mit bestrahlten Brennstäben und in Kapseln eingeschweißten bestrahlten Brennstäben und Brennstabschnitten aus der KNK II, jeweils verpackt in Phenix-Büchsen, und
- 2 CEA-Büchsen mit bestrahlten und unbestrahlten Brennstäben der KNK II sowie einem bestrahlten Testelement aus dem Forschungszentrum Mol, jeweils verpackt in Phenix-Büchsen, und
- 1 OH-Büchse mit Brennstäben (intakt und defekt), verpackten Brennstab- und Hüllrohrabschnitten sowie Pelletbruchstücken des Schiffsreaktors Otto-Hahn.

Je Versandstück beträgt die Gesamtwärmeleistung max. 567 W und die Gesamtaktivität max. 4,7 E+15 Bq. Die Inventarmasse je Versandstück liegt bei max. 444 kg ohne Leermassen der zur Verpackung gehörenden Büchsen vom Typ Phenix und OH /BfS 2009/.

Die in der Tabelle 5-1 aufgeführten Angaben zu Werkstoffen und Massen der wesentlichen Behälterbauteile eines CASTOR® THTR/AVR gelten im Wesentlichen auch für CASTOR® KNK. Anstelle der AVR- und THTR-Kannen sind jedoch Brennstabbüchsen des Typs Phenix und OH zu berücksichtigen.

Zu den Phenix-Büchsen liegen folgende Angaben vor /BAM 2010/:

- $d_{\text{außen}} = 118 \text{ mm}$
- $h_{\text{außen}} = 1.974 \text{ mm}$
- $t = 5 \text{ mm}$
- $m_{\text{unbeladen}} = 34 \text{ kg}$
- Werkstoff 1.4306.

Zu den CEA/KfK- Büchsen liegen folgende Angaben vor /BAM 2010/:

- $d_{\text{außen}} = 103 \text{ mm}$
- $h_{\text{außen}} = 1.780 \text{ mm}$
- $t = 1,5 \text{ mm}$;
- $m_{\text{unbeladen}} = 8 \text{ kg}$
- Werkstoff 1.4306

5.3 CASTOR[®] MTR 2

Der Transport- und Lagerbehälter der Bauart CASTOR[®] MTR 2 besteht aus einem einteiligen, dickwandigen zylindrischen Behälterkörper mit Boden aus Gusseisen mit Kugelgraphit. Am oberen Zylinderende sind der Primärdeckel und der Sekundärdeckel angeordnet. Die dichte Umschließung wird gebildet durch den Behälterkörper und den Primärdeckel mit seinem Verschlussdeckel und den zugehörigen Metaldichtungen und Verschraubungen bzw. alternativ durch den Sekundärdeckel mit seinem Verschlussdeckel und dem Druckschalter oder Blindflansch mit den zugehörigen Verschraubungen und Metaldichtungen. Im Behälterinnenraum ist einer von sechs möglichen Tragkörben angeordnet /BfS 2005/⁵.

Die Abbildung 5-3 zeigt eine schematische Darstellung eines CASTOR[®] MTR 2. Es sind verschiedene Beladevarianten mit Brennelementen aus verschiedenen Forschungsreaktoren zulässig.

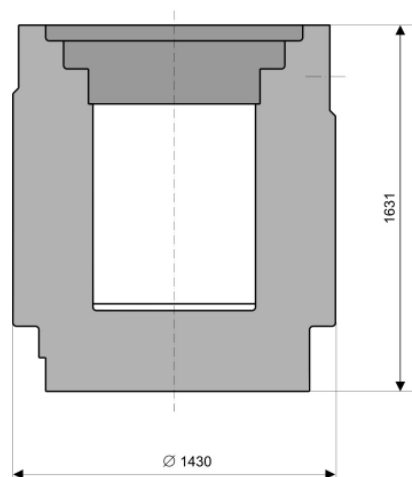


Abbildung 5-3: Schematische Darstellung eines CASTOR[®] MTR 2

Das Inventar des CASTOR[®] MTR 2 umfasst u. a. die in den Kapiteln 3.5 bis Kapitel 3.8 spezifizierten Brennelemente des RFR, FRM II, BER II und FRMZ mit einer Gesamtnachzerfallsleistung von max. 825 W und einem Gesamtaktivitätsinventar von max. 34,3 PBq. Der CASTOR[®] MTR 2 ist hinsichtlich der o. g. Forschungsreaktorbrennelemente für folgende Inhalte zugelassen /BfS 2005/:

1. Tragkorb 4/7 mit max. 7 Brennelement-Ladeeinheiten mit:
 - a) max. 21 WWR-M (einfach)-Brennelementen pro Ladeeinheit
(max. 147 WWR-M (einfach)-BE pro Behälter) oder
 - b) max. 7 WWR-M (dreifach)-Brennelementen pro Ladeeinheit

⁵ Seit Oktober 2011 liegt eine verkehrsrechtliche Zulassung für den CASTOR[®] MTR 2 mit einem angepassten Inventar vor. Für die damit nicht mehr erfassten Inventare ist eine weitere Zulassung in Vorbereitung (CASTOR[®] MTR 3) /GNS 2011/. Die in diesem Bericht enthaltenen Angaben zu CASTOR[®] MTR 2 haben daher z. T. auch Gültigkeit für den CASTOR[®] MTR 3, z. B. für die Beschreibung der Verpackungen bzw. Behälter einschließlich schematischer Darstellung; Angaben zum Inventar des CASTOR[®] MTR 2 betreffend FRM II, BER II und FRMZ werden zukünftig ausschließlich dem CASTOR[®] MTR 3 zugeordnet.

- (max. 49 WWR-M (dreifach)-BE pro Behälter) oder
- c) max. 21 WWR-M2 (einfach)-Brennelementen pro Ladeeinheit
(max. 147 WWR-M2 (einfach)-BE pro Behälter) oder
- d) max. 7 WWR-M2 (dreifach)-Brennelementen pro Ladeeinheit
(max. 49 WWR-M2 (dreifach)-BE pro Behälter) oder
- e) einer beliebigen Mischung der in diesem Punkt aufgeführten Brennelemente

Die Spezifikation der Brennelemente ist in Tabelle 3-5 (RFR) zusammengestellt.

2. Tragkorb 4/7 mit max. 7 Brennelement-Ladeeinheiten mit:

- a) max. 4 EK-10 Brennelementen (null, 2 oder 3 Fasen) pro Ladeeinheit
(max. 28 EK-10-BE pro Behälter)
- b) max. 3 EK-10 Brennelementen (null, 2 oder 3 Fasen) und
einem EK-10-Brennstab-Behälter mit max. 16 EK-10-Brennstäben pro Ladeeinheit
(max. 27 EK-10-BE und max. 7 EK-10-Brennstab-Behälter, in der Summe aber nicht
mehr als 28 EK-10-BE und EK-10-Brennstab-Behälter pro CASTOR[®] MTR 2)
EK-10-Brennstab-Behälter, die mit weniger als 16 EK-10 Brennstäben beladen sind,
werden bis zur maximalen Packungsdichte mit Dummy-Stäben aufgefüllt.

Die Spezifikation der Brennelemente und Brennstab-Behälter ist in Tabelle 3-4 (RFR) zusammengestellt.

3. Tragkorb 4/7 mit einer beliebigen Mischung von max. 7 Brennelement-Ladeeinheiten. Der Inhalt der genannten Brennelement-Ladeeinheiten und die Spezifikation der Brennelemente entsprechen denen, die für die Inventare der lfd. Nr. 1 und lfd. Nr. 2 beschrieben sind.

4. Tragkorb 6/5 mit max. 5 Kompakt-Brennelementen des Anreicherungstyps HEU.

Spezifikation der Brennelemente gemäß Tabelle 3-6 (FRM II).

5. Tragkorb 1/33 mit max. 33 kastenförmigen MTR-Brennelementen in einer beliebigen Kombination der Anreicherungstypen HEU und LEU.

Die Spezifikation der Brennelemente ist in Tabelle 3-7 (BER II) zusammengestellt.

6. Tragkorb 5/15 mit einer beliebigen Kombination von max. 15 Brennelement-Ladeeinheiten der Typen BEL-A1 (max. 6 TRIGA-BE pro Ladeeinheit) bzw. BEL-B1 (max. 5 TRIGA-BE pro Ladeeinheit).

Die Spezifikation der Brennelemente ist in Tabelle 3-8 (FRMZ) zusammengestellt.

Die Tabelle 5-2 enthält Angaben zu Werkstoffen und Massen der wesentlichen Behälterbauteile eines CASTOR[®] MTR 2 /BfS 2005/.

Tabelle 5-2: Werkstoffe und Massen der wesentlichen Behälterbauteile eines CASTOR® MTR 2 (unbeladen)

Bauteil	Werkstoff	Masse [kg]
Behältergrundkörper	Gusseisen mit Kugelgraphit	
Primärdeckel	Stahl	
Sekundärdeckel	Stahl	
Primärdeckeldichtung	Metall	
Sekundärdeckeldichtung	Metall	
Tragkorb für RFR	Aluminiumlegierung	
Tragkorb für FRM II	Aluminiumlegierung oder borierter Stahl	
Tragkorb für BER II	Stahl	
Tragkorb für FRMZ	Aluminiumlegierung	
Summe		ca. 15.170

5.4 Brennstabkokille

Als Alternative zur Endlagerung der Brennelemente/Brennstäbe aus Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken sowie aus Forschungsreaktoren in Transport- und Lagerbehältern der Bauart CASTOR® wird in diesem Kapitel die Endlagerung in Brennstabkokillen (BSK) betrachtet.

Als Alternative zur Endlagerung ausgedienter Brennelemente der Leistungsreaktoren in POLLUX®-Behältern in horizontalen Strecken wurde die Brennstabkokille für das Konzept der Bohrlochlagerung entwickelt. Die Brennstabkokille kann die gezogenen Brennstäbe aus 3 DWR-BE oder 9 SWR-BE (in zwei Brennstabbüchsen) aufnehmen. Die Geometrie der BSK-3 (mit Ausnahme der Länge) korrespondiert weitgehend zur HAW-Kokille. Dies eröffnet die Möglichkeit der Handhabung mit weitgehend identischen Hebezeugen und die Einlagerung in gleichkalibrigen Bohrlöchern. Im Rahmen des FuE-Vorhabens "Optimierung der Direkten Endlagerung durch Kokillenlagerung in Bohrlöcher (DENKMAL)" /DBETec 2010/ wurde ein technisch machbares Konzept zur Endlagerung von Brennstabkokillen in vertikale Bohrlöcher entwickelt und erprobt. Die Demonstrationsversuche erfolgten mit einem Brennstabkokillendummy und einem aus drei inaktiven HAW-Kokillen in einem Overpack bestehenden Endlagergebinde (Triplepack).

Die BSK besteht aus einem zylindrischen Behälterkörper mit 40 mm Wandstärke /GNB 1998a/ und einem angepressten oder angeschweißten Boden. Der Behälterkörper besteht wie der Primär- und Sekundärdeckel der BSK aus Stahl. Der innere Schachtraum wird zunächst durch Verschrauben mit einem Primärdeckel verschlossen. In einer Aussparung in der Deckelunterseite wird eine Moderatorplatte zur Neutronenabschirmung eingelegt. Über den Primärdeckel wird ein Sekundärdeckel aufgelegt, der mit dem Behälterkörper gasdicht verschweißt wird. Zur Handhabung des Behälters weist der Schweißdeckel einen Tragpilot auf.

Das Overpack des Triplepacks mit drei HAW-Kokillen besteht aus einem zylindrischen Behälterkörper mit 5 mm Wandstärke. Die HAW-Kokillen werden im Overpack mittels Abstandhaltern fixiert.

Bei der Endlagerung der Brennelemente/Brennstäbe aus Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken sowie aus Forschungsreaktoren kommt ebenfalls der Einsatz von zum Teil modifizierten Brennstabkokillen in Betracht. Im Folgenden werden für die Brennstabkokillen – sofern möglich – die bereits bekannten geometrischen Abmessungen der BSK-3 ($d_{\text{außen}} = 430 \text{ mm}$; $h_{\text{außen}} = 4.980 \text{ mm}$; $d_{\text{innen}} = 350 \text{ mm}$; $h_{\text{innen}} = 4.550 \text{ mm}$) verwendet. Dies hat den Vorteil, dass die Handhabung ebenfalls mit weitgehend identischen Hebezeugen und die Einlagerung in gleichkalibrigen Bohrlöchern erfolgen kann. Außerdem können die im Rahmen des FuE-Vorhabens "Optimierung der Direkten Endlagerung durch Kokillenlagerung in Bohrlöcher (DENKMAL)" /DBETec 2010/ entwickelten und erprobten technischen Komponenten (Einlagerungsmaschine, Transferbehälter und Bohrlochsleuse) verwendet werden.

Im ersten Ansatz wird die Anzahl der Brennelemente/Brennstäbe aus Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken sowie aus Forschungsreaktoren je Brennstabkokille ausschließlich unter geometrischen Gesichtspunkten abgeschätzt. An dieser Stelle wird allerdings darauf hingewiesen, dass die Beladung der Brennstabkokillen maßgeblichen Einfluss auf die Kritikalität haben kann. Da Rechnungen zum Nachweis der Kritikalitätssicherheit der im Folgenden beschriebenen Brennstabkokillen noch nicht durchgeführt wurden, ist die vorgeschlagene Beladung der Brennstabkokillen zum jetzigen Zeitpunkt als vorläufig anzusehen und zu einem späteren Zeitpunkt unter Berücksichtigung der dann vorliegenden Ergebnisse zu den Kritikalitätsrechnungen zu überprüfen bzw. anzupassen.

Für die Forschungsreaktoren RFR, FRM II, BER II und FRMZ wird die Anzahl der Brennelemente je BSK-3, d. h. BSK mit Standardabmessungen, abgeschätzt. Durch die Fixierung der Brennelemente in den BSK mittels Abstandhaltern ist für die Brennelemente der Forschungsreaktoren RFR, FRM II und BER II eine 5-lagige Beladung und für die Brennelemente des FRMZ eine 6-lagige Beladung möglich. Für die Kernbrennstoffe der KNK II und des Nuklearschiffs Otto-Hahn ist unter geometrischen Gesichtspunkten eine (2-lagige) Verpackung der Phenix-Büchsen und der OH-Büchse in BSK mit Standardabmessungen möglich.

Für die AVR- und THTR-BE wird eine Verpackung der AVR-TL-Kannen und THTR-Kannen in modifizierten BSK (BSK THTR/AVR_{BE-Kannen}, $d_{\text{außen}} = 705 \text{ mm}$; $h_{\text{außen}} = 4.980 \text{ mm}$; $d_{\text{innen}} = 625 \text{ mm}$; $h_{\text{innen}} = 4.550 \text{ mm}$) betrachtet. Durch die Fixierung der BE-Kannen in den BSK mittels Abstandhaltern ist eine 4-fach Beladung mit AVR-TL-Kannen und eine 2-fach Beladung mit THTR-Kannen möglich. Alternativ dazu wird eine Verpackung der BE-Kugeln von AVR und THTR als lose Schüttung in BSK mit Standardabmessungen (BSK THTR/AVR_{BE-Kugeln}) betrachtet. Auf Basis eines Vergleichs der Innenvolumina der BSK (ca. 438 l /GNB 1998a/) mit denen der AVR-TL-Kannen (ca. 220 l /FZJ 1993/) und der THTR-Kannen (443 l /HKG 1992/) wurde abgeschätzt, dass je BSK der Inhalt von zwei AVR-TL-Kannen bzw. einer THTR-Kanne verpackt werden kann.

Die Abbildung 5-4 zeigt die schematische Darstellung der BSK mit Standardabmessungen (analog BSK-3) und der modifizierten BSK.

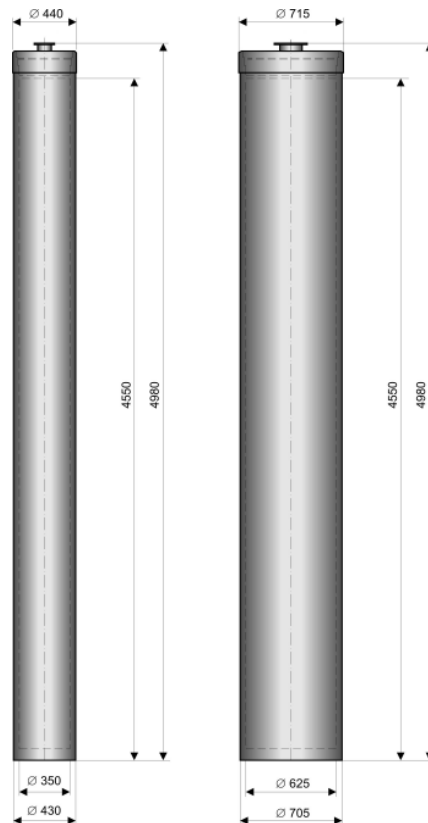


Abbildung 5-4: Schematische Darstellung der BSK mit Standardabmessungen (analog BSK-3) und der modifizierten BSK (BSK THTR/AVR_{BE}-Kannen)

Die Tabelle 5-3 gibt einen Überblick über Geometrie und Abmessungen der AVR-TL-Kannen, THTR-Kannen und Brennstabbüchsen des Typs Phenix und OH, die der Abschätzung der Beladung der BSK zu Grunde liegen /KFA 1988/, /HKG 1992/, /WTI 2006/.

Tabelle 5-3: Geometrie und Abmessungen der AVR-TL-Kannen, THTR-Kannen und Brennstabbüchsen des Typs Phenix und OH

Brennelementkannen/ Brennstabbüchsen	Länge/ Höhe [mm]	Durch- messer [mm]	Wand- dicke [mm]	Material	Masse beladen [kg]
AVR-TL-Kannen	1.000	559	6,3	Stahl	ca. 350
THTR-Kannen	1.900	622	8	Stahl	ca. 700
Brennstabbüchsen Typ Phenix	1.974	118	5	Stahl	ca. 90 ¹⁾
Typ OH	1.974	139,7	4	Stahl	Keine Angabe

1) abgeschätzt mit folgenden Angaben: Inventarmasse je CASTOR[®] KNK mit 9 Büchsen vom Typ Phenix zzgl. 34 kg Eigengewicht Phenix-Büchse zzgl. 8 kg Eigengewicht CEA/KfK-Büchse;

In der Abbildung 5-5 sind die vorher genannten BE-Kannen schematisch dargestellt. In der Abbildung 5-6 ist die Beladung der BSK mit den vorher genannten. BE-Kannen und Brennstabbüchsen schematisch dargestellt.

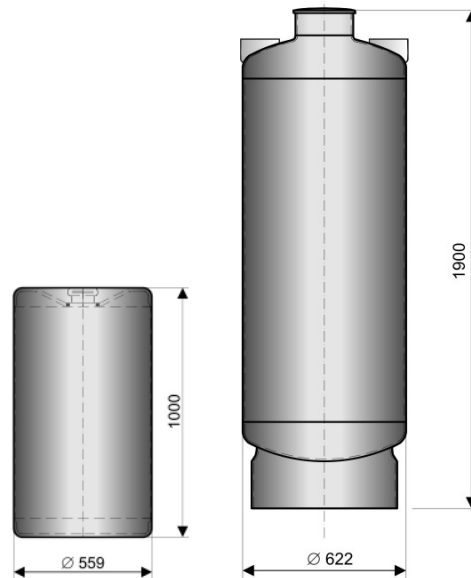


Abbildung 5-5: Schematische Darstellung der AVR-TL-Kannen und THTR-Kannen

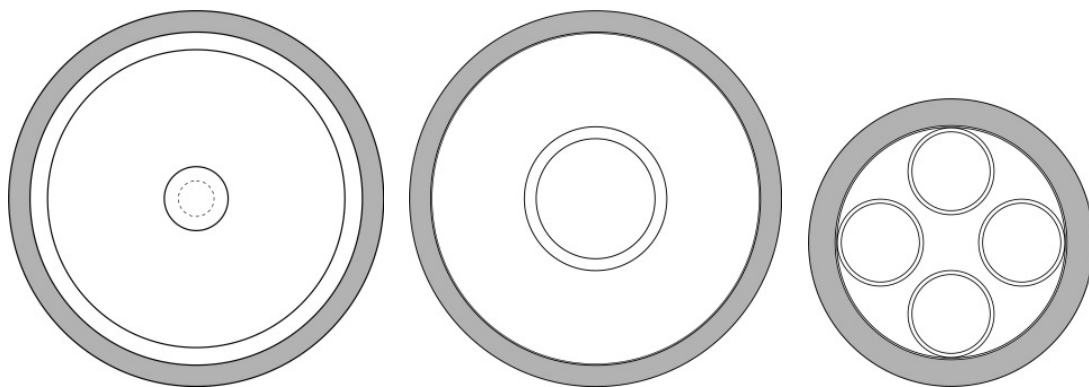


Abbildung 5-6: Schematische Darstellung (Schnitt) der Beladung der modifizierten BSK mit AVR-TL-Kannen (links) und THTR-Kannen (Mitte) und der BSK mit Standardabmessungen mit Brennstabbüchsen (rechts)

In der Tabelle 5-4 sind die Angaben zu Geometrie und Abmessungen der Brennelemente/ Brennstäbe aus Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken sowie aus Forschungsreaktoren aufgeführt /BfS 2007/ /BfS 2005/. In der Abbildung 5-1 ist die Beladung der BSK mit den v. g. Brennelementen/ Brennstäben schematisch dargestellt.

Tabelle 5-4: Geometrie und Abmessungen der Brennelemente/Brennstäbe

Brennelemente/ Brennstäbe	Max. BE-Länge [mm]	Durchmesser/ max. BE-Querschnitt [mm]	Masse BE [kg]
AVR-BE-Kugeln	-	60	0,214
THTR-BE-Kugeln	-	60	0,203
RFR			
WWR-M 1-fach	865	SW 35	1,1
WWR-M 3-fach	865	SW 70	3,3
EK-10-BE	750	68 x 68	3,3
EK-10-BS-Behälter	750	69 x 69	6,0
FRM II	906	244	45
BER II	874	81 x 77	7,0
FRMZ			
BEL-A1	733	38,5	3,5
BEL-B1	733	38,5	3,5

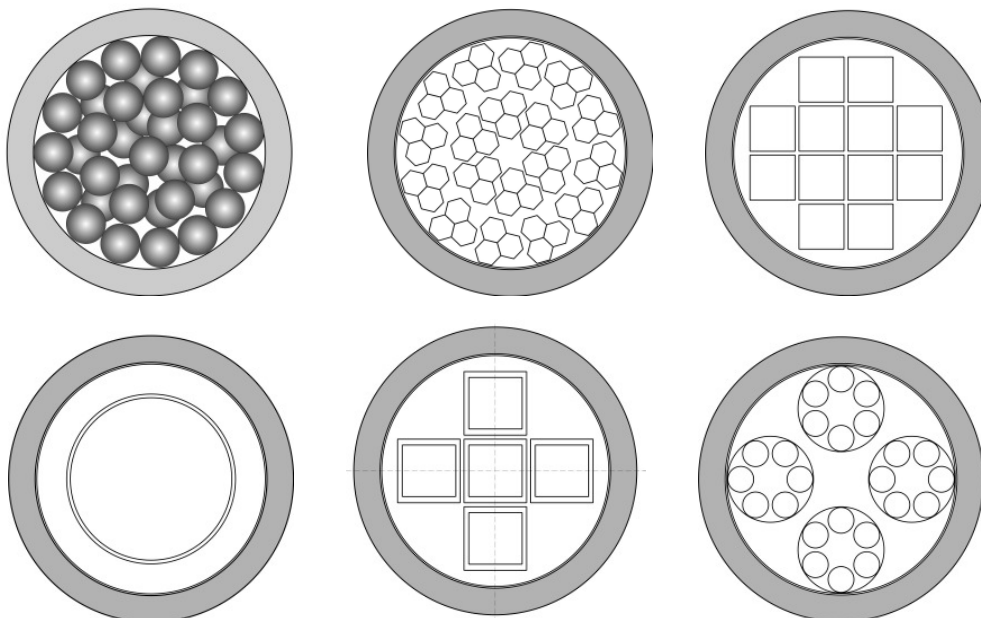


Abbildung 5-7: Schematische Darstellung (Schnitt) der Beladung der BSK mit Standardabmessungen mit BE-Kugeln aus AVR und THTR (oben links) und Brennelementen/ Brennstäben des RFR (WWR-M 3-fach, oben Mitte, und EK-10-BE bzw. EK-10-BS-Behälter, oben rechts), des FRM II (unten links), des BER II (unten Mitte) und des FRMZ (unten rechts)

Die Tabelle 5-5 gibt einen Überblick über die Beladung der Transport- und Lagerbehälter der Bauart CASTOR® THTR/AVR und CASTOR® KNK und der Brennstabkokillen mit AVR-TL-Kannen, THTR-Kannen und Brennstabbüchsen des Typs Phenix und OH. In der Tabelle 5-6 sind diese Angaben für Brennelemente/Brennstäbe aus Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken sowie aus Forschungsreaktoren aufgeführt; dabei wurde die Beladung der BSK ausschließlich unter geometrischen Gesichtspunkten abgeschätzt.

Tabelle 5-5: Beladung von CASTOR[®] THTR/AVR und CASTOR[®] KNK und von Brennstabkokillen mit AVR-TL-Kannen, THTR-Kannen und Brennstabbüchsen des Typs Phenix und OH

Brennelementkannen/ Brennstabbüchsen	Endlager- behälter	Beladung CASTOR [®]	Endlager- behälter	Beladung BSK
AVR-TL-Kannen	CASTOR [®] THTR/AVR	2 AVR-TL-Kannen	BSK	4 AVR-TL-Kannen
THTR-Kannen		1 THTR-Kannen	THTR/AVR BE-Kannen	2 THTR-Kannen
Brennstabbüchsen	CASTOR [®] KNK	9 Phenix-Büchsen oder 8 Phenix-Büchsen + 1 OH-Büchse	BSK KNK	8 Phenix-Büchsen oder 4 Phenix-Büchsen + 1 OH-Büchse ¹⁾

1) bei 35 Phenix-Büchsen und 1 OH-Büchse ergibt sich für vier BSK KNK eine Beladung von 8 Phenix-Büchsen und eine BSK KNK mit 4 Phenix-Büchsen und 1 OH-Büchse

Tabelle 5-6: Beladung von CASTOR[®] MTR 2 und von Brennstabkokillen mit Brennelementen/Brennstäben

Brennelemente/ Brennstäbe	Endlager- behälter	Beladung CASTOR [®]	Endlager- behälter	Beladung BSK
AVR-BE-Kugeln	Eine Beladung von CASTOR [®] THTR/AVR mit BE-Kugeln als lose Schüttung ist nicht vorgesehen.		BSK THTR/AVR BE-Kugeln	ca. 1.900 BE-Kugeln (Inhalt von 2 AVR-TL- Kannen)
THTR-BE-Kugeln				ca. 2.110 BE-Kugeln (Inhalt von 1 THTR- Kanne)
RFR WWR-M 1-fach WWR-M 3-fach EK-10-BE EK-10-BS-Behälter	CASTOR [®] MTR 2	147 Stück 49 Stück 28 Stück 28 Stück	BSK MTR	270 Stück 90 Stück 60 Stück 60 Stück
FRM II	CASTOR [®] MTR 3	5 Stück		5 Stück
BER II		33 Stück		25 Stück
FRMZ BEL-A1 BEL-B1		90 Stück 75 Stück		144 Stück ¹⁾

1) eine Beladung von BSK MTR ist aus geometrischen Gesichtspunkten mit 144 FRMZ-BE möglich; allerdings werden wahrscheinlich nur ca. 89 BE (siehe Kapitel 2) endzulagern sein.

5.5 Übersicht über Massen und Volumina der Endlagerbehälter für Brennelemente/Brennstäbe

In der Tabelle 5-7 sind die Massen und Volumina der Transport- und Lagerbehälter der Bauart CASTOR[®] THTR/AVR, CASTOR[®] KNK und CASTOR[®] MTR 2 für Brennelemente/Brennstäbe aus Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken sowie aus Forschungsreaktoren dargestellt. Die Tabelle 5-8 enthält diese Angaben für die in Kapitel 5-4 beschriebenen Brennstabkokillen.

Tabelle 5-7: Massen und Volumina je Transport- und Lagerbehälter für Brennelemente/Brennstäbe aus Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken sowie aus Forschungsreaktoren

Endlagergebinde	Länge/ Höhe [mm]	Durch- messer [mm]	Gebinde- volumen [m³]	Gebinde- masse [Mg]	Transport- gebinde- volumen [m³]
CASTOR® THTR/AVR	2.784 ¹⁾	1.625 ²⁾	4,16	26	4,16
CASTOR® KNK	2.743	1.380 ³⁾			
CASTOR® MTR 2	1.631	1.430 ³⁾	2,62	16	2,62
CASTOR® MTR 3					

1) Incl. Schutzplatte; 2) mit Tragezapfen; 3) ohne Tragezapfen

Tabelle 5-8: Massen und Volumina je Brennstabkokille für Brennelemente/Brennstäbe aus Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken sowie aus Forschungsreaktoren

Endlagergebinde	Länge/ Höhe [mm]	Durch- messer [mm]	Gebinde- volumen [m³]	Gebinde- masse [Mg]	Transport- gebinde- volumen [m³]
BSK THTR/AVR_{BE-Kannen}	4.980	705 715 ¹⁾	1,94	5 ²⁾	7,4 ³⁾
BSK THTR/AVR_{BE-Kugeln}	4.980	430 440 ¹⁾	0,72	3 ²⁾	7,4 ³⁾
BSK KNK					
BSK MTR					

1) Durchmesser im Deckelbereich; 2) Gebindemasse der BSK konservativ abgeschätzt; 3) Angaben zum Transportbehälter für BSK: $l_{\text{außen}} = 5.570 \text{ mm}$, $d_{\text{außen}} = 1.305 \text{ mm}$ /DBETec 2009/

Die in diesem Vorhaben betrachteten Endlagergebinde liegen innerhalb der derzeit bestehenden Geometrie- und Massenbeschränkungen, die aufgrund des entwickelten Transport- und Einlagerungssystems für ein zukünftiges Endlager im Salz in /DBE 1995/ abgeleitet wurden; diese Angaben gelten auch für eine Endlagerung im Wirtsgestein Ton:

Länge: max. 6.000 mm
 Durchmesser Behälterkörper (ohne Tragzapfen): max. 1.583 mm
 Masse, beladen: max. 65 Mg

6 Inventar der Endlagerbehälter mit Brennelementen/Brennstäben – Gesamtaktivitäten, Massen und Volumina

In diesem Kapitel wird das Inventar der Gesamtaktivitäten der endzulagernden Brennelemente/Brennstäbe aus Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken sowie aus Forschungsreaktoren grob abgeschätzt. Ergänzend dazu werden die insgesamt endzulagernden Massen und Volumina der Transport- und Lagerbehälter der Bauart CASTOR® und der Brennstabkaskillen abgeschätzt.

Die Tabelle 6-1 gibt einen Überblick über die Größenordnung der Gesamtaktivitäten CASTOR®-Behälter. Die Angaben für CASTOR® THTR/AVR, CASTOR® KNK und CASTOR® MTR 2 entsprechen den zulässigen Beladungen der Zulassungsscheine /BfS 2007/, /BfS 2009/ und /BfS 2005/. Die Anzahl der Endlagerbehälter entspricht der in der Tabelle 2-1 aufgeführten Anzahl an Transport- und Lagerbehältern. Bei einer Endlagerung der Brennelementkannen/ Brennstabbüchsen und Brennelemente/Brennstäbe in CASTOR®-Behältern liegt die Anzahl der Endlagerbehälter bei insgesamt 527 Stück. Da die Höhe der Gesamtaktivitäten von verschiedenen Einflussfaktoren abhängt, im wesentlichen der Abklingzeit, kann zum Zeitpunkt der Endlagerung mit entsprechend niedrigeren Aktivitätswerten gerechnet werden. Die Angaben in Tabelle 6-1 können daher als abdeckend angesehen werden.

Tabelle 6-1: Gesamtaktivitäten der CASTOR®-Behälter für die Brennelemente/Brennstäbe

Endlagerbehälter		Anzahl	Gesamtaktivität je Endlagergebinde [Bq]	Gesamtaktivität [Bq]
CASTOR® THTR/AVR	AVR	152	1,5 E+15	2,3 E+17
	THTR	305		4,6 E+17
CASTOR® KNK	KNK II	4	4,7 E+15	1,9 E+16
	Otto-Hahn			
CASTOR® MTR 2	RFR	18	3,43 E+16	6,2 E+17
CASTOR® MTR 3	FRM II	38		1,3 E+18
	BER II	9		3,1 E+17
	FRMZ	1		3,4 E+16
Gesamt		527	-	3,0 E+18

Die Tabelle 6-2 gibt einen Überblick über die Größenordnung der Gesamtaktivitäten im Falle einer Endlagerung in der in Kapitel 5-4 beschriebenen Brennstabkaskillen; die Angaben aus /BfS 2007/, /BfS 2009/ und /BfS 2005/ werden auch für die BSK entsprechend ihrer anteiligen Beladung herangezogen. Für die direkte Endlagerung der Brennelementkannen/ Brennstabbüchsen und Brennelemente/Brennstäbe lässt sich die Anzahl der BSK mit 295 bis 523 Stück abschätzen, je nachdem ob BSK THTR/AVR_{BE-Kannen} oder BSK THTR/AVR_{BE-Kugeln} zum Einsatz kommen.

Tabelle 6-2: Gesamtaktivitäten der Brennstabkokillen für die Brennelemente/Brennstäbe

Brennstabkokille		Anzahl	Gesamtaktivität je Endlagergebinde [Bq]	Gesamtaktivität [Bq]
BSK THTR/AVR _{BE-Kannen} oder BSK THTR/AVR _{BE-Kugeln}	AVR	76	3,0 E+15	2,3 E+17
	THTR	153		4,6 E+17
	AVR	152	1,5 E+15	2,3 E+17
	THTR	305		4,6 E+17
BSK KNK	KNK II	5	3,8 E+15	1,9 E+16
	Otto-Hahn			
BSK MTR	RFR	10	6,17 E+16	6,2 E+17
	FRM II	38	3,43 E+16	1,3 E+18
	BER II	12	2,57 E+16	3,1 E+17
	FRMZ	1	3,43 E+16	3,4 E+16
Gesamt		295 oder 523	-	3,0 E+18

Auf Basis der Angaben in der Tabelle 5-7 wurden Gesamtmassen und -volumina der Transport- und Lagerbehälter abgeschätzt (s. Tabelle 6-3). Bei einer Endlagerung der Brennelementkannen/ Brennstabbüchsen und Brennelemente/Brennstäbe in CASTOR®-Behältern liegt die Gesamtmasse der Endlagerbehälter bei insgesamt 13.042 Mg mit einem Gesamtvolumen von 2.091 m³.

Tabelle 6-3: Gesamtmassen und -volumina der CASTOR®-Behälter für die Brennelemente/Brennstäbe

Endlagerbehälter		Anzahl	Masse je Endlager- gebinde [Mg]	Gesamt- masse [Mg]	Volumen je Endlager- gebinde [m³]	Gesamt- volumen [m³]
CASTOR® THTR/AVR	AVR	152	26	3.952	4,16	632
	THTR	305		7.930		1.269
CASTOR® KNK	KNK II	4	26	104	4,16	17
	Otto-Hahn					
CASTOR® MTR 2	RFR	18	16	288	2,62	47
CASTOR® MTR 3	FRM II	38		608		100
	BER II	9		144		24
	FRMZ	1		16		3
Gesamt		527	-	13.042	-	2.091

Die Tabelle 6-4 gibt einen Überblick über die Gesamtmassen und -volumina der in Kapitel 5-4 beschriebenen Brennstabkokillen. Bei einer Endlagerung der Brennelementkannen/ Brennstabbüchsen und Brennelemente/Brennstäbe in Brennstabkokillen würde die Gesamtmasse der Endlagerbehälter bei insgesamt 1.343 oder 1.569 Mg mit einem Gesamtvolumen von 377 oder 492 m³ liegen, je nachdem ob BSK THTR/AVR_{BE-Kannen} oder BSK THTR/AVR_{BE-Kugeln} zum Einsatz kommen.

Tabelle 6-4: Gesamtmassen und -volumina der Brennstabkokillen für Brennelemente/ Brennstäbe

Brennstabkokille		Anzahl	Masse je Endlager- gebäude [Mg]	Gesamt- masse [Mg]	Volumen je Endlager- gebäude [m³]	Gesamt- volumen [m³]
BSK THTR/AVR_{BE-Kannen} oder BSK THTR/AVR_{BE-Kugeln}	AVR	76	5	380	1,94	147
	THTR	153		765		297
	AVR	152	3	456	0,72	109
	THTR	305		915		220
BSK KNK	KNK II	5	3	15	0,72	4
	Otto-Hahn					
BSK MTR	RFR	10	3	30	0,72	7
	FRM II	38		114		27
	BER II	9		36		9
	FRMZ	1		3		1
Gesamt		295 oder 523	-	1.343 oder 1.569	-	377 oder 492

7 Untersuchungen zur Beurteilung der Notwendigkeit von Anpassungsmaßnahmen an Transport- und Lagerbehälter als Endlagerbehälter

Im FuE-Vorhaben „Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine sicherheitstechnische Bewertung von Endlagern für HAW – ISIBEL“ /DBETec 2008/ werden ausführlich endlagerrelevante Eigenschaften für Endlagergebinde und an Endlagergebinde zu stellende sicherheitstechnische Anforderungen beschrieben. Auf dieser Basis werden im Folgenden Aspekte zur Beurteilung der Notwendigkeit von Anpassungsmaßnahmen an die in diesem Vorhaben betrachteten Transport- und Lagerbehälter der Bauart CASTOR® mit ausgedienten Brennelementen/ Brennstäben aus Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken sowie aus Forschungsreaktoren beschrieben.

Die Tabelle 7-1 gibt einen zusammenfassenden Überblick über die teilweise noch lückenhafte Datenbasis und die fehlenden Nachweise zur Qualifizierung der vorher genannten CASTOR®-Behälter für die Endlagerung sowie über Vorschläge für eventuelle Anpassungsmaßnahmen für die Endlagerung. Zusammenfassend wird festgestellt, dass sich Anpassungsmaßnahmen an die Transport- und Lagerbehälter für die Endlagerung aus dem Nachweis der Unterkritikalität und dem Nachweis der Integrität unter Endlagerungsbedingungen ergeben:

- Für den CASTOR® THTR/AVR liegt der Nachweis der Unterkritikalität vor /GRS 2004/. Für den CASTOR® KNK und die unterschiedlichen Beladevarianten des CASTOR® MTR 2 steht dieser Nachweis noch aus.
- Bei den Transport- und Lagerbehältern ist derzeit der Verschluss durch Verschrauben des Primär- und Sekundärdeckels mit dem Behälterkörper vorgesehen. Als Primär- und Sekundärdeckeldichtung kommen für die Transport- und Lagerbehälter CASTOR® THTR/AVR, CASTOR® KNK und CASTOR® MTR 2 Metaldichtungen zum Einsatz. Da ein Verschweißen des Primär- und/oder Sekundärdeckels mit dem Behälterkörper nicht vorgesehen ist, ist der Nachweis der Dichtheit der Schraubverbindung zwischen Behälterkörper und -deckel zu führen. Um Behälterstandzeiten für den Fall des Verschweißens von Behälterkörper und -deckel abschätzen zu können, ist beispielsweise zu klären, ob ein Verschweißen von Behälterdeckel (Edelstahl) und Gussbehälter technisch möglich ist und welche Zusammensetzung/Qualität und Dicke die Schweißnaht haben muss. Unter der Voraussetzung, dass für die entsprechenden Werkstoffe/Materialien belastbare Aussagen zu Korrosionsraten vorliegen, ließe sich dann die theoretische Standzeit der Transport- und Lagerbehälter abschätzen. Ferner ist zu bewerten, wie sich die Verfüllung des Behälters mit abgereichertem UO_2 oder anderem nicht moderierendem Material, z. B. Magnetit, auf die Anforderungen zur Dichtheit bzw. Integrität der Behälter auswirkt.

Tabelle 7-1: Übersicht über die lückenhafte Datenbasis und die fehlenden Nachweise zur Qualifizierung von Transport- und Lagerbehältern für die Endlagerung sowie Vorschläge für evtl. Anpassungsmaßnahmen an die TLB für die Endlagerung

Lfd. Nr.	Endlagerrelevante Eigenschaften	lückenhafte Datenbasis / fehlende Nachweise Ausgediente Brennelemente/Brennstäbe in CASTOR® THTR/AVR, CASTOR® KNK und CASTOR® MTR2
1	Gesamtaktivität	Eine Differenzierung der Angaben zur Gesamtaktivität in β -/ γ - und α -Gesamtaktivität erfolgt nicht; weiterhin liegen keine Angaben zur Neutronenquellstärke vor.
2	Aktivität relevanter Nuklide	Angaben zu Aktivitäten relevanter Nuklide liegen nur teilweise vor. → Es sind die relevanten Nuklide zu ermitteln und damit die β -/ γ - und α -Gesamtaktivitäten über gängige Abbrand-, Aktivierungs- und Abklingrechnungen zu errechnen. → Es ist ein realistisches und abdeckendes Inventar relevanter Nuklide abzuschätzen.
3	Kritikalitätssicherheit	Der Nachweis zur Kritikalitätssicherheit ausgedienter Brennelemente bei der Endlagerung in CASTOR® THTR/AVR ist erbracht /GRS 2004/. Der Nachweis zur Kritikalitätssicherheit ausgedienten Brennelemente/Brennstäbe bei der Endlagerung in CASTOR® KNK und für die unterschiedlichen Beladevarianten CASTOR® MTR 2 ist noch nicht erbracht. Eine eventuelle technische Anpassungsmaßnahme des TLB's ist die Verfüllung des Behälters mit abgereichertem UO_2 oder anderem nicht moderierendem Material, z. B. Magnetit, oder alternativ der Einsatz gadoliniumhaltiger Steuerstäbe.
4	Thermische Eigenschaften	Eine Optimierung der Endlagerauslegung aus thermischer Sicht ist nicht notwendig, da die Grenztemperatur des Wirtsgesteins aufgrund der geringen Wärmeleistung der TLB eingehalten wird.
5	Dosisleistung	-
6	Oberflächenkontamination	-
7	Beschreibung des Rohabfalls/ Abfallproduktes	Angaben zur „Beschreibung des Abfallprodukts“ (Brennelemente / Brennstäbe) liegen nur zum Teil vor. → Die Angaben sind systematisch zusammenstellen und die für eine vollständige Beschreibung noch fehlenden Angaben sind zu identifizieren und zu ergänzen.
8	Hydrolytische Beständigkeit und Radionuklid-Freisetzung aus Abfallprodukt und Endlagerbehälter	Angaben zur „hydrolytischen Beständigkeit und zur Radionuklidfreisetzung“ des Abfallprodukts (Brennelemente / Brennstäbe) und der Endlagerbehälter liegen nur zum Teil vor. → Die Angaben sind systematisch zusammenstellen und die für eine vollständige Beschreibung noch fehlenden Angaben sind zu identifizieren und zu ergänzen.

Lfd. Nr.	Endlagerrelevante Eigenschaften	lückenhafte Datenbasis / fehlende Nachweise Ausgediente Brennelemente/Brennstäbe in CASTOR® THTR/AVR, CASTOR® KNK und CASTOR® MTR2
9	Beschreibung/Eigenschaften/Qualität des Abfall-/ Endlagerbehälters	Belastbare Aussagen zu Standzeiten von Transport- und Lagerbehältern unter realistischen Endlagerungsbedingungen - im Wesentlichen Korrosion - liegen nicht vor. /ISTec 2004/ Es fehlt der Nachweis über die Abschätzung der Behälterstandzeit unter Berücksichtigung erhöhter Eindringtiefen lokaler Korrosionseffekte verglichen mit dem gleichmäßigen Materialabtrag bei flächenhafter Korrosion. Es fehlt der Nachweis der Dichtheit der Schraubverbindungen zwischen Behälterkörper und Primär-/ Sekundärdeckel. Es fehlt der Nachweis über die Bewertung der Behälterstandzeiten bei Verfüllung des Behälters mit abgereichertem UO_2 oder anderem nicht moderierendem Material, z. B. Magnetit. Für den Fall des Verschweißens von Behälterkörper mit - deckel ist zu klären, ob ein Verschweißen von Behälterdeckel (Edelstahl) mit dem Gussbehälter technisch möglich ist und welche Zusammensetzung/Qualität und Dicke die Schweißnaht haben muss. Es fehlt außerdem der Nachweis über die Abschätzung der Behälterstandzeit mit verschweißtem Deckel. Eine evtl. technische Anpassungsmaßnahme des TLB's ist die Wahl des Materials/Werkstoffes von Primär- und/oder Sekundärdeckel und die Forderung eines verschweißten Deckels.
10	Gebindemasse	-
11	Stapelbarkeit/Handhabbarkeit, Mechanische Eigenschaften	Der Nachweis der Integrität der Transport- und Lagerbehälter während der Betriebsphase bei ungestörtem und gestörtem Betrieb des Endlagers und bei Auflaufen des Gebirgsdrucks fehlt. Der Nachweis über die Handhabbarkeit der Transport- und Lagerbehälter für einen Zeitraum von 500 Jahren /BMU 2010/ fehlt.
12	Kennzeichnung des Gebindes/ Endlagergebindes	-

Ergänzend dazu sind die infolge von Korrosion entstehenden Gasmengen für das in diesem Vorhaben abgeschätzte Inventar an Endlagergebinden unter realistischen Endlagerungsbedingungen (erheblich höhere Materialmengen/-massen bei Endlagerung von Brennelementen/Brennstäben aus Prototyp- und Versuchs-Kernkraftwerken sowie aus Forschungsreaktoren in TLB (Streckenlagerung) im Vergleich zur Endlagerung von Brennstabkokillen (Bohrlochlagerung) abzuschätzen. Der Einfluss der lokalen Verteilung der Behältermaterialien auf die Gasbildung im Einlagerungsbereich und damit auf Bohrloch- bzw. Streckenverschlüsse ist abzuschätzen.

Die Aussagen in der Tabelle 7-1 und die Aussagen zur Gasbildung gelten sowohl für das Wirtsgestein Salz als auch für das Wirtsgestein Ton.

Im Punkt 4 „Thermische Eigenschaften“ ist bei der Auslegung des Endlagers eine Grenztemperatur von 200 °C im Wirtsgestein Salz und eine Grenztemperatur von 100 °C im Wirtsgestein Ton einzuhalten. Aufgrund der geringen Wärmeleistung der TLB mit den Brennelementen/Brennstäben aus den Prototyp- und Versuchs-Kernkraftwerken und den Forschungsreaktoren kann davon ausgegangen werden, dass die Grenztemperaturen eingehalten werden.

In den Punkten 8 „Hydrolytische Beständigkeit und Radionuklid-Freisetzung aus Abfallprodukt und Endlagerbehälter“ und 9 „Beschreibung/Eigenschaften/Qualität des Abfall-/Endlagerbehälters“ ist die Korrosion der Behälter bzw. die Standzeiten in den relevanten Lösungen der jeweiligen Wirtsgesteine zu betrachten. Im Wirtsgestein Salz sind die relevanten Lösungen unterschiedliche Salzlauge und im Wirtsgestein Ton ist die relevante Lösung Tonwasser.

8 Technisches Konzept zur Integration der Endlagerbehälter in bestehenden Endlagerkonzeptionen

Basierend auf den vorher beschriebenen Endlagerbehälterkonzepten werden in den folgenden Kapiteln die ausgedienten Brennelemente/Brennstäbe der Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerke sowie der Forschungsreaktoren in bereits bestehende Endlagerkonzepte im Wirtsgestein Salz und im Wirtsgestein Ton integriert.

8.1 Wirtsgestein Salz

Für die Endlagerung wärmeentwickelnder und hochradioaktiver Abfälle im Wirtsgestein Salz werden zwei unterschiedliche Einlagerungsvarianten betrachtet, die auch für die Endlagerung der ausgedienten Brennelemente/Brennstäbe in Frage kommen. Bei den beiden Einlagerungsvarianten handelt es sich einerseits um die Streckenlagerung, bei der die Brennelemente/Brennstäbe der Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerke sowie der Forschungsreaktoren in den Transport- und Lagerbehältern (TLB, CASTOR®) in horizontalen Strecken oder andererseits die Bohrlochlagerung bei der die Brennelemente/Brennstäbe in den Brennstabkokillen mit Standardabmessungen (analog BSK-3) bzw. in modifizierten Brennstabkokillen in vertikalen Bohrlöchern (bis 300 m Tiefe) eingelagert werden.

Bei beiden Einlagerungsvarianten ist die Anforderung aus den Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle /BMU 2010/ an eine Rückholbarkeit der Endlagerbehälter in der Betriebsphase bis zum Verschluss der Schächte zu berücksichtigen. Bislang sind noch keine Konzepte für die Rückholung vorhanden. Im Rahmen der Vorläufigen Sicherheitsanalyse Gorleben /VSG 2011/ werden erste Konzepte für die Rückholung bei der Strecken- und der Bohrlochlagerung erarbeitet.

Da es nicht Ziel dieses Vorhaben ist, ein vollständig neues Endlagerkonzept zu entwickeln, werden ausgehend von dem im Kapitel 6 aufgestellten Mengengerüst durch Analogieschlüsse die Brennelemente/Brennstäbe der Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerke sowie der Forschungsreaktoren in bereits bestehende Endlagerkonzeptionen integriert. In den folgenden Kapiteln erfolgt als erstes die Beschreibung grundlegender Randbedingungen bei einer Einlagerung im Wirtsgestein Salz, danach folgt für die Strecken- und die Bohrlochlagerung jeweils eine Beschreibung der Transportabläufe über und unter Tage und eine auf das Abfallmengengerüst aufbauende Grubengebäudeplanung. Es werden jeweils entsprechende Einlagerungsfelder ausgelegt.

8.1.1 Randbedingungen bei einer Einlagerung im Wirtsgestein Salz

Das Endlager wird über zwei Schächte betrieben, von denen der eine für der Schachttransport der Endlagerbehälter zur Einlagerungssohle und gleichzeitig als ausziehender Wetterschacht dient. Der andere, über den die Frischwetter einziehen, wird für Mannschafts- und Materialtransport genutzt. Das an die Schächte angeschlossene Grubengebäude ist mit getrennten Wetterführungen für den Kontrollbereich (Endlagerbehältertransport und

-einlagerung) und den Überwachungsbereich (Streckenauffahrung und Versatztransport) auszulegen. Die Einlagerungsstrecken werden sonderbewettert.

Das Sicherheitskonzept des Endlagers beruht hinsichtlich der Auslegung des Grubengebäudes darauf, dass der Integritätsnachweis für die geologische Barriere geführt werden kann. Das bedeutet, dass der Zuschnitt und die Anordnung der für die vorgegebenen Abfallmengen benötigten Grubenräume so geplant werden müssen, dass stets die Dilatanz- und Hydrofrac-Kriterien eingehalten werden. Das betrifft sowohl die Einlagerungsstrecken und -bohrlöcher als auch alle Grubenräume für die Infrastruktur, wie Transportstrecken, Werkstätten und Lagerräume. Für all diese Hohlräume müssen hinreichend große Sicherheitsabstände zu potentiellen Störungszonen und relevanten Schichtgrenzen eingehalten werden.

Die wesentliche thermische Auslegungsrandbedingung für das Grubengebäude ist das Temperaturkriterium von 200 °C, das zu keiner Zeit im gesamten Endlager überschritten werden darf. Dieses erfordert eine systematische Planung der Anordnung von Einlagerungsstrecken und -bohrlöchern und deren Belegung mit Endlagerbehältern.

Aufgrund der in der Realität komplexen geologischen Verhältnisse können nur die geometrischen Grunddaten der Einlagerungsfelder wie Streckenabstand, Bohrlochdurchmesser, -länge und Behälterzwischenraum vorgegeben werden. Der Sicherheitspfeiler von Einlagerungsstrecken zur Richtstrecke muss jeweils doppelte Richtstreckenbreite aufweisen. Die Größe und Ausrichtung der einzelnen Einlagerungsfelder muss sich der konkreten weiteren Detailplanung dem wechselnden Schichtstreichen und den unterschiedlichen Schichtmächtigkeiten anpassen. Aus Gründen der Sonderbewetterung soll die Länge der Einlagerungs- und Beschickungsstrecken für wärmeentwickelnde Abfälle 250 m nicht überschreiten. Bei den Einlagerungsstrecken sind folgende Randbedingungen zu beachten:

- Aus technologischer Sicht sind von den Streckenlängen bei der Einlagerung von POLUX®-Behältern 15 m für den Verschluss der Strecke sowie 1 m Abstand von der Ortsbrust am Ende der Einlagerungsstrecke für die erste Einlagerungsposition abzuziehen /SAM 1989b/. Im Rahmen dieses Vorhabens wird angenommen, dass diese Randbedingung ebenso für die CASTOR®-Behälter gilt.
- Bei der Bohrlochlagerung wird ebenso für die Beschickungsstrecke 15 m für den Verschluss der Strecke benötigt.

8.1.2 Streckenlagerung im Wirtsgestein Salz

Für die Streckenlagerung der ausgedienten Brennelemente/Brennstäbe aus Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerke sowie aus Forschungsreaktoren sind als Endlagerbehälter die Transport- und Lagerbehälter (CASTOR® THTR/AVR, CASTOR® KNK und CASTOR® MTR 2) vorgesehen. Bislang besitzen diese Behälter lediglich eine Genehmigung für den Transport und die Zwischenlagerung der ausgedienten Brennelemente/Brennstäbe. Der Eignungsnachweis dieser Behälter für die Endlagerung ist noch zu erbringen. Dafür sind ggf. noch technische Änderungen an den CASTOR®-Behältern vorzunehmen.

Bei der Streckenlagerung ist eine Voraussetzung für eine Rückholbarkeit, dass die CASTOR[®]-Behälter hintereinander in der Strecke positioniert werden. Dabei ist eine stehende oder eine liegende Position der CASTOR[®]-Behälter denkbar. Welche dieser Varianten im Hinblick auf eine Rückholbarkeit der Endlagerbehälter sinnvoller ist, muss in zukünftigen Untersuchungen ermittelt werden.

8.1.2.1 Transportabläufe über und unter Tage für die Streckenlagerung im Wirtsgestein Salz

Die Komponenten und Transportabläufe sind für die CASTOR[®]-Behälter vergleichbar mit denen für die POLLUX[®]-Behälter, siehe Abbildung 8-1, (Abmessungen: 5.517 mm (Länge), 1.560 mm (Durchmesser). Bei den Komponenten müssen aufgrund der geringeren Außenabmessungen der TLB (z. B. CASTOR[®] THTR/AVR mit den Abmessungen: 2.784 mm (Länge), 1.380 mm (Durchmesser), siehe Abbildung 5-1) Anpassungen, z. B. durch den Einsatz von Adaptern, vorgenommen werden.

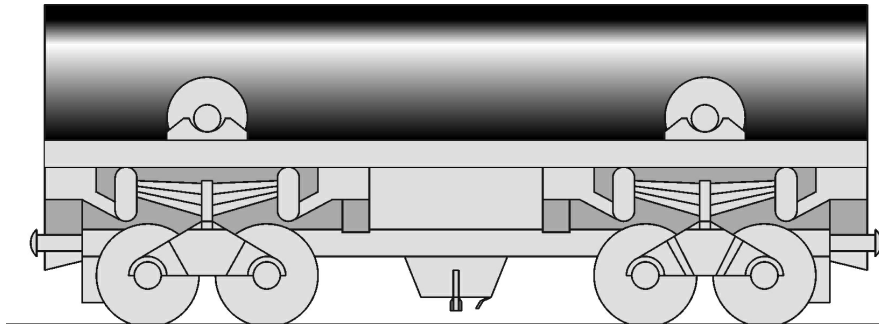


Abbildung 8-1: Plateauwagen mit POLLUX[®]-Behälter

Die CASTOR[®]-Behälter werden auf den Anlieferfahrzeugen in die Umladeanlage des Endlagers gebracht. In dieser Anlage erfolgt der Umschlag der Behälter auf sogenannte Plateauwagen für den weiteren, innerbetrieblichen Transport nach unter Tage. Der mit den CASTOR[®]-Behältern beladene Plateauwagen wird über den Abwetterschacht nach unter Tage befördert und danach mit einer batteriebetriebenen Grubenlokomotive zum Einlagerungsfeld und in die Einlagerungsstrecke transportiert. An der vorgesehenen Ablegestelle angekommen, wird der CASTOR[®]-Behälter mittels einer Einlagerungsvorrichtung vom Plateauwagen abgehoben und nach Zurückziehen des Plateauwagens auf der Streckensohle abgelegt. Danach wird die Einlagerungsvorrichtung durch Ankuppeln an den Plateauwagen in eine neue Position zu der nächsten Einlagerungsstrecke gezogen. Der zuvor eingelagerte CASTOR[®]-Behälter wird mit Salzgrus verfüllt. Abbildung 8-2 zeigt beispielhaft den Einlagerungsprozess für POLLUX[®]-Behälter.

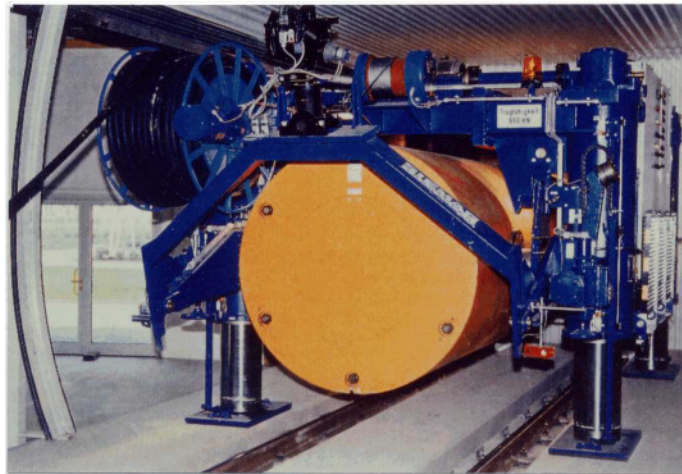


Abbildung 8-2: Einlagerungsvorrichtung für POLLUX®-Behälter im Salz

Eine Ausführliche Beschreibung der Transportabläufe über und unter Tage und der dazugehörigen Komponenten ist im Bericht ISIBEL /DBETec 2008/ dargestellt.

8.1.2.2 Auslegung des Grubengebäudes für die Streckenlagerung im Wirtsgestein Salz

Aufgrund der geringen Wärmeleistung der Brennelemente/Brennstäbe der Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken sowie der Forschungsreaktoren ist die Einhaltung des Temperaturkriteriums von 200 °C problemlos möglich. Damit resultieren die Behälter- und Streckenabstände aus rein maschinentechnischen und bergbaulichen Anforderungen. Somit gilt für die Konzeption des Grubengebäudes ein Behältermindestabstand von 1 m und ein Streckenmittenabstand von 15,3 m.

Die Streckengeometrie richtet sich nach den Anforderungen der eingesetzten Transport- und Einlagerungstechnik und nach den Erfordernissen des Bergbaus. Die tatsächliche Streckenkontur richtet sich nach der gewählten Auffahrungstechnik. Bei schneidender Auffahrungstechnik ergeben sich Unterschiede je nach Ausrüstungshersteller und Schneidprinzip. Zur Minimierung des Streckenquerschnitts werden die Schienen in der Sohle versenkt.

In der Abbildung 8-3 ist der Querschnitt durch eine Einlagerungsstrecke zur Streckenlagerung von POLLUX®-Behältern dargestellt. Im Rahmen dieses Vorhabens wird davon ausgegangen, dass der Querschnitt für die CASTOR®-Behälter analog dazu ist, weil dieselbe Einlagerungsmaschine genutzt werden soll. Die Maße 4,5 m x 3,4 m sind Mindestmaße, die im Rahmen der Vorkonzeptphase ermittelt wurden.

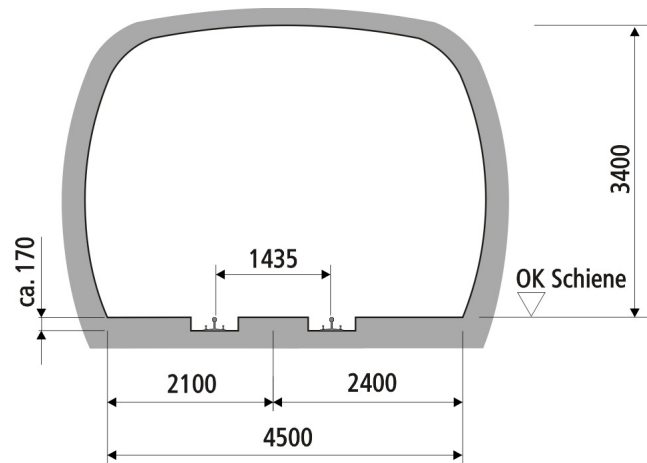


Abbildung 8-3: Querschnitt durch die Einlagerungsstrecke im Salz

Unter der Berücksichtigung der vorgenannten Randbedingungen und Auslegungsgrundsätze kann ein Einlagerungsfeld entworfen werden, das alle 527 CASTOR®-Behälter in einer liegenden oder stehenden Position aufnehmen kann. Pro Strecke mit einer Länge von 250 m werden 58 Transport- und Lagerbehälter eingelagert. Die Fläche des Feldes umfasst ca. 47.425 m² bei einer Länge von 250 m und einer Breite von 189,7 m. Der Entwurf des Einlagerungsfeldes ist in Abbildung 8-4 dargestellt.

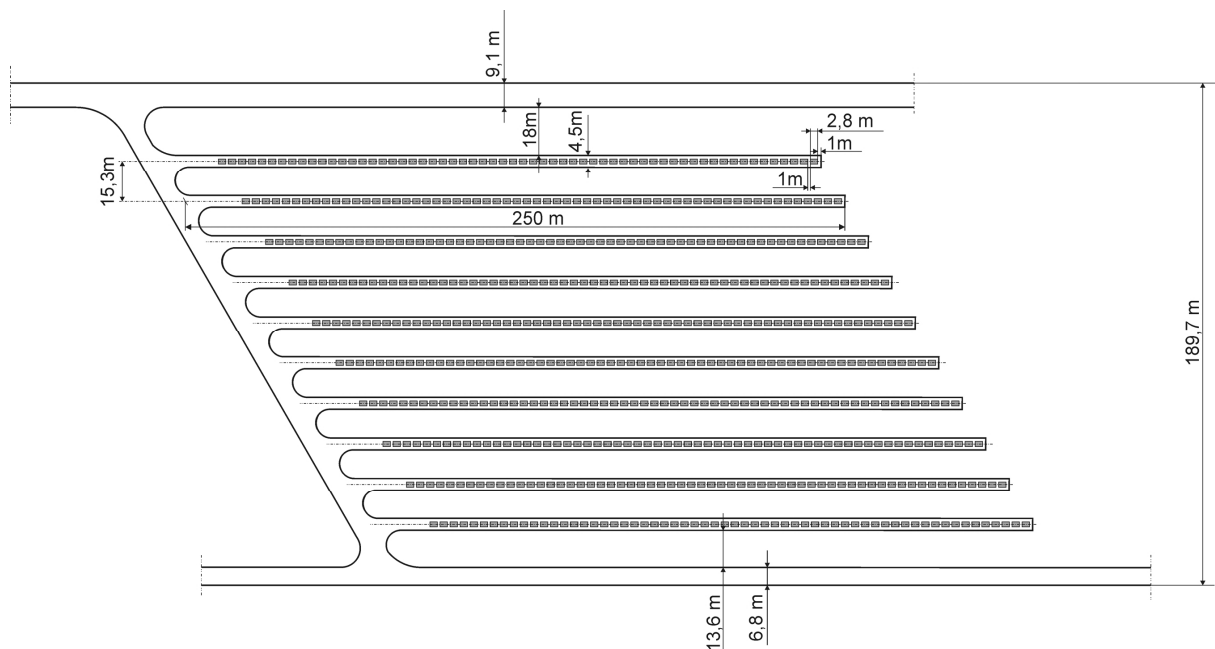


Abbildung 8-4: Entwurf eines Einlagerungsfeldes für Transport- und Lagerbehälter im Salz

8.1.3 Bohrlochlagerung im Wirtsgestein Salz

Die für die Bohrlochlagerung entwickelte Brennstabkokille besitzt derzeit keine Genehmigung als Endlagerbehälter. Damit ist der Eignungsnachweis der Brennstabkokille für die Endlagerung noch zu erbringen.

Die folgenden Ausführungen zur Bohrlochlagerung von ausgedienten Brennelemente/Brennstäbe aus Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken sowie aus Forschungsreaktoren in Brennstabkokillen beschränken sich auf Brennstabkokillen mit Standardabmessungen, die geometrisch identisch mit der Brennstabkokille für die ausgedienten Brennstäbe aus den Leistungsreaktoren (BSK-3) ist. Damit kann die Einlagerung analog zur BSK erfolgen. Die modifizierte Brennstabkokille (BSK THTR/AVR_{BE-Kannen}) weicht von der BSK-3 lediglich in ihrem Durchmesser ab (siehe auch Abbildung 5-4). Damit wären bei der Handhabung der modifizierten Brennstabkokille ggf. Anpassungen erforderlich und es müsste ein größerer Bohrlochdurchmesser berücksichtigt werden. Die Planung und Umsetzbarkeit eines größeren Bohrlochdurchmessers ist in Rahmen von weiteren FuE-Arbeiten zu untersuchen. Aus diesem Grund wird die modifizierte Brennstabkokille bei der Grubengebäudeplanung im Rahmen dieses Vorhabens nicht weiter berücksichtigt.

8.1.3.1 Transportabläufe über und unter Tage für die Bohrlochlagerung im Wirtsgestein Salz

Die mit den Transportbehältern (CASTOR®) beladenen Anlieferfahrzeuge fahren zum Umladebereich des Endlagerbergwerks. Dort werden die jeweiligen Fahrzeuge geöffnet und die Stoßdämpfer von den Behältern entfernt. In der Umladeanlage erfolgt der Umschlag der Behälter auf sogenannte Plateauwagen für den weiteren, innerbetrieblichen Transport. Die in CASTOR®-Behältern angelieferten Brennstabkokillen mit Standardabmessung werden in der Heißen Zelle zunächst aus den Transportbehältern entnommen und in selbstabschirmende Transferbehälter umgeladen. Die Transferbehälter werden dann auf Plateauwagen zum weiteren innerbetrieblichen Transport abgesetzt. Der mit den Transferbehälter beladene Plateauwagen wird dann über den Abwetterschacht nach unter Tage befördert und dort mittels einer batteriebetriebenen Grubenlokomotive zum Einlagerungsfeld und in die Einlagerungstrecke transportiert.

Der Transferbehälter wird mit Hilfe der Einlagerungsvorrichtung vom Plateauwagen gehoben und nach Zurückziehen des Plateauwagens in eine vertikale Position geschwenkt. Danach wird die Abschirmhaube auf den Transferbehälter gesetzt und die Brennstabkokille auf die Bohrlochschleuse abgesetzt. Der Transferbehälter wird kopfseitig geöffnet und der Kokillengreifer des Hebezeuges an die Brennstabkokille angeschlagen. Anschließend werden Bohrloch sowie der Transferbehälter fußseitig geöffnet und die Brennstabkokille in das Bohrloch abgelassen. Nach dem Hochziehen des Kokillengreifers werden Bohrloch und Transferbehälter geschlossen, die Abschirmhaube entfernt und der Transferbehälter vom Hebezeug auf den Plateauwagen abgestellt. Als nächstes wird das Bohrloch bis zur nächsten Kokillenabsetzposition mit Versatzmaterial verfüllt. Als Versatzmaterial ist Salzgrus vorgesehen. Abbildung 8-5 zeigt schematisch den Einlagerungsprozess. Eine ausführliche Beschreibung der Transportabläufe über und unter Tage und der zugehörigen Komponenten ist im Bericht ISIBEL /DBETec 2008/ dargestellt.

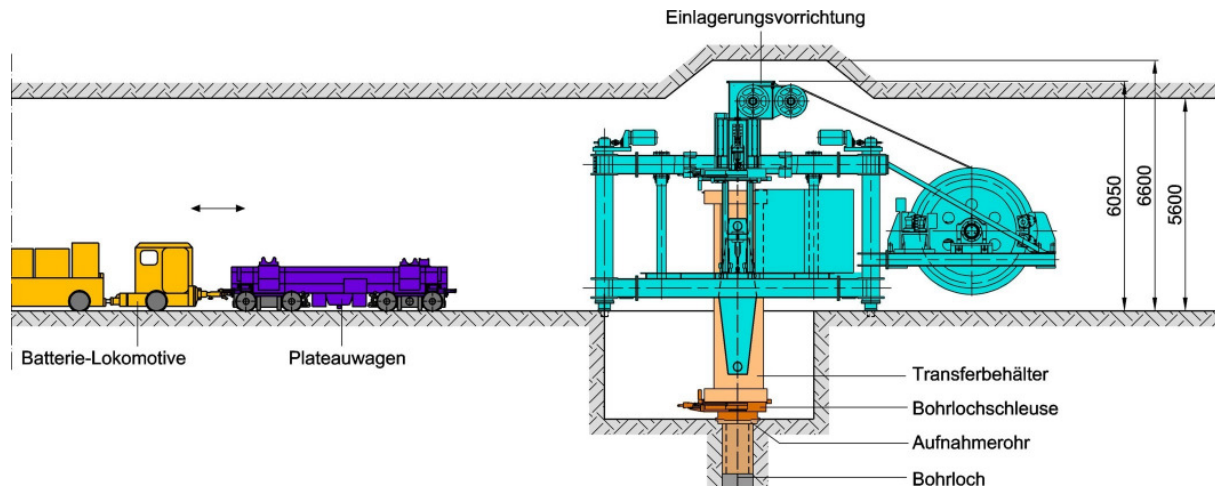


Abbildung 8-5: Einlagerungsvorrichtung für die Brennstabkokille im Salz

8.1.3.2 Auslegung des Grubengebäudes für die Bohrlochlagerung im Wirtsgestein Salz

Aufgrund der relativ geringen Wärmeproduktion der Brennelemente/Brennstäbe aus den Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken sowie aus den Forschungsreaktoren sind für Bohrloch- und Streckenabstand nur maschinentechnische und bergbauliche Anforderungen maßgeblich und keine thermischen. Somit gilt für die Konzeption des Grubengebäudes ein Strecken- und ein Bohrlochabstand von jeweils 20 m. Für die Bohrlöcher wird eine Tiefe von 300 m und eine Anzahl von 54 Brennstabkokillen je Bohrloch angenommen.

Auch hier richtet sich die Streckengeometrie nach den Anforderungen der eingesetzten Transport- und Einlagerungstechniken und nach den Erfordernissen des Bergbaus. Die tatsächliche Streckenkontur richtet sich nach den gewählten Auffahrungstechniken. Bei schneidender Auffahrungstechnik ergeben sich Unterschiede je nach Ausrüstungshersteller und Schneidprinzip. Zur Minimierung des Streckenquerschnitts werden die Schienen in der Sohle versenkt.

In der Abbildung 8-6 ist der Querschnitt durch eine Einlagerungsstrecke zur Bohrlochlagerung von Brennstabkokillen dargestellt. Die Maße 6,0 m x 6,6 m sind als Mindestmaß anzusehen. Die Querschnittsabmessungen wurden in Anlehnung an das aktuelle FuE-Vorhaben „Optimierung der direkten Endlagerung ausgedienter Brennelemente durch Kokillenlagerung in Bohrlöchern (DENKMAL)“ /DBETec 2010/ festgelegt.

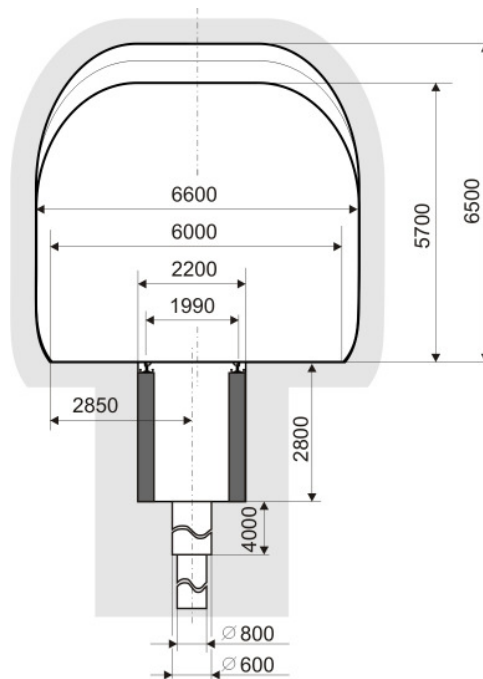


Abbildung 8-6: Querschnitt durch die Bohrloch-Einlagerungsstrecke im Salz

Unter der Berücksichtigung der vorgenannten Randbedingungen und Auslegungsgrundsätze können die 523 Brennstabkokillen in einer Einlagerungsstrecke mit einer Länge von 250 m eingelagert werden. Das Einlagerungsfeld ist in Abbildung 8-7 dargestellt.

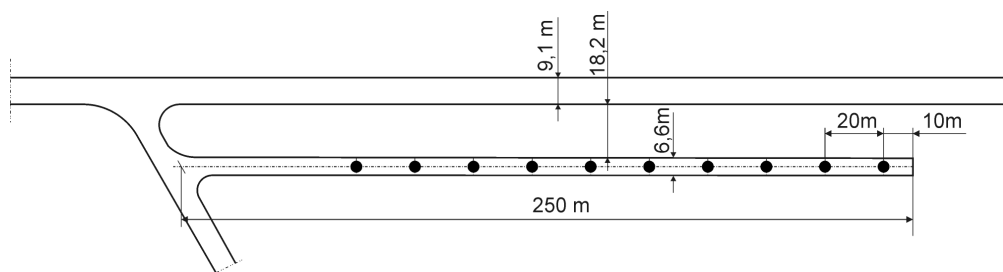


Abbildung 8-7: Entwurf eines Einlagerungsfeldes für BSK im Salz

8.2 Wirtsgestein Ton

Auch für die Endlagerung wärmeentwickelnder und hochradioaktiver Abfälle im Wirtsgestein Ton werden zwei unterschiedliche Einlagerungsvarianten betrachtet, die ebenfalls für die ausgedienten Brennelemente/Brennstäbe aus Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerke sowie aus Forschungsreaktoren in Frage kommen. Bei den beiden Einlagerungsvarianten handelt es sich um die Bohrlochlagerung von ausgedienten Brennelemente/Brennstäbe in Brennstabkokillen mit Standardabmessung (analog BSK-3) in vertikalen Bohrlöchern und alternativ dazu um die Streckenlagerung in Transport- und Lagerbehältern (TLB, CASTOR®) in horizontalen Strecken.

Im Rahmen des Vorhabens „Referenzkonzept für ein Endlager für radioaktive Abfälle im Tongestein (ERATO)“ /DBETec 2010a/ sind die beiden Einlagerungsvarianten miteinander verglichen worden. Dabei zeigte sich, dass die Bohrlochlagerung aufgrund ihrer Vorteile beim geringeren Flächenbedarf des Endlagers, bei den Streckenlängen, bei den Nahfeldbarrieren und dem Versatz, sowie bei den Kosten, der Streckenlagerung vorzuziehen ist.

Auch bei der Endlagerung im Wirtsgestein Ton ist die Anforderung aus den Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle /BMU 2010/ an eine Rückholbarkeit der Endlagerbehälter in der Betriebsphase bis zum Verschluss der Schächte zu berücksichtigen. Im Rahmen des Vorhabens ERATO /DBETec 2010a/ wurde die Rückholung nicht untersucht, da die Anforderung der Rückholbarkeit zu diesem Zeitpunkt nicht existierte. Daher ist ein Vergleich der beiden Einlagerungsvarianten unter Berücksichtigung der Anforderung an eine Rückholbarkeit der Endlagerbehälter in der Betriebsphase erneut durchzuführen. Da das Ergebnis dieses Vergleiches offen ist, werden im Rahmen dieses Vorhabens beide Einlagerungsvarianten berücksichtigt.

In den folgenden Kapiteln erfolgt als erstes die Beschreibung grundlegender Randbedingungen bei einer Einlagerung im Wirtsgestein Ton, danach folgt für die beiden Einlagerungsvarianten eine Beschreibung der Transportabläufe über und unter Tage und eine auf das in Kapitel 6 beschriebene Abfallmengengerüst aufbauende Grubengebäudeplanung. Es werden jeweils entsprechende Einlagerungsfelder ausgelegt.

8.2.1 Randbedingungen bei der Einlagerung im Wirtsgestein Ton

Zur Gewährleistung der Langzeitsicherheit eines Endlagers wurde das Multibarrierenkonzept entwickelt. Es besteht im Einzelnen aus technischen, geotechnischen und geologischen Barrieren. Technische Barrieren umfassen die Abfallmatrix und den Abfallbehälter. Die geotechnischen Barrieren sind die Ingenieurbauwerke, die die Integrität der durch bergbauliche Aktivitäten durchbrochenen geologischen Barrieren im hinreichenden Umfang wieder herstellen sollen. Die geologischen Barrieren sind das Wirtsgestein und ggf. zusätzliche Bereiche des Deckgebirges und Nebengesteins. In Abhängigkeit von den Wirkungsmechanismen der geologischen Barriere unterscheiden sich die Multibarrierenkonzepte im Zusammenwirken der Komponenten im Detail. Evaporitgesteine (z. B. Steinsalz) verformen sich plastisch und schließen daher Abfälle bereits nach kurzer Zeit dicht ein. Insofern sind neben dem Versatzmaterial Salzgrus keine besonderen geotechnischen Barrieren im unmittelbaren Nahfeld der Gebinde erforderlich. Tonsteine sind spröde und wenig standfest. Aus diesem Grund sind in diesem Wirtsgestein in der Regel zusätzliche geotechnische Nahfeldbarrieren vorgesehen. Im Gegensatz zu der Einlagerung in einer Salzformation ist es vorgesehen, sämtliche Endlagerbehälter mit einer 30 cm dicken Barriere aus Bentonitformteilen zu ummanteln. Diese geotechnische Barriere hat die Aufgabe, mögliche Lösungszutritte zu den Behältern zu verzögern und umgekehrt einen Rückhalteeffekt für potentiell in Lösung gehende Radionuklide zu gewährleisten. Bei der Bohrlochlagerung ist es auch möglich, anstatt die Endlagerbehälter mit Bentonitformteilen zu ummanteln, das gesamte Bohrloch mit Bentonitringen und im Bohrlochtiefpunkt mit einer Bentonitplatte auszukleiden.

Wie bei der Endlagerung im Wirtsgestein Salz wird das Endlager mit zwei Schächten betrieben. Der Frischwetterschacht, der als Förderschacht für das Haufwerk sowie Mannschafts- und Materialtransport fungiert und der Abwetterschacht, der für den Gebindettransport genutzt wird. Im Grubengebäude gibt es eine getrennte Wetterführung für den Überwachungs- und den Kontrollbereich. Im Überwachungsbereich werden die Auffahraktivitäten und im Kontrollbereich die Einlagerung vorgenommen. Die Betriebspunkte in den Einlagerungsstrecken werden sonderbewettert.

Das Sicherheitskonzept des Endlagers beruht hinsichtlich der Auslegung des Grubengebäudes darauf, dass der Integritätsnachweis für die geologische Barriere geführt werden kann. Das bedeutet, dass alle im Endlager entstehenden Hohlräume, wie die Einlagerungsstrecken und -bohrlöcher und alle Grubenräume für die Infrastruktur, hinreichend große Sicherheitsabstände zu potentiellen Störungszonen und sonstigen Schichtzonen einhalten müssen.

Die wesentliche Auslegungsrandbedingung für das Grubengebäude ist das Temperaturkriterium von 100 °C. Dieses erfordert eine systematische Planung der Anordnung von Einlagerungsstrecken und -bohrlöchern und deren Belegung mit Endlagerbehältern.

Aufgrund der in der Realität komplexen geologischen Verhältnisse können nur die geometrischen Grunddaten der Einlagerungsfelder wie Streckenabstand, Bohrlochdurchmesser, -länge und Behälterzwischenraum vorgegeben werden. Dabei sind folgende Randbedingungen zu berücksichtigen:

- Zuschnitt der Einlagerungsfelder etwa quadratisch zur Minimierung der Transportwege
- Begrenzung der Länge der Einlagerungsstrecken auf etwa 250 m
- Gleisradien für schienengebundenen Gebindettransport 25 - 30 m
- Abstände benachbarter Strecken zu Streckenstößen mindestens das Doppelte der Streckenbreite der größeren Strecke
- Abzweigwinkel Richtstrecke/Querschläge und Querschläge/Einlagerungsstrecke: 60°/120°
- Minimierung der Richtstrecken für den Gebindettransport durch geeignete Zusammenschaltung von Einlagerungsabteilungen

Anders als in einer standfesten Steinsalzformation, bei der man in der Regel auf einen Ausbau der Grubenbaue verzichten kann und in der Wahl von Streckenquerschnittsformen wenig Einschränkungen hat, handelt es sich bei Tongestein um ein Gebirge, das in dieser Hinsicht hohe Anforderungen an die Streckensicherung / den Streckenausbau stellt.

Die Strecken im Tongestein müssen ausgebaut werden. Dies kann in Abhängigkeit von der Nutzungs- und Lebensdauer durch Unterstützungsausbau, Ankerausbau oder Kombination davon erfolgen. Um zusätzliche Auflockerungen eines Streckenmantels zu vermeiden sind die Strecken gebirgsschonend herzustellen. Dies bedeutet, dass die Auffahrung nicht durch Bohr- und Sprengtechnik sondern maschinell erfolgt. Dazu kommen in erster Linie Teilschnittmaschinen in Frage.

8.2.2 Streckenlagerung im Wirtsgestein Ton

Bei der Streckenlagerung ist es vorgesehen, die ausgedienten Brennelemente/Brennstäbe aus Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken sowie aus Forschungsreaktoren in den Transport- und Lagerbehältern (TLB, CASTOR®) einzulagern. Bei der Endlagerung im Wirtsgestein Ton sollen die Endlagerbehälter mit einer 30 cm dicken Barriere aus Bentonitformteilen ummantelt werden. Wie diese Ummantelung bei den CASTOR®-Behältern erfolgen soll, ist noch nicht untersucht worden, könnte aus heutiger Sicht aber prinzipiell wie bei der POLLUX®-Einlagerung erfolgen. Dies ist aber in Rahmen weiterer Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zu untersuchen.

8.2.2.1 Transportabläufe über und unter Tage für die Streckenlagerung im Wirtsgestein Ton

Die eingesetzten Komponenten und die Transportabläufe sind für die CASTOR®-Behälter mit denen für die POLLUX®-Behälter vergleichbar. Bei den Komponenten müssen aufgrund der geringeren Außenabmessungen der CASTOR®-Behälter Anpassungen, z. B. Adaptereinsatz zur Handhabung, vorgenommen werden.

Die CASTOR®-Behälter werden auf den Anlieferfahrzeugen in die Umladeanlage des Endlagerbergwerks gebracht. In dieser Anlage erfolgt der Umschlag der Behälter auf sogenannte Plateauwagen für den weiteren, innerbetrieblichen Transport nach unter Tage. Der mit den CASTOR®-Behältern beladene Plateauwagen wird über den Abwetterschacht nach unter Tage befördert und danach mit einer batteriebetriebenen Grubenlokomotive bis zu einer Übergabestelle am Anfang der Einlagerungsstrecke geliefert. Dort wird der CASTOR®-Behälter mit Hilfe eines temporär ortsfesten Hubportals auf einen verlorenen Einlagerungswagen umgeladen und in der Einlagerungsstrecke mit Hilfe einer Lok an der vorgesehenen Endlagerposition abgestellt. Eine ausführliche Beschreibung der Transportabläufe über und unter Tage und der dazugehörigen Komponenten ist im Bericht ERATO /DBETec 2010a/ dargestellt.

8.2.2.2 Auslegung des Grubengebäudes für die Streckenlagerung im Wirtsgestein Ton

Aufgrund der relativ geringen Wärmeproduktion der Brennelemente/Brennstäbe aus Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken sowie aus Forschungsreaktoren werden für Behälter- und Streckenabstand nur maschinentechnische und bergbauliche Anforderungen zugrunde gelegt. Somit gilt für die Konzeption des Grubengebäudes ein Behälterabstand von 1 m. Der Streckenmittenabstand, der sich aus dem Doppelten der Einlagerungsstreckenbreite errechnet, beträgt ca. 15 m.

In der Abbildung 8-8 ist der Querschnitt durch eine Einlagerungsstrecke zur Streckenlagerung von POLLUX®-Behältern dargestellt. Im Rahmen dieses Vorhabens wird davon ausgegangen, dass der Querschnitt für die CASTOR®-Behälter analog dazu ist.

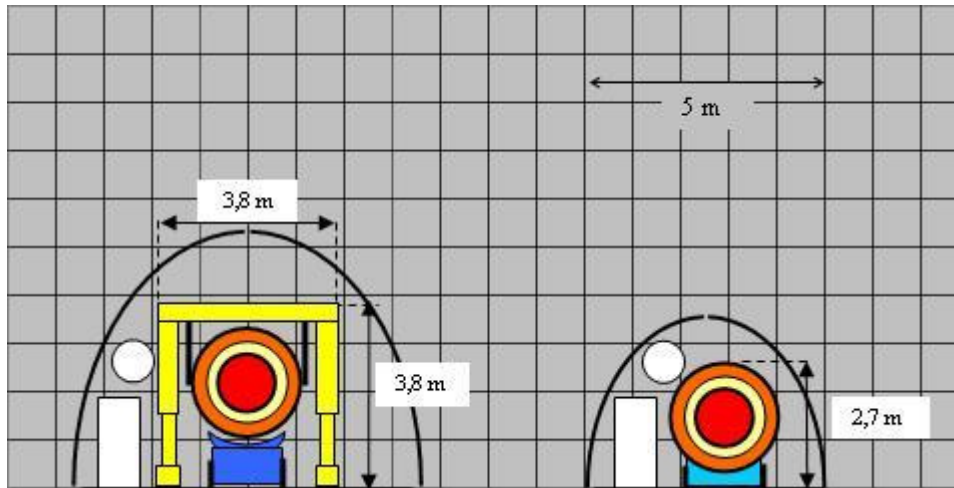


Abbildung 8-8: Querschnitt durch die Einlagerungsstrecke im Ton

Unter Berücksichtigung der vorgenannten Randbedingungen und Auslegungsgrundsätze können Einlagerungsfelder entworfen werden, die 527 CASTOR®-Behälter aufnehmen. Pro Strecke mit einer Länge von 250 m werden 58 Transport- und Lagerbehälter eingelagert. Die Fläche des Feldes umfasst ca. 46.625 m² bei einer Länge von 250 m und einer Breite von 186,5 m. In Abbildung 8-9 ist ein solches Feld dargestellt.

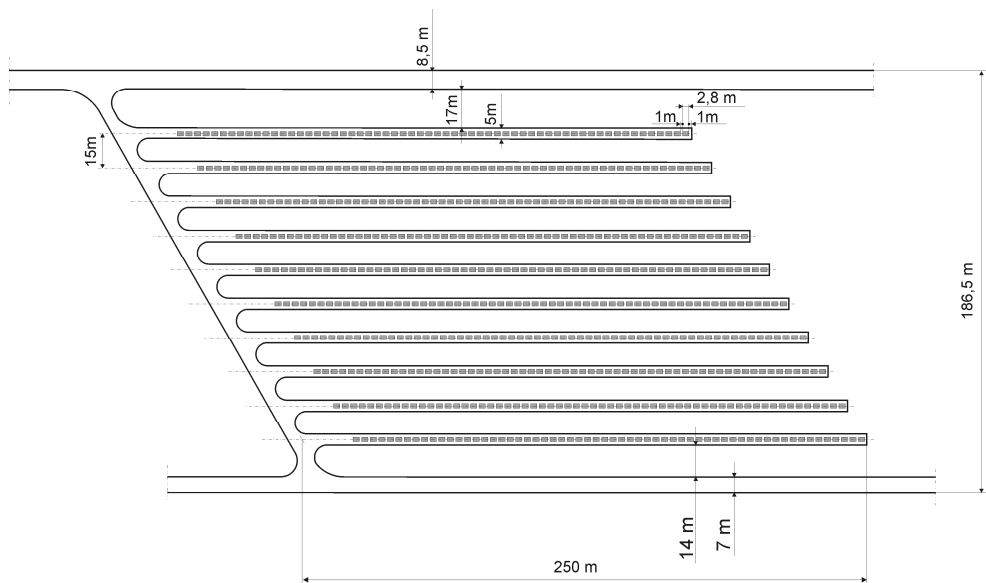


Abbildung 8-9: Entwurf eines Einlagerungsfeldes für Transport- und Lagerbehälter im Ton

8.2.3 Bohrlochlagerung im Wirtsgestein Ton

Bei der Bohrlochlagerung wird die Einlagerung von wärmeentwickelnder und hochradioaktiver Abfälle unter der Verwendung von Brennstabkorkillen (BSK) in vertikalen Bohrlöchern betrachtet. Aufgrund der begrenzten Mächtigkeit der Tongesteine ist die Bohrlochtiefe auf 50 m begrenzt /DBETec 2007/. Die für die vorgesehene Bohrlochlagerung entwickelte

Brennstabkokille besitzen derzeit keine Genehmigung als Endlagerbehälter. Damit ist der Eignungsnachweis der Brennstabkokille für die Endlagerung noch zu erbringen.

Die folgenden Ausführungen zur Bohrlochlagerung von ausgedienten Brennelementen/Brennstäben aus Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken sowie aus Forschungsreaktoren in Brennstabkokillen beschränken sich auf Brennstabkokillen mit Standardabmessungen, die geometrisch identisch mit der Brennstabkokille für die ausgedienten Brennstäbe aus den Leistungsreaktoren (BSK-3) ist. Damit kann die Einlagerung analog zur BSK erfolgen. Die modifizierte Brennstabkokille (BSK THTR/AVR_{BE-Kannen}) weicht von der BSK-3 lediglich in ihrem Durchmesser ab (siehe auch Abbildung 5-4). Damit wären bei der Handhabung der modifizierten Brennstabkokille ggf. Anpassungen erforderlich und es müsste ein größerer Bohrlochdurchmesser berücksichtigt werden. Die Planung und Umsetzbarkeit eines größeren Bohrlochdurchmessers ist in Rahmen von weiteren FuE-Arbeiten zu untersuchen. Aus diesem Grund wird die modifizierte Brennstabkokille bei der Grubengebäudeplanung im Rahmen dieses Vorhabens nicht weiter berücksichtigt.

Bei der Bohrlochlagerung ist vorgesehen das Bohrloch mit einem Außenliner auszukleiden, um bei geringer Bohrlochstabilität das Bohrloch vor Nachfall von losem Tongestein zu schützen /DBETec 2010a/. Um die Anforderung an eine Rückholbarkeit der Endlagerbehälter während der Betriebsphase erfüllen zu können, muss anstatt des vorgesehenen Außenliners eine dickere Verrohrung eingebaut werden, die dem Gebirgsdruck über die gesamte Betriebszeit des Endlagers stand hält. Auch diese Auslegung wurde bisher nicht durchgeführt und muss in Rahmen von weiteren FuE-Arbeiten erarbeitet werden.

8.2.3.1 Transportabläufe über und unter Tage für die Bohrlochlagerung im Wirtsgestein Ton

Die mit den Transportbehältern (CASTOR[®]) beladenen Anlieferfahrzeuge fahren zum Umladebereich des Endlagerbergwerks. Dort werden die jeweiligen Fahrzeuge geöffnet und die Stoßdämpfer von den Behältern entfernt. In der Umladeanlage erfolgt der Umschlag der Behälter auf sogenannte Plateauwagen für den weiteren, innerbetrieblichen Transport. Die in CASTOR[®]-Behältern angelieferten Brennstabkokillen mit Standardabmessung werden in der Heißen Zelle zunächst aus den Transportbehältern entnommen und in selbstabschirmende Transferbehälter umgeladen. Die Transferbehälter werden dann auf Plateauwagen zum weiteren innerbetrieblichen Transport abgesetzt. Der mit den Transferbehälter beladene Plateauwagen wird dann über den Abwetterschacht nach unter Tage befördert und dort mittels einer batteriebetriebenen Grubenlokomotive zum Einlagerungsfeld und in die Einlagerungsstrecke transportiert.

Der Transferbehälter wird mit Hilfe der Einlagerungsvorrichtung vom Plateauwagen gehoben und nach Zurückziehen des Plateauwagens in eine vertikale Position geschwenkt. Danach wird die Abschirmhaube auf den Transferbehälter gesetzt und die Brennstabkokille auf die Bohrlochsleuse abgesetzt. Der Transferbehälter wird kopfseitig geöffnet und der Kokillengreifer des Hebezeuges an die Brennstabkokille angeschlagen. Anschließend werden Bohrloch sowie der Transferbehälter fußseitig geöffnet und die Brennstabkokille in das Bohr-

loch abgelassen. Nach dem Hochziehen des Kokillengreifers werden Bohrloch und Transferbehälter geschlossen, die Abschirmhaube entfernt und der Transferbehälter vom Hebezeug auf den Plateauwagen abgestellt. Als nächstes wird das Bohrloch bis zur nächsten Kokillenabsetzposition mit Versatzmaterial verfüllt. Als Versatzmaterial ist Wirtsgestein oder Bentonitgranulat vorgesehen. Abbildung 8-10 zeigt schematisch den Einlagerungsprozess. Eine Ausführliche Beschreibung der Transportabläufe über und unter Tage und der dazugehörigen Komponenten ist im Bericht ERATO /DBETec 2010a/ dargestellt.

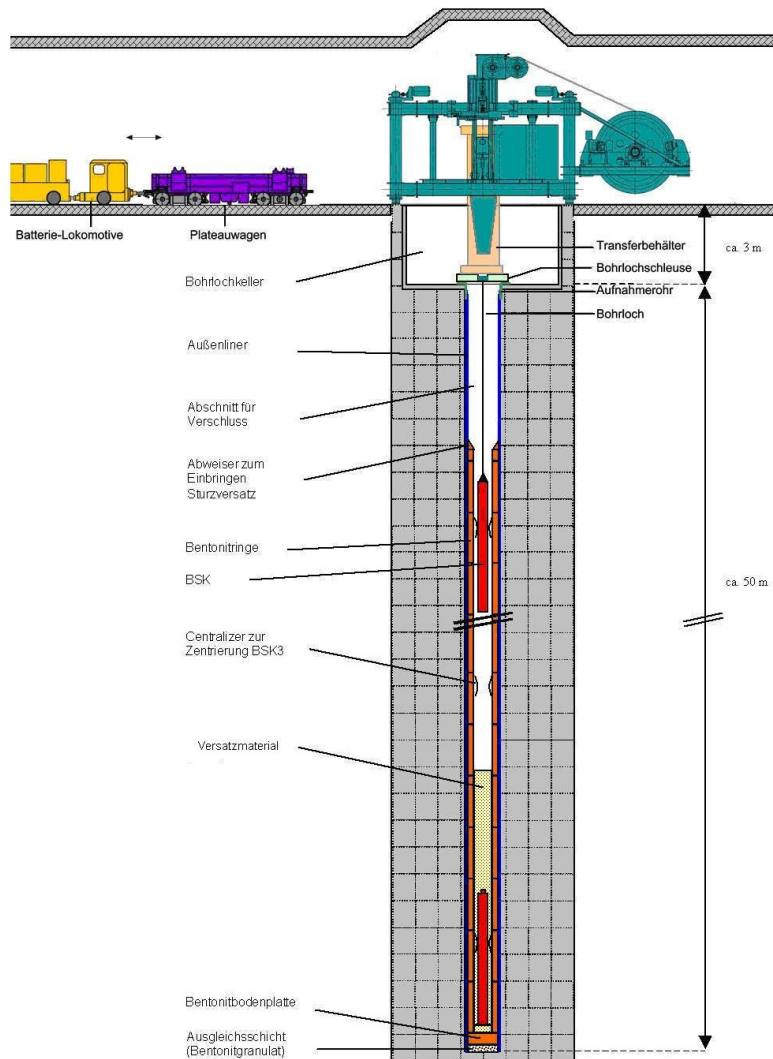


Abbildung 8-10: Einlagerungsvorgang der Brennstabkokille im Ton

8.2.3.2 Auslegung des Grubengebäudes für die Bohrlochlagerung im Wirtsgestein Ton

Aufgrund der relativ geringen Wärmeproduktion der Brennelemente/Brennstäbe aus Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken sowie aus Forschungsreaktoren werden für Bohrloch-

und Streckenabstand nur maschinentechnische und bergbauliche Anforderungen zugrunde gelegt. Somit gilt für die Konzeption des Grubengebäudes ein Bohrlochabstand von 20 m. Der Streckenmittenabstand, der sich aus dem Doppelten der Einlagerungsstreckenbreite errechnet, beträgt ca. 27 m.

In Abbildung 8-11 ist der Querschnitt durch eine Einlagerungsstrecke zur Bohrlochlagerung von Brennstabkokillen dargestellt.

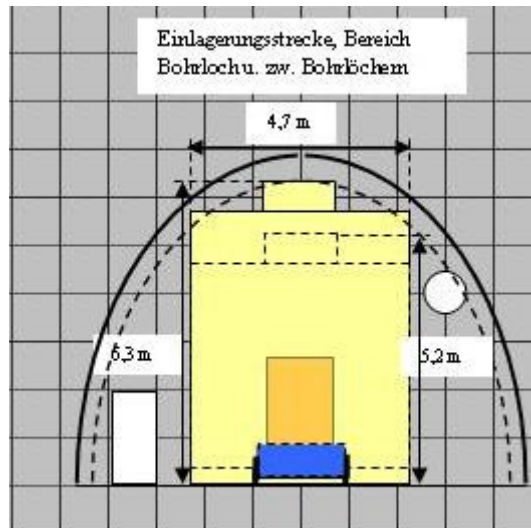


Abbildung 8-11: Querschnitt durch die Bohrloch-Einlagerungsstrecke im Ton

Für die Bohrlöcher wird eine Tiefe von 50 m und eine Anzahl von 5 Brennstabkokillen je Bohrloch angenommen. Unter Berücksichtigung der vorgenannten Randbedingungen und Auslegungsgrundsätze können Einlagerungsfelder entworfen werden, die 523 Brennstabkokillen aufnehmen. Die Fläche des Feldes umfasst ca. 75.375 m² bei einer Länge von 250 m und einer Breite von 301,5 m. In Abbildung 8-12 ist ein solches Einlagerungsfeld dargestellt.

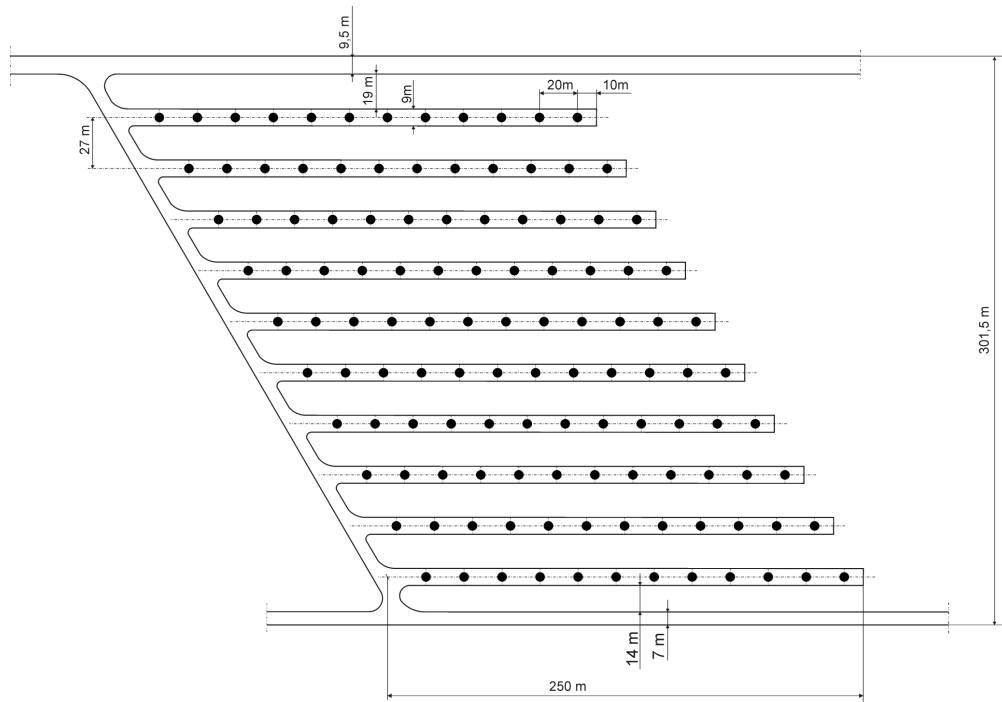


Abbildung 8-12: Entwurf eines Einlagerungsfeldes für Brennstabkokillen im Ton

9 Betriebssicherheit

Im folgenden Kapitel erfolgt eine Bewertung der Betriebssicherheit der beiden Einlagerungsvarianten in den Wirtsgesteinen Salz und Ton. Die Besonderheit bei der Bewertung der Betriebssicherheit eines HAW-Endlagers besteht darin, dass sowohl kerntechnische und strahlenschutzrechtliche Aspekte als auch bergrechtliche Vorgaben zu erfüllen sind. Eine zu erfüllende Grundanforderung bei der Betriebssicherheit ist, dass mit den geplanten Betriebsabläufen und der verfügbaren Betriebstechnik die Sicherheitsanforderungen des Bergbaus und des Strahlenschutzes im bestimmungsgemäßen Betrieb sowie bei Betriebsstörungen durch geeignete technische und/oder organisatorische Maßnahmen gewährleistet werden. Zur Bewertung der Betriebssicherheit sind die möglichen Schwachstellen und relevanten Störfälle zu identifizieren und zu betrachten. Dabei ist festzustellen, inwieweit die Einhaltung der Anforderungen an die Betriebssicherheit technisch realisierbar ist oder bereits nachgewiesen wurde. Noch bestehende Defizite und Konflikte sind entweder durch zukünftige FuE-Arbeiten oder durch Änderungen im unterstellten Endlagerkonzept auszuräumen.

Die Langzeitsicherheit kann in diesem Planungsstadium für die Endlagerung der Brennelemente/Brennstäbe aus Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken sowie aus Forschungsreaktoren im Salz und im Ton nicht bewertet werden.

9.1 Wirtsgestein Salz

Für die Streckenlagerung von POLLUX[®]-Behältern mit ausgedienten Brennstäben aus Leistungsreaktoren wurde im Rahmen des FuE-Programms „Direkte Endlagerung ausgedienter Brennelemente (DEAB)“ /DBE 1995a/ hinreichend untersucht, ob die o. g. Grundanforderung an die Sicherheit des Bergbaus und des Strahlenschutzes im bestimmungsgemäßen Betrieb und bei Betriebsstörungen gewährleistet werden. Dabei wurde festgestellt, dass ein sicherer Transport und eine sichere Handhabung und Einlagerung von POLLUX[®]-Behältern gegeben ist.

Für die CASTOR[®]-Behälter mit den Brennelemente/Brennstäben aus Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken sowie aus Forschungsreaktoren werden grundsätzlich die selben Komponenten für den Transport, die Handhabung und Einlagerung benutzt. Da aber aufgrund der geringen Größenabmessungen der CASTOR[®]-Behälter gegenüber den POLLUX[®]-Behältern ggf. Anpassungsmaßnahmen an den Komponenten vorzunehmen sind, kann die Aussage nicht komplett übernommen werden. Für die Anpassungsmaßnahmen ist der sichere Transport und die sichere Handhabung und Einlagerung zu überprüfen. Des Weiteren ist die aus den Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle /BMU 2010/ resultierende Rückholbarkeit der Endlagerbehälter während der Betriebsphase des Endlagers im Hinblick auf die Gewährleistung der Sicherheitsanforderungen des Bergbaus und des Strahlenschutzes zu untersuchen.

Für die Bohrlochlagerung von Brennstabkaskillen stehen die Untersuchungen hinsichtlich der Gewährleistung der Sicherheitsanforderungen des Bergbaus und des Strahlenschutzes im bestimmungsgemäßen Betrieb und bei Betriebsstörungen bei den geplanten Betriebsabläu-

fen und der verfügbaren Betriebstechnik zum Teil noch aus. Die Einlagerungsvorrichtung, die Bohrlochsleuchte und der Transferbehälter wurden gemäß den Anforderungen aus der KTA-Regel 3902 „Auslegung von Hebezeugen in Kernkraftwerken“ /KTA 1999/ ausgelegt und gefertigt. Dies wurde durch unabhängige Sachverständige überprüft und bestätigt. Eine Ausnahme bildet hierbei das einsträngige Hubseil, das bei vollständiger Kompatibilität zur KTA-Regel 3902 /KTA 1999/ zweisträngig auszuführen ist.

Weiterhin ist festzuhalten, dass das Herstellen von 300 m tiefen vertikalen Bohrlöchern in Serie mit den geforderten Genauigkeiten in der tolerierbaren Abweichung von der Vertikalen noch zu zeigen ist. Ebenso haben bisherige Demonstrationsversuche zur Erprobung der Einlagerung von Brennstabkokillen nicht hinreichend gezeigt, ob die Einbringtechnik für Salzgrusversatz in den Ringraum zwischen Brennstabkokille und Bohrlochwand sicher und zuverlässig betrieben werden kann. Lastabtragelemente, die im Einlagerungsbohrloch die Funktion haben, Stapellast von mehreren Brennstabkokillen aufzunehmen und sicher in das Gebirge abzuleiten, sind ebenfalls hinsichtlich ihrer Betriebssicherheit zu untersuchen. Bisher wurde in Demonstrationsversuchen nur die prinzipielle Machbarkeit eines Lastabtragelements gezeigt.

Auch bei der Bohrlochlagerung ist die aus den Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle /BMU 2010/ resultierende Rückholbarkeit der Endlagerbehälter während der Betriebsphase des Endlagers im Hinblick auf die Gewährleistung der Sicherheitsanforderungen des Bergbaus und des Strahlenschutzes zu untersuchen.

9.2 Wirtsgestein Ton

Bislang gibt es noch keine Untersuchungen hinsichtlich der Gewährleistung der Sicherheitsanforderungen des Bergbaus und des Strahlenschutzes im bestimmungsgemäßen Betrieb und bei Betriebsstörungen bei den geplanten Betriebsabläufen und der verfügbaren Betriebstechnik im Wirtsgestein Ton. Falls bei der Strecken- oder Bohrlochlagerung die selben Komponenten wie im Wirtsgestein Salz genutzt werden, können die grundlegenden Aussagen, die im vorherigen Kapitel 9.1 gemacht wurden und die nicht unter Beeinflussung durch das Wirtsgestein stehen, übernommen werden.

Auch beim Wirtsgestein Ton ist die aus den Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle /BMU 2010/ resultierende Rückholbarkeit der Endlagerbehälter während der Betriebsphase des Endlagers im Hinblick auf die Gewährleistung der Sicherheitsanforderungen des Bergbaus und des Strahlenschutzes zu untersuchen.

10 Zusammenfassung und Empfehlung

Im Rahmen dieses Vorhabens wurden das Mengengerüst der Brennelemente/Brennstäbe aus deutschen Prototyp- und Versuchs-Kernkraftwerken sowie aus Forschungsreaktoren für die Endlagerung in Deutschland ermittelt. Es erfolgte eine Beschreibung und Charakterisierung dieser Brennelemente/Brennstäbe. Aufbauend auf dem ermittelten Mengengerüst der Brennelemente/Brennstäbe wurde ein Lösungsansatz für die zukünftige Behandlung/Lagerung entwickelt, der über den auf max. 40 Jahre begrenzten Zeitraum der Zwischenlagerung hinausgeht. Dazu wurden die Brennelemente/Brennstäbe in bestehende Endlagerkonzeptionen für die Brennelemente/Brennstäbe aus Leistungsreaktoren und der Wiederaufarbeitungsabfälle für die Wirtsgesteine Salz und Ton integriert.

Das in diesem Vorhaben dargestellte Mengengerüst wurde aus den Angaben des Bundesamt für Strahlenschutz (BfS), den Angaben im Joint Convention Bericht des BMU 2009, Angaben der Ablieferungspflichtigen sowie eigener Recherchen ermittelt. Die Beschreibung und Charakterisierung der Brennelemente/Brennstäbe aus den Prototyp- und Versuchs-Kernkraftwerken sowie aus den Forschungsreaktoren erfolgte auf Basis von Angaben in Zulassungsscheinen der CASTOR®-Behälter, von Angaben der Brennelement-Herstellern sowie weiterer Daten, die durch eigene Recherche ermittelt wurden.

Für die Endlagerung in Deutschland sind die Brennelemente der Hochtemperaturreaktoren (AVR und THTR 300), die Brennstäbe des KNK II, die nicht wiederaufgearbeitet werden konnten, die restlichen Brennstäbe des Nuklear Schiffs Otto-Hahn, die Brennelemente des FRM II und des RFR, sowie die ab 2016 anfallenden Brennelemente des BER II und des FRMZ zu berücksichtigen. In der Tabelle 10-1 ist das Mengengerüst der Brennelemente/Brennstäbe aus deutschen Prototyp- und Versuchs-Kernkraftwerken sowie aus Forschungsreaktoren dargestellt.

Tabelle 10-1: Mengengerüst der ausgedienten Brennelemente/Brennstäbe aus den Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken sowie aus den Forschungsreaktoren

Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerk/ Forschungsreaktor	Anzahl an Brennelementen/Brennstäben
AVR	288.033 Brennelement-Kugeln
THTR-300	617.606 ⁶ Brennelement-Kugeln
KNK	2.484 Brennstäbe
Otto-Hahn	52 Brennstäbe
RFR	951 Brennelemente
FRM-II	190 Brennelemente
BER-II	287 Brennelemente
FRMZ	89 Brennelemente

⁶ Gemäß dem Schreiben vom 02.02.2012 der HKG(Hochtemperatur-Kernkraftwerk GmbH) handelt es sich um 617.606 BE anstatt der im Dezember 2011 angegebenen 617.878 BE /HKG 2012/.

Als erste konzeptionelle Überlegung werden als Endlagerbehälter für die Brennelemente/Brennstäbe deutscher Prototyp- oder Versuchs-Kernkraftwerken sowie Forschungsreaktoren die Transport- und Lagerbehälter (CASTOR®) oder alternativ dazu die Brennstabkokillen (BSK) betrachtet. In der Tabelle 10-2 ist die Anzahl der CASTOR®-Behälter für die einzelnen Reaktoren sowie die Gesamtaktivitäten, Gesamtmassen und Gesamtvolumina dargestellt. Die Tabelle 10-3 enthält die selben Angaben für die Brennstabkokille/modifizierte Brennstabkokille (BSK THTR/AVR_{BE}-Kannen).

Tabelle 10-2 : Anzahl Transport- und Lagerbehälter für Brennelemente/Brennstäbe aus deutschen Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken sowie aus Forschungsreaktoren mit Angaben zu Gesamtaktivitäten, -massen und -volumina

Versuchs- und Prototyp- Kernkraftwerk/ Forschungsreaktor	Endlagergebinde	Anzahl	Gesamt-Aktivität [Bq]	Gesamt-Masse [Mg]	Gesamt-Volumen [m³]
AVR	CASTOR® THTR/AVR	152	2,3 E+17	3.952	632
THTR 300	CASTOR® THTR/AVR	305	4,6 E+17	7.930	1.269
KNK II und Otto-Hahn	CASTOR® KNK	4	1,9 E+16	104	17
RFR	CASTOR® MTR 2	18	6,2 E+17	288	47
FRM II	CASTOR® MTR 3	38	1,3 E+18	608	100
BER II		9	3,1 E+17	144	24
FRMZ		1	3,4 E+16	16	3
Gesamt	CASTOR®-Behälter	527	3,0 E+18	13.042	2.091

Tabelle 10-3: Anzahl Brennstabkokillen für Brennelemente/Brennstäbe aus deutschen Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken sowie aus Forschungsreaktoren mit Angaben zu Gesamtaktivitäten, -massen und -volumina

Versuchs- und Prototyp- Kernkraftwerk/ Forschungsreaktor	Endlagergebinde	Anzahl	Gesamt-Aktivität [Bq]	Gesamt-Masse [Mg]	Gesamt-Volumen [m³]
AVR	BSK THTR/AVR _{BE} -Kugeln	152	2,3 E+17	380	109
	oder BKS THTR/AVR _{BE} -Kannen	oder 76		oder 456	oder 147
THTR 300	BSK THTR/AVR _{BE} -Kugeln	305	4,6 E+17	765	220
	oder BKS THTR/AVR _{BE} -Kannen	oder 153		oder 915	oder 297
KNK II und Otto-Hahn	BSK KNK	5	1,9 E+16	15	4
RFR	BSK MTR	10	6,2 E+17	30	7
FRM II		38	1,3 E+18	114	27
BER II		12	3,1 E+17	36	9
FRMZ		1	3,4 E+16	3	1
Gesamt	BSK	523 ¹ oder 295 ²	3,0 E+18	1.343 ¹ oder 1.569 ²	377 ¹ oder 492 ²

1: mit BSK THTR/AVR_{BE}-Kugeln 2: mit BSK THTR/AVR_{BE}-Kannen

Während die CASTOR®-Behälter eine Zulassung für den Transport und die Lagerung der Brennelemente/Brennstäbe besitzen, existieren für die BSK/modifizierte BSK lediglich Konzeptideen. Für beide Behältertypen ist der Eignungsnachweis für die Endlagerung zu erbringen. Dafür fehlt vor allem der Nachweis zur Unterkritikalität. Dieser liegt lediglich für den CASTOR® THTR/AVR vor. Daher ist die in diesem Vorhaben vorgenommene Beladung für CASTOR® KNK und für die unterschiedlichen Varianten des CASTOR® MTR 2 sowie für die BSK/modifizierten BSK als vorläufig anzusehen. Des Weiteren ist die Dichtheit bzw. Integrität der Behälter über den in den „Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Stoffe“ des BMU genannten Zeitraum von 500 Jahren nachzuweisen.

Die Brennelemente/Brennstäbe deutscher Prototyp- und Versuchs-Kernkraftwerke sowie Forschungsreaktoren werden in bestehende Endlagerkonzeptionen für die Wirtsgesteine Salz und Ton mit jeweils zwei Einlagerungsvarianten integriert. In diesem Zusammenhang wurde die Streckenlagerung der CASTOR®-Behälter in bis zu 250 m lange horizontalen Strecken und die Bohrlochlagerung der Brennstabkokillen / modifizierten Brennstabkokillen in bis zu 300 m (Salz) bzw. 50 m (Ton) tiefe vertikale Bohrlöcher betrachtet. Die Rahmenbedingungen bei der Endlagerung dieser Brennelemente/Brennstäben sind grundsätzlich die gleichen wie die der Brennelementen aus den Leistungsreaktoren und den Wiederaufarbeitungsabfällen. Auch die Transportabläufe über und unter Tage sind identisch. Aufgrund der unterschiedlichen Größen der CASTOR®-Behältern gegenüber den POLLUX®-Behältern bei der Streckenlagerung sind eventuelle Anpassungsmaßnahmen vorzunehmen; gleiches gilt für die modifizierten Brennstabkokille gegenüber der Brennstabkokille mit Standardabmessungen bei der Bohrlochlagerung aufgrund der unterschiedlichen Durchmesser. Die Grenztemperaturen der beiden Wirtsgesteine von 200 °C (Salz) und 100 °C (Ton) werden aufgrund der geringen Wärmeleistung der Brennelemente/Brennstäbe deutscher Prototyp- und Versuchs-Kernkraftwerken sowie Forschungsreaktoren eingehalten. Damit gelten für die Grubengebäudeplanung lediglich maschinentechnische und bergbauliche Anforderungen, bei den Strecken-, Behälter- und Bohrlochabständen sowie den Streckenquerschnitten. Auf Basis dieser Daten wurden die Einlagerungsfelder und -strecken für die Strecken- und die Bohrlochlagerung in den beiden Wirtsgesteinen ausgelegt.

Bei der Erstellung des Lösungsansatzes zeigte sich, dass aufgrund der Forderungen in den „Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Stoffe“ des BMU die Rückholung der Endlagergebäude während der Betriebsphase des Endlagers vor allem im Wirtsgestein Ton zu untersuchen ist. Im Salz werden erste Konzepte zur Rückholung der Endlagergebäude im Rahmen der Vorläufigen Sicherheitsanalyse Gorleben erarbeitet. Dennoch ist im Wirtsgestein Salz die Rückholung der Endlagergebäude während der Betriebsphase des Endlagers weiter zu untersuchen. Bei der Bohrlochlagerung ist bei der Verwendung der modifizierten Brennstabkokille eine Planung und Umsetzbarkeit eines größeren Bohrl Lochdurchmessers zu untersuchen. Aus diesem Grund wurde für die modifizierte Brennstabkokille keine Grubengebäudeplanung vorgenommen. Des Weiteren ist für eine Endlagerung im Wirtsgestein Ton die Machbarkeit der vorgesehenen Bentonitumantelung der Endlagerbehälter bei den CASTOR®-Behältern zu untersuchen.

Bei der Bewertung der Betriebssicherheit zeigte sich, dass es bislang für das Wirtsgestein Ton keinerlei Untersuchungen zur Betriebssicherheit gibt. Dies ist im Rahmen von weiteren FuE-Projekten zu leisten. Im Wirtsgestein Salz ist für die Streckenlagerung der sichere Transport sowie die sichere Handhabung und Einlagerung von POLLUX[®]-Behältern nachgewiesen worden. Für die CASTOR[®]-Behälter mit den Brennelemente/Brennstäben aus Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken sowie aus Forschungsreaktoren werden grundsätzlich die selben Komponenten genutzt. Da aber aufgrund der geringeren Größenabmessungen der CASTOR[®]-Behälter gegenüber den POLLUX[®]-Behältern ggf. Anpassungsmaßnahmen an den Komponenten vorzunehmen sind, ist der sichere Transport und die sichere Handhabung und Einlagerung mit diesen Anpassungsmaßnahmen erneut im Rahmen von weiteren FuE-Projekten zu überprüfen. Für die Bohrlochlagerung von Brennstabkokillen stehen die Untersuchungen hinsichtlich der Betriebssicherheit zum Teil noch aus. Für beide Einlagerungsvarianten ist die Betriebssicherheit bei der in den Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle des BMU geforderten Rückholung der Endlagerbehälter während der Betriebsphase des Endlagers im Rahmen von weiteren FuE-Projekten nachzuweisen. Eine Bewertung der Langzeitsicherheit ist bei dem derzeitigen Planungsstand für die Endlagerung der Brennelemente/Brennstäbe aus Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken sowie aus Forschungsreaktoren nicht möglich und ist im Rahmen von weiteren FuE-Projekten nachzuweisen.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 4-1:	Brennelement der Hochtemperaturreaktoren AVR und THTR 300	20
Abbildung 4-2:	Brennstab (links) und Brennelement (rechts) der Kompakten Natriumgekühlten Kernreaktoranlage	22
Abbildung 4-3:	Brennelemente des RFR	26
Abbildung 4-4:	Brennelement des FRM 2	28
Abbildung 4-5:	Brennelement des BER II	29
Abbildung 4-6:	Brennstab (links) und Brennelement (rechts) des FRMZ	30
Abbildung 5-1:	Schematische Darstellung eines CASTOR [®] THTR/AVR mit zwei AVR-TL-Kannen für AVR-BE (linke Seite) und mit einer THTR-Kanne (Stahlkanne) für THTR-BE (rechte Seite)	32
Abbildung 5-2:	Schematische Darstellung eines CASTOR [®] KNK	34
Abbildung 5-3:	Schematische Darstellung eines CASTOR [®] MTR 2	36
Abbildung 5-4:	Schematische Darstellung der BSK mit Standardabmessungen (analog BSK-3) und der modifizierten BSK (BSK THTR/AVR _{BE} -Kannen)	40
Abbildung 5-5:	Schematische Darstellung der AVR-TL-Kannen und THTR-Kannen	41
Abbildung 5-6:	Schematische Darstellung (Schnitt) der Beladung der modifizierten BSK mit AVR-TL-Kannen (links) und THTR-Kannen (Mitte) und der BSK mit Standardabmessungen mit Brennstabbüchsen (rechts)	41
Abbildung 5-7:	Schematische Darstellung (Schnitt) der Beladung der BSK mit Standardabmessungen mit BE-Kugeln aus AVR und THTR (oben links) und Brennelementen/ Brennstäben des RFR (WWR-M 3-fach, oben Mitte, und EK-10-BE bzw. EK-10-BS-Behälter, oben rechts), des FRM II (unten links), des BER II (unten Mitte) und des FRMZ (unten rechts)	42
Abbildung 8-1:	Plateauwagen mit POLLUX [®] -Behälter	55
Abbildung 8-2:	Einlagerungsvorrichtung für POLLUX [®] -Behälter im Salz	56
Abbildung 8-3:	Querschnitt durch die Einlagerungsstrecke im Salz	57
Abbildung 8-4:	Entwurf eines Einlagerungsfeldes für Transport- und Lagerbehälter im Salz	57
Abbildung 8-5:	Einlagerungsvorrichtung für die Brennstabkokille im Salz	59
Abbildung 8-6:	Querschnitt durch die Bohrloch-Einlagerungsstrecke im Salz	60
Abbildung 8-7:	Entwurf eines Einlagerungsfeldes für BSK im Salz	60
Abbildung 8-8:	Querschnitt durch die Einlagerungsstrecke im Ton	64
Abbildung 8-9:	Entwurf eines Einlagerungsfeldes für Transport- und Lagerbehälter im Ton	64

Abbildung 8-10: Einlagerungsvorgang der Brennstabkokille im Ton	66
Abbildung 8-11: Querschnitt durch die Bohrloch-Einlagerungsstrecke im Ton	67
Abbildung 8-12: Entwurf eines Einlagerungsfeldes für Brennstabkokillen im Ton	68

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1:	Anzahl der Brennelemente/Brennstäbe aus Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken sowie aus Forschungsreaktoren und Anzahl der dazugehörigen Transport- und Lagerbehälter	11
Tabelle 3-1:	Spezifikationswerte der Brennelementkugeln der Arbeitsgemeinschaft Versuchsreaktor (AVR)	13
Tabelle 3-2:	Spezifikationswerte der Brennelementkugeln des Thorium-Hochtemperaturreaktors (THTR 300)	14
Tabelle 3-3:	Spezifikationswerte der Abbrandmessreaktor-Brennelemente des Thorium-Hochtemperaturreaktors (THTR 300)	14
Tabelle 3-4:	Spezifikationswerte für EK-10-Brennelemente und –Brennstabbehälter des Rossendorfer Forschungsreaktors RFR	15
Tabelle 3-5:	Spezifikationswerte für WWR-M- und WWR-M2-Brennelemente des Rossendorfer Forschungsreaktors RFR	15
Tabelle 3-6:	Spezifikationswerte für Kompaktbrennelemente des Forschungsreaktors München FRM II	16
Tabelle 3-7:	Spezifikationswerte für kastenförmige MTR-Brennelemente des Forschungsreaktors Berlin BER II	16
Tabelle 3-8:	Spezifikationswerte für TRIGA-Brennelemente des Forschungsreaktors Mainz FRMZ	17
Tabelle 4-1:	Charakteristik der AVR-BE	20
Tabelle 4-2:	Konstruktive Auslegungsdaten Brennstäbe KNK II	23
Tabelle 4-3:	Charakteristik der EK-10-Brennelemente (RFR)	24
Tabelle 4-4:	Charakteristik der WWR-M/M2-Brennelemente (RFR)	25
Tabelle 5-1:	Werkstoffe und Massen der wesentlichen Behälterbauteile eines CASTOR® THTR/AVR (unbeladen)	33
Tabelle 5-2:	Werkstoffe und Massen der wesentlichen Behälterbauteile eines CASTOR® MTR 2 (unbeladen)	38
Tabelle 5-3:	Geometrie und Abmessungen der AVR-TL-Kannen, THTR-Kannen und Brennstabbüchsen des Typs Phenix und OH	40
Tabelle 5-4:	Geometrie und Abmessungen der Brennelemente/Brennstäbe	42
Tabelle 5-5:	Beladung von CASTOR® THTR/AVR und CASTOR® KNK und von Brennstabkokillen mit AVR-TL-Kannen, THTR-Kannen und Brennstabbüchsen des Typs Phenix und OH	43
Tabelle 5-6:	Beladung von CASTOR® MTR 2 und von Brennstabkokillen mit Brennelementen/Brennstäben	43

Tabelle 5-7:	Massen und Volumina je Transport- und Lagerbehälter für Brennelemente/ Brennstäbe aus Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken sowie aus Forschungsreaktoren	44
Tabelle 5-8:	Massen und Volumina je Brennstabkokille für Brennelemente/Brennstäbe aus Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken sowie aus Forschungsreaktoren	44
Tabelle 6-1:	Gesamtaktivitäten der CASTOR®-Behälter für die Brennelemente/Brennstäbe	45
Tabelle 6-2:	Gesamtaktivitäten der Brennstabkokillen für die Brennelemente/Brennstäbe	46
Tabelle 6-3:	Gesamtmassen und -volumina der CASTOR®-Behälter für die Brennelemente/ Brennstäbe	46
Tabelle 6-4:	Gesamtmassen und -volumina der Brennstabkokillen für Brennelemente/ Brennstäbe	47
Tabelle 7-1:	Übersicht über die lückenhafte Datenbasis und die fehlenden Nachweise zur Qualifizierung von Transport- und Lagerbehältern für die Endlagerung sowie Vorschläge für evtl. Anpassungsmaßnahmen an die TLB für die Endlagerung	50
Tabelle 10-1:	Mengengerüst der ausgedienten Brennelemente/Brennstäbe aus den Versuchs- und Prototyp- Kernkraftwerken sowie aus den Forschungsreaktoren	71
Tabelle 10-2 :	Anzahl Transport- und Lagerbehälter für Brennelemente/Brennstäbe aus deutschen Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken sowie aus Forschungs-reaktoren mit Angaben zu Gesamtaktivitäten, -massen und -volumina	72
Tabelle 10-3:	Anzahl Brennstabkokillen für Brennelemente/Brennstäbe aus deutschen Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken sowie aus Forschungsreaktoren mit Angaben zu Gesamtaktivitäten, -massen und -volumina	72

Abkürzungsverzeichnis

a	Jahr
AKR	Ausbildungskernreaktor Dresden
Al	Aluminium
AMR-BE	Abbrandmessreaktor-Brennelement
ANF	Advances Nuclear Fuel
AVR	Arbeitsgemeinschaft Versuchsreaktor
BE	Brennelement
BER II	Berliner Experimentierreaktor II
BfS	Bundesamt für Strahlenschutz
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
Bq	Bequcerel
BS	Brennstab
BSK	Brennstabkokille
BTE	Betriebselement
d	Tag
DOE	U.S. Department of Energy
FR-2	Forschungsreaktor 2, Karlsruhe
FRMB	Forschungs- und Messreaktor Braunschweig
FRG-1	Forschungsreaktor Geesthacht 1
FRG-2	Forschungsreaktor Geesthacht 2
FRJ-1	Forschungsreaktor Jülich 1 (MERLIN)
FRJ-2	Forschungsreaktor Jülich 2 (DIDO)
FRM	Forschungsreaktor München
FRM II	Forschungsreaktor München II
FRMZ	Forschungsreaktor Mainz
FRN	Forschungsreaktor Neuherberg
FuE	Forschung und Entwicklung
FZJ	Forschungszentrum Jülich
g	Gramm
Gew. %	Gewichtsprozent
GWd/tSM	Gigawatttage pro Tonne Schwermetall
HAW	High Active Waste
HDR	Heißdampfreaktor Großwelzheim
HEU	High Enriched Uranium
kg	Kilogramm
KKN	Kernkraftwerk Niederaichbach
KNK II	Kompakte Natriumgekühlte Kernraktoranlage, Karlsruhe
KTA	Kerntechnischer Ausschuss
LEU	Low Enriched Uranium
m ³	Kubikmeter
Mg	Magnesium
Mg	Megagramm
mm	Millimeter
MOX	Mischoxid

MTR	Materialtestreaktor
MW	Megawatt
MWd	Megawatttage
MZFR	Mehrzweckforschungsreaktor Karlsruhe
OH	Otto-Hahn
Pu	Plutonium
PyC	Pyrokohlenstoff
RFR	Rosendorfer Forschungsreaktor
SiC	Siliziumcarbid
SUR	Siemens-Unterrichtsreaktor
THTR	Thorium-Hochtemperatur-Reaktor
TLB	Transport- und Lagerbehälter
TRMM	Treiberzonenbrennelement mit Moderator
TROM	Treiberzonenbrennelement ohne Moderator
tSM	Tonne Schwermetall
TU	Technische Universität
U	Uran
UO ₂	Uranoxid
U ₃ Si ₂	Uransilizid
VAK	Versuchsatomkraftwerk Kahl
Vol. %	Volumenprozent
VKTA	Verein für Kernverfahrenstechnik und Analytik Rosendorf
W	Watt
%	Prozent
α	alpha
β	beta
γ	gamma

Literaturverzeichnis

- /BAM 2010/ B. Droste, Aktuelle Entwicklungen auf dem Gebiet der verkehrsrechtlichen Behälter-Bauartprüfung, 2. RAM-Behältersicherheitstage 2010, BAM, Berlin, 18./19.März 2010
- /Battelle 1991/ G. Scheibel, V. Friehmelt, E. Gidarakos; Theoretische Voruntersuchungen und Bewertung des Wissenstandes zum Bruchverhalten und zur Aktivitätsfreisetzung von HTR-BE im Hinblick auf Störfälle mit Gebindeabsturz im Endlager; Abschlussbericht; Battelle-Institut e.V.; Frankfurt am Main; September 1991
- /BMU 2010/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Stoffe, 30. September 2010
- /BMU 2011/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), Gemeinsames Übereinkommen über die Sicherheit der Behandlung abgebrannter Brennelemente und über die Sicherheit der Behandlung radioaktiver Stoffe, Bericht der BRD für die 4. Überprüfungskonferenz im Mai 2012
- /BfS 2004/ Bundesamt für Strahlenschutz, Übersicht über Stilllegungsprojekte in Deutschland Teil II: Forschungsreaktoren, Dezember 2004
- /BfS 2005/ Bundesamt für Strahlenschutz, Zulassungsschein D/4315/B(U)F-85 (Rev. 6) für ein Versandstückmuster des Typs B(U) für spaltbare radioaktive Stoffe (Transport- und Lagerbehälter CASTOR MTR 2), 18. Oktober 2005
- /BfS 2005a/ Bundesamt für Strahlenschutz, Zulassungsschein D/4214/B(U)F-85 (Rev. 9) für ein Versandstückmuster des Typs B(U) für spaltbare radioaktive Stoffe (Transport- und Lagerbehälter CASTOR THTR/AVR), 24. März 2005
- /BfS 2007/ Bundesamt für Strahlenschutz, Zulassungsschein D/4214/B(U)F-96 (Rev. 10) für ein Versandstückmuster des Typs B(U) für spaltbare radioaktive Stoffe (Transport- und Lagerbehälter CASTOR THTR/AVR), 27. März 2007
- /BfS 2008/ Bundesamt für Strahlenschutz, Mengen, Konditionierung, Zwischen- und Endlagerung radioaktiver Abfälle - Sachstandsbericht zum 30. April 2008
- /BfS 2009/ Bundesamt für Strahlenschutz, Zulassungsschein D/4367/B(U)F-96 (Rev. 0) für ein Versandstückmuster des Typs B(U) für spaltbare radioaktive Stoffe (Transport- und Lagerbehälter CASTOR[®] KNK), 08. Oktober 2009
- /BfS 2011a/ Bundesamt für Strahlenschutz, Auflistung kerntechnischer Anlagen in der Bundesrepublik Deutschland, Anlagen in Betrieb, Februar 2011

- /BfS 2011b/ Bundesamt für Strahlenschutz, Auflistung kerntechnischer Anlagen in der Bundesrepublik Deutschland, Anlagen in Stilllegung, Februar 2011
- /DBE 1995/ Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe, Direkte Endlagerung ausgedienter Brennelemente, Handhabungsversuche zur Streckenlagerung, Abschlussbericht, Hauptband, September 1995
- /DBE 1995a/ Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe mbH (DBE), Direkte Endlagerung ausgedienter Brennelemente DEAB (02 E 8191), Handhabungsversuche zur Streckenlagerung, Abschlussbericht, Hauptband, DEAB T 60, Peine, September 1995
- /DBETec 2007/ DBE TECHNOLOGY GmbH, Untersuchungen zur sicherheitstechnischen Auslegung eines generischen Endlagers im Tonstein in Deutschland - Genesis, März 2007
- /DBETec 2008/ DBE TECHNOLOGY GmbH, Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine sicherheitstechnische Bewertung von Endlagern für HAW - ISIBEL, AP 1.2 - Konzeptionelle Endlagerplanung und Zusammenstellung des endzulagernden Inventars, April 2008
- /DBETec 2010/ DBE TECHNOLOGY GmbH, Optimization of the Direct Disposal Concept by Emplacing SF Canister in Boreholes (DENKMAL) - Final Report, Juni 2010
- /DBETec 2010a/ DBE TECHNOLOGY GmbH, Referenzkonzept für ein Endlager für radioaktive Abfälle in Tongestein, ERATO, Juni 2010
- /FZJ 1993/ D. Niephaus; Forschungsvorhaben MAW- und HTR-BE-Versuchseinlagerung in Bohrlöchern (Projekt MHV), Rückholbarer Einlagerversuch (Teilprojekt REV), Abschlussbericht; Jül-2859; ISSN 0944-2952; Forschungszentrum Jülich GmbH, Institut für Chemische Technologie; Dezember 1993
- /FZJ 2000/ Forschungszentrum Jülich, Niephaus, D., Referenzkonzept zur direkten Endlagerung von abgebrannten HTR-Brennelementen in CASTOR THTR/AVR Transport- und Lagerbehälter, Januar 2000
- /FZJ 2003/ Forschungszentrum Jülich, Institut für Sicherheitsforschung und Reaktortechnik, Untersuchungen zur Radionuklidfreisetzung und zum Korrosionsverhalten von bestrahltem Kernbrennstoff aus Forschungsreaktoren unter Endlagerbedingungen, Abschlussbericht, Dezember 2003
- /FRM2 20111/ www.frm2.tum.de/technik/reaktor, Oktober 2011
- /GNB 1998a/ Gesellschaft für Nuklear-Behälter, Beschreibung der Brennstabkokille BSK 3, GNB B 043/98, September 1998, Revision 0

- /GNS 2011/ Schreiben des GNS „Abschlussbericht LABRADOR“ EBE1/Gf/100798 vom 12.12.2011
- /GRS 2004/ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Untersuchung zur Kritikalitätssicherheit in der Nachbetriebsphase eines Endlagers für ausgediente Kernbrennstoffe in unterschiedlichen Wirtsgesteinen, Dezember 2004
- /HKG 1992/ Zeichnung BE-Entnahmebehälter 2 086 806 7 c; Zeichnungs-Nr. 0090-276-000-ZE-0001; HKG, Kernkraftwerk THTR 300 MW; 10.12.1992
- /HKG 2012/ Hochtemperatur-Kernkraftwerk GmbH, FuE-Vorhaben Status quo der Lagerung ausgedienter Brennelemente aus stillgelegten / rückgebauten deutschen Forschungsreaktoren und Strategie (Lösungsansatz) zu deren künftigen Behandlung / Lagerung – LABRADOR, FKZ: 02S 8679, Abschlussbericht, Schreiben vom 02.02.2012
- /Interatom 1986/ E. Ricken, H. Többe; KNK II, 3. Kern: Auslegungsbericht für Treiberzonenelemente NU 401 bis NU 407 (ohne Moderator) und NW 401 bis 421 (mit Moderator); Technischer Bericht; INTERATOM; Bergisch Gladbach 1; Oktober 1986
- /ISTec 2008/ Institut für Sicherheitstechnik (ISTec) GmbH, Abschätzung der Standzeit von Endlagergebinden in einem zukünftigen HAW-Endlager im Salzgestein unter dem Einfluss der Korrosion, August 2008
- /JK 2006/ I. Graffunder et. al., Rückholung und Zwischenlagerung der Kernbrennstoffe aus der Kompakten Natriumgekühlten Kernreaktoranlage KNK II (Karlsruhe), Jahrestagung Kerntechnik 2008, Hamburg
- /KFA 1988/ 4. Beschreibung der AVR-Brennelemente und der AVR-Trockenlagerkanne, Stand: März 1988, zur Verfügung gestellt von GNS mit Schreiben vom 26.02.2010
- /KTA 1999/ Kerntechnischer Ausschuss (KTA), Sicherheitstechnische Regel des KTA, KTA 3902 Auslegung von Hebezeugen in Kernkraftwerken, Juni 1999
- /NUKEM 1992/ NUKEM, Direkte Endlagerung von Kernbrennstoff aus Forschungsreaktoren, FuE 92002, Förderkennzeichen 02 E 8171 4 (NUKEM) / 02 E 8181 2 (GNS), Juni 1992
- /RRFM 2004/ Harbonnier, G., Colomb, P., Durand, JP., Duban, B., Lawastre, Y., Success Story of FRM-II Fuel Element Manufacturing, Research Reactor Fuel Management, March 2004
- /TRIGA 2011/ <http://www.ga-esi.com/triga/products/fuel.php>, Oktober 2011
- /TUW 2004/ Technische Universität Wien, Atominstitut der Österreichischen Universitäten, Böck, H., Villa, M., TRIGA Reactor Characteristics, AIAU 27306, Juni 2004

- /VKTA 1994/ Verein für Kernverfahrenstechnik und Analytik Rossendorf e. V. (VKTA), Schneider, B., Hofmann, G., Konditionierung bestrahlter Brennelemente aus dem Rossendorfer Forschungsreaktor RFR in Transport- und Lagerbehälter CASTOR® MTR 2, September 1994
- /VSG 2011/ Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben (VSG), 3. Workshop, Präsentation AP 6 „Endlagerauslegung und -optimierung“ zum Thema Rückholbarkeit, 25./26. Oktober 2011
- /WTI 2006/ Wissenschaftlich Technische Ingenieurberatung, CASTOR KNK, Zusammenfassende Darstellung der Behälterinventare, WTI/98/05, Revision 1, Januar 2006