Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine sicherheitliche Bewertung von Endlagern für HAW

ISIBEL

AP7: Nachweiskonzepte für die Einhaltung der nicht radiologischen Schutzziele in der Nachbetriebsphase

DBE TECHNOLOGY GmbH

Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine sicherheitliche Bewertung von Endlagern für HAW

ISIBEL

AP7: Nachweiskonzepte für die Einhaltung der nicht radiologischen Schutzziele in der Nachbetriebsphase

M. Tholen; J. Hippler; M. Kreienmeyer; J. Krone

DBE TECHNOLOGY GmbH
Eschenstraße 55
D-31224 Peine

TEC-16-2008-AP **FKZ 02 E 10065**
Gesamtzahl der Seiten: 75

Ersteller:	Prüfer:	Freigabe:
08.04.2008 M. Tholen	23.01.08 J. Hippler	29.04.08 Krone
Datum/Unterschrift	Datum/Unterschrift	Datum/Unterschrift

April 2008

Vorwort

Im Rahmen des Vorhabens ISIBEL wurde ein Nachweiskonzept für die sicherheitliche Bewertung von Endlagern für hochradioaktive Abfälle in der Wirtsformation Salz entwickelt und untersucht, inwieweit das Instrumentarium für die Bewertung der Betriebs- und Nachbetriebsphase eines solchen Endlagers vorhanden, bzw. ausreichend ist. Zusätzlich wurde ein FEP-Katalog erarbeitet, in dem alle relevanten FEP zusammengestellt wurden. Die im Zeitraum vom 01.10.2005 bis 31.12.2007 durchgeführten Arbeiten sind in den folgenden Berichten zusammengefasst.

Zusammenfassender Abschlussbericht

Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine sicherheitliche Bewertung von Endlagern für HAW – ISIBEL. Gemeinsamer Bericht von DBE TECHNOLOGY GmbH, BGR und GRS. DBE TECHNOLOGY GmbH Peine, April 2008

.

Einzelberichte der Organisationen

1. Langzeitsicherheitsanalyse für ein HAW-Endlager im Salz – Geologisches Referenzmodell für einen HAW-Endlagerstandort im Salz – Technischer Bericht. Beitrag für das Projekt ISIBEL. BGR, Hannover, Tagebuchnummer 11614/05, Juli 2007

2. Konzeptionelle Endlagerplanung und Zusammenstellung des endzulagernden Inventars. DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine, April 2008

3. Bewertung der Betriebssicherheit. DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine, April 2008

4. FEP-Generierung und Szenarienentwicklung – Stand November 2006. BGR, Hannover, Tagebuchnummer 10402/08, Februar 2008

5. Nachweis der Integrität der geologischen Barriere. BGR, Hannover, Tagebuchnummer 10403/08, September 2007

6. Nachweiskonzept zur Integrität der einschlusswirksamen technischen Barrieren. DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine, April 2008

7. Untersuchungen zur Ermittlung und Bewertung von Freisetzungsszenarien. GRS Braunschweig, Bericht GRS-233, April 2008

8. Nachweiskonzepte für die Einhaltung der nicht radiologischen Schutzziele in der Nachbetriebsphase. DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine, April 2008

9. FEP-Katalog für einen HAW-Standort im Wirtsgestein Salz. Version 01. Gemeinsamer Bericht von DBE TECHNOLOGY GmbH, BGR und GRS. Peine, Hannover, Braunschweig, April 2008

J. Hippler — **Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern mbH**

M. Tholen
M. Kreienmeyer
J. Krone — **DBE TECHNOLOGY GmbH**

Die dieser Studie zugrunde liegenden Arbeiten wurden im Auftrag des BMWi vertreten durch den Projektträger Forschungszentrum Karlsruhe, Bereich Wassertechnologie und Entsorgung, (PTKA-WTE) unter dem Förderkennzeichen 02 E 10065 von DBE TECHNOLOGY GmbH durchgeführt. Die Verantwortung für den Inhalt liegt jedoch allein bei den Autoren.

Inhaltsverzeichnis

		Seite
Vorwort		2
Inhaltsverzeichnis		5
1	Einleitung	7
2	Nachweis des Schutzes der Tagesoberfläche	8
2.1	Nachweiskriterien	8
2.2	Nachweismethoden	10
2.3	Vorhandene Berechnung für den Referenzstandort	10
2.3.1	Allgemeine Berechnungsannahmen	11
2.3.2	Thermomechanische Modellierung	11
2.3.3	Berechnung zur Abschätzung der Senkung	13
2.4	Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes	14
3	Langzeitsicherheitsnachweis zum Schutz des Grundwassers vor chemo-toxischen Stoffen	16
3.1	Vorgaben der Grundwasserverordnung und Bewertungskriterien für Grundwasserverunreinigungen	16
3.2	Inventar chemischer und chemotoxischer Stoffe eines HAW-Endlagers im Wirtsgestein Salz	24
3.2.1	Chemische und chemotoxische Stoffe der wärmeentwickelnden radioak-tiven Abfälle	24
3.2.1.1	Werkstoffe und Materialien der wärmeentwickelnden radioaktiven Abfälle	25
3.2.1.2	Chemische Zusammensetzung der Werkstoffe und Materialien der wärmeentwickelnden radioaktiven Abfälle	34
3.2.1.3	Inventar chemotoxischer Stoffe der wärmeentwickelnden radioaktiven Abfälle	39
3.2.2	Chemische und chemotoxische Stoffe der Versatz- und Barrierematerialien aus Verfüll- und Verschlussmaßnahmen	42
3.2.2.1	Chemische und chemotoxische Stoffe der Versatzmaterialien	42
3.2.2.2	Chemische und chemotoxische Stoffe der Barrierematerialien	43
3.2.2.3	Inventar chemotoxischer Stoffe der Versatz- und Barrierematerialien	49
3.2.3	Chemische und chemotoxische Stoffe der Materialien für den Schachtausbau	52
3.2.3.1	Inventar chemotoxischer Stoffe der Materialien für den Schachtausbau	53
3.3	Schlussfolgerungen aus dem Grundwasserschutz vor chemotoxischen Stoffen bei der Endlagerung von schwach- und mittelradioaktiven Abfällen	53

3.4 Übertragbarkeit der Anforderungen des radiologischen Langzeitsicherheitsnachweises 55

3.5 Übertragbarkeit der Anforderungen des Langzeitsicherheitsnachweises für Untertagedeponien 57

3.6 Langzeitsicherheitsnachweis für chemotoxische Stoffe - Vorschlag für ein Nachweiskonzept 59

3.7 Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes 60

Tabellenverzeichnis 63

Abbildungsverzeichnis 65

Abkürzungsverzeichnis 66

Literaturverzeichnis 68

1 Einleitung

Zu den nichtradiologischen Schutzzielen für ein Endlager hochradioaktiver und wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle (im Folgenden nur als wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle bezeichnet) gehören der Schutz der Tagesoberfläche bei Hebungen und Senkungen und der Schutz des Grundwassers vor chemotoxischen Stoffen.

In Kapitel 1 wird der Nachweis des Schutzes der Tagesoberfläche unter Berücksichtigung der notwendigen bergbaulichen Auffahrungs- und späteren Versatzmaßnahmen, sowie insbesondere der thermomechanischen Konsequenzen aus der Einlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle beschrieben. Hierzu werden für das Schutzziel "Schutz der Tagesoberfläche" die im technischen Regelwerk vorhandenen Nachweiskriterien zusammengestellt, die zum Nachweis der Einhaltung des Schutzziels angewendet werden können sowie allgemein dargestellt, wie der Nachweis zur Einhaltung des Schutzziels mittels numerischer Berechnungen geführt werden kann. Für den Referenzstandort wird die Vorgehensweise und der vorhandene Kenntnisstand anhand vorhandener Berechnungen erläutert.

In Kapitel 1 wird ein Vorschlag für einen Langzeitsicherheitsnachweis für chemotoxische Stoffe eines HAW-Endlagers im Wirtsgestein Salz beschrieben. Dazu erfolgt eine Darstellung der Vorgaben der Grundwasserverordnung, die Ableitung von Grenz- und Prüfwerten für chemotoxische Stoffe als Bewertungskriterien von Grundwasserverunreinigungen und die Beschreibung des Inventars chemischer und chemotoxischer Stoffe eines solchen HAW-Endlagers. Ergänzend dazu werden Schlussfolgerungen aus dem Grundwasserschutz vor chemotoxischen Stoffen bei der Endlagerung schwach- und mittelradioaktiver Abfälle gezogen. Aufgrund der international üblichen Anforderungen an einen radiologischen Langzeitsicherheitsnachweis erfolgt eine Auseinandersetzung mit der Frage der Übertragbarkeit auf den Langzeitsicherheitsnachweis für chemotoxische Stoffe. Weiterhin wird die derzeitige rechtliche Situation bei der Lagerung/Ablagerung gefährlicher Abfälle in Untertagedeponien dargestellt und die Frage der Übertragbarkeit auf den Langzeitsicherheitsnachweis für chemotoxische Stoffe beantwortet. Auf dieser Grundlage wird ein Vorschlag für einen Langzeitsicherheitsnachweis für chemotoxische Stoffe beschrieben und es erfolgt eine zusammenfassende Bewertung, ob FuE-Bedarf für den Konzeptvorschlag zum Nachweis des Grundwasserschutzes besteht.

Im Zusammenhang mit der Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle ist auch der Eintrag von Wärme in das Gebirge verbunden. In der Wasserrahmenrichtlinie /WRRL 2000/ ist neben der Freisetzung von Stoffen in Luft, Wasser oder Boden auch die Freisetzung von Wärme als Verschmutzung definiert. Weder in der Grundwasserrichtlinie /GWRL 2006/, in der spezielle Maßnahmen zur Verhinderung und Begrenzung der Grundwasserverschmutzung festgelegt sind, noch im Wasserhaushaltsgesetz /WHG 2005/, das der Umsetzung der WRRL dient, und in der Grundwasserverordnung /GrWV 1997/, in der die wasser- und abfallrechtlichen Vorschriften des Bundes zum Schutz des Grundwassers auf die Einleitung und den sonstigen Eintrag bestimmter gefährlicher Stoffe geregelt sind, wird „Wärme“ mit einer „Verschmutzung des Grundwassers“ in Verbindung gebracht. Daher wird der mit der Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle verbundene Eintrag von Wärme in das Gebirge nicht in die Betrachtungen dieses Vorhabens zum Nachweis der Einhaltungen der nichtradiologischen Schutzziele einbezogen.

2 Nachweis des Schutzes der Tagesoberfläche

Auswirkungen eines HAW-Endlagers auf die Tagesoberfläche können zum einen aus den bergbaulichen Auffahrungen, zum anderen aus der Einlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle resultieren. Hierbei ist zu beachten, dass die Auffahrungen zu Senkungen, die Einlagerung jedoch zu Hebungen aus der thermischen Expansion (bedingt durch die Wärmeentwicklung) führt.

Im Folgenden werden für das Schutzziel "Schutz der Tagesoberfläche" die im technischen Regelwerk vorhandenen Nachweiskriterien zusammengestellt, die zum Nachweis der Einhaltung des Schutzziels angewendet werden können. Des Weiteren wird allgemein dargestellt, inwieweit die Nachweisführung zur Einhaltung des Schutzziels möglich ist. In einem weiteren Abschnitt wird die Vorgehensweise und der vorhandene Kenntnisstand für den Referenzstandort detailliert.

Zusätzlich sind noch Auswirkungen von Hebungen und Senkungen auf die Vorflut zu betrachten. Dies ist jeweils standortspezifisch durchzuführen und stellt für den Referenzstandort keine Schwierigkeit im Rahmen der Nachweisführung da. Die Auswirkungen auf die hydrogeologischen Verhältnisse dürften wegen des kleinen Hebungsbetrages, der zudem durch die flächenhafte Erosion zumindest teilweise reduziert wird, gering ausfallen.

2.1 Nachweiskriterien

Ein erstes Kriterium für das Schutzziel "Schutz der Tagesoberfläche" kann aus der Vorgehensweise im bergrechtlichen Genehmigungsverfahren abgeleitet werden. Hier ist in der Verordnung über die Umweltverträglichkeitsprüfung bergbaulicher Vorhaben (UVP-V Bergbau) /UVP 1990/ geregelt, dass betriebsplanpflichtige Tiefbauvorhaben, bei denen

- Senkungen der Oberfläche von 3 m oder mehr oder
- Senkungen der Oberfläche von 1 m bis weniger als 3 m, wenn erhebliche Beeinträchtigungen im Hinblick auf Vorflut, Grundwasser, Böden, geschützte Kulturgüter oder vergleichbare Schutzgüter zu erwarten sind

einer Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP) bedürfen. Bei einer zu erwartenden Senkung der Tagesoberfläche von weniger als 1 m muss keine UVP durchgeführt werden, da aus Erfahrungen bekannt ist, dass bei Einhaltung dieses Kriteriums keine besondere Gefährdung der Umwelt vorliegt.

Genauere Angaben über zulässige Verformungen der Tagesoberfläche können aus Bauvorschriften abgeleitet werden. Hier dient der Schutz der Tagesoberfläche dem Erhalt der Gebrauchstauglichkeit von Bauwerken.

Hinsichtlich des Schutzes der Tagesoberfläche über einem HAW-Endlager sind nicht nur heute bereits vorhandene Bauwerke zu betrachten. Auch für zukünftige Generationen soll

die Nutzung der Tagesoberfläche nicht eingeschränkt werden. Deshalb ist die Einhaltung von Grenzwerten über den gesamten Zeitraum, in dem sich relevante Auswirkungen auf die Tagesoberfläche ergeben, nachzuweisen.

Die zulässigen Verformungen lassen sich aus der Grenzbedingung zur Schiefstellung von Gebäuden ableiten. So gilt bei Ausbildung einer Setzungsmulde nach Skempton der in der Abbildung 2-1 dargestellte Zusammenhang. Bestehen keine besonderen Anforderungen an die Gebäude, wird für Senkungen der Grenzwert 1/300 /SCHNEIDER 1994/ verwendet. In Abhängigkeit der Bebauung oberhalb des Endlagers können ggf. andere Grenzwerte zum Ansatz kommen.

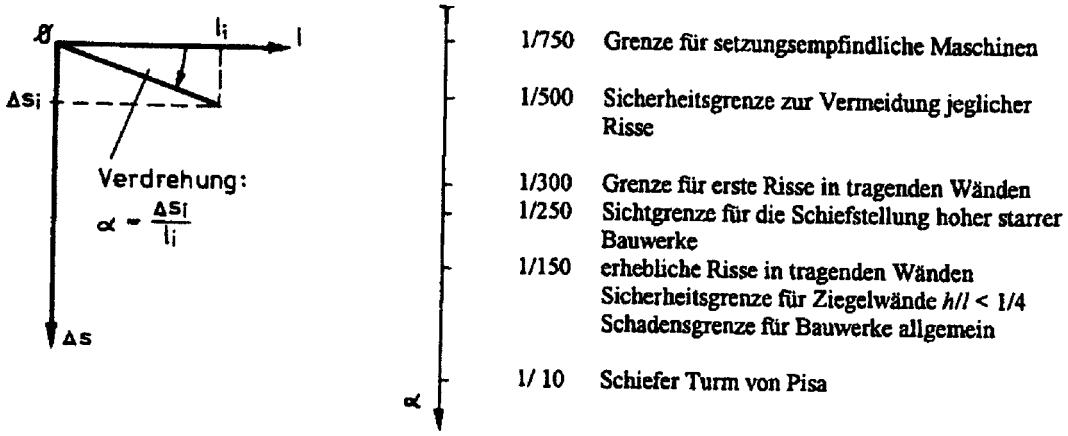

Abbildung 2-1: Grenzwerte für Verformungen bei Ausbildung einer Setzungsmulde /SCHNEIDER 1994/

In /DIN 1995/ wird die zu betrachtende Lebensdauer von Bauwerken mit 100 Jahren angegeben. Dieser Bezugszeitraum ist auch für die in /DIN 2002/ angegebene kürzere Bezugsdauer von 50 Jahren abdeckend. Zum Nachweis der Gebrauchstauglichkeit von Bauwerken ist also die Schiefstellungsrate an der Tagesoberfläche pro 100 Jahre für den zu betrachtenden Nachweiszeitraum auszuwerten.

Hebungen und Senkungen führen zu unterschiedlichen Rissbildern in Gebäuden. Eine Muldenlagerung durch Senkung führt zu Zerrungen im Gründungsbereich, während bei einer Sattellagerung (durch Hebung) Pressungen im Gründungsbereich und Horizontalspannungen im oberen Gebäudeteil auftreten /BJERRUM 1973/. Aufgrund der unterschiedlichen Rissbilder sind auch unterschiedliche Grenzwerte für Senkungen bzw. Hebungen einzuhalten. Die in der Abbildung 2-1 angegebenen Grenzwerte gelten für Senkungen, für Hebungen sind die zulässigen Werte zu halbieren /SCHNEIDER 1994/. Damit ergibt sich also im Regelfall (d.h. für Bauwerke ohne besondere Anforderungen bezüglich der Setzung) als Grenzwert für die zulässige Schiefstellungsrate eine Rate von 1/300 pro 100 Jahre bei Senkungen bzw. von 1/600 pro 100 Jahre bei Hebungen.

Hinsichtlich des maximalen Nachweiszeitraums ist eine Begrenzung auf den Zeitraum, in dem relevante Auswirkungen aus der thermischen Expansion bzw. später der thermischen Kontraktion zu erwarten sind, sinnvoll.

2.2 Nachweismethoden

Der Nachweis kann rechnerisch geführt werden. Zum Nachweis der Einhaltung der o.g. Kriterien sind die Verformungen an der Tagesoberfläche zu berechnen. Hierzu stehen numerische Berechnungsprogramme, wie z. B. FLAC3D (Finite Differenzen Methode) /ITASCA 1997/, JIFE (Finite Elemente Methode) /HEEMANN et al 2003/ oder ANSYS (Finite Elemente Methode) /ANSYS 1999/ zur Verfügung. Die Anwendung dieser Programme im Rahmen geomechanischer Aufgabenstellungen ist Stand der Technik.

Da die Effekte aus der Wärmeentwicklung der Abfälle und ggf. auch aus der (wahrscheinlich vernachlässigbaren) Wärmeentwicklung eines Versatzmaterials berücksichtigt werden müssen, ist eine thermomechanische Berechnung durchzuführen. Das thermomechanische Materialverhalten des Gebirges muss hinreichend genau beschrieben werden können, die Parameter zur Beschreibung des Materialverhaltens müssen bekannt sein bzw. bestimmt werden können.

Zudem muss die zu erwartende Wärmeentwicklung der Abfälle bekannt sein. Mit Kenntnis der geologischen Standortdaten sowie der geplanten Auffahrungen kann dann ein Berechnungsmodell erstellt werden, mit dem die Verformungen an der Tagesoberfläche und somit die Schiefstellungsraten ermittelt werden können.

Auszuwerten sind dann für den Nachweiszeitraum die Schiefstellungsraten pro 100 Jahre. Der zu betrachtende Nachweiszeitraum ergibt sich aus den Berechnungsergebnissen, da aus diesen abgeleitet werden kann, über welchen Zeitraum Hebungen und Senkungen an der Tagesoberfläche auftreten.

2.3 Vorhandene Berechnung für den Referenzstandort

Für den Referenzstandort wurde ein geologisches Modell erstellt, das in /BGR 2005/ beschrieben ist. Ein geomechanisches Modell, dass eine Beschreibung von Materialmodellen und Materialparametern sowie deren Bandbreiten enthält, liegt bisher nicht vor. Es wurden jedoch bereits diverse thermomechanische Berechnungen für den Referenzstandort durchgeführt, wobei durch Laborversuche belegte Modelle und Parameter angesetzt wurden. Im Folgenden sind beispielhaft die in /BGR 1988/ verwendeten Modellannahmen zusammenfassend aufgeführt. Die angesetzten Werte sind durch Laborversuche belegt, die in /BGR 1988/ zitiert sind. Eine detaillierte Beschreibung ist in /BGR 1988/ zu finden. Für Berechnungen mit anderen Nachweiszielen sind ggf. andere Annahmen zu verwenden.

2.3.1 Allgemeine Berechnungsannahmen

Die Berechnung erfolgte unter folgenden allgemeinen Annahmen:

- Bohrlochlagerung, 230 HAW-Kokillen je Bohrung, 30 Jahre Zwischenlagerzeit
- Ansatz der Wärmefreisetzung über den gesamten HAW-Einlagerungsbereich (keine Modellierung der Bohrlöcher und des Einlagerungsablaufs)
- Zweidimensionales Modell

2.3.2 Thermomechanische Modellierung

Für die thermomechanische Modellierung wird isotropes und bereichsweise homogenes Materialverhalten vorausgesetzt. Für das Steinsalz werden 3 Homogenbereiche angenommen. Zudem enthält das Modell noch Anhydrit und Carnallitit sowie im Deck- bzw. Nebengebirge Quartär, Tertiär, Oberkreide, Unterkreide, Buntsandstein und Ober-rotliegendes.

Es wird ein Anfangstemperaturfeld entsprechend einer Anpassung an gemessene Temperaturprofile angenommen, die Temperatur an der Tagesoberfläche wird mit 283 K entsprechend der mittleren Jahrestemperatur angenommen.

Für die Wärmefreisetzung der Abfälle wird im modellierten Einlagerungsbereich eine über die Zeit veränderliche Wärmeleistung angesetzt. Die Wärmeleistung ergibt sich aus der Umrechnung der Wärmeleistung der HAW-Kokillen auf das Volumen des modellierten Einlagerungsbereichs. Zum Berechnungsbeginn beträgt diese „verschmierte“ Wärmeleistung 0,21856 W/m^3 und verringert sich bis zum Berechnungsende (t = 10.000 Jahre) auf 0,00036 W/m^3 im Bereich des modellierten Einlagerungsbereichs.

Für das Deck- und Nebengebirge wird eine temperaturunabhängige Wärmeleitfähigkeit λ und spezifische Wärmekapazität ρ angesetzt. Die spezifische Wärmekapazität ρ beträgt 22,0 W·d/(m^3·K), die Wärmeleitfähigkeit variiert von 0,6 W/(m·K) für Carnallitit bis zu 2,7 W/(m·K) für Oberrotliegendes. Für Steinsalz und Anhydrit wird die Wärmeleitfähigkeit temperaturabhängig angesetzt. Im Steinsalz wird zusätzlich nach Homogenbereichen differenziert. Die geringste Wärmeleitfähigkeit wird für das Aller-Steinsalz (λ = 4,14 W/(m·K) bei 280 K), die höchste für den Anhydrit (λ = 5,91 W/(m·K) bei 280 K) angenommen. Die spezifische Wärmekapazität ρ beträgt für Steinsalz und Anhydrit 22,0 W·d/(m^3·K). *(Anmerkung: Die spezifische Wärmekapazität wird in (BGR 1988) nicht in SI-Einheiten angegeben. Da keine Angabe über die Dichte der Materialien gemacht wird, ist eine Umrechnung in J/(kg.K) nicht möglich. Unter Annahme der für Steinsalz i.a. angesetzten Dichte von 2200 kg/m^3 ergibt sich eine spezifische Wärmekapazität von 22,0 W·d/(m^3·K) = 864 J/(kg.K).)*

Zur thermomechanischen Kopplung wird für die einzelnen Materialien der jeweilige lineare Wärmeausdehnungskoeffizient benötigt. Dieser beträgt für das Deck- und Nebengebirge 1,0·10^{-5} 1/K, für Steinsalz 4,0·10^{-5} 1/K, für den Anhydrit 1,6·10^{-5} 1/K und für Carnallitit 2,5·10^{-5} 1/K.

Die Beschreibung des elastischen Materialverhaltens erfolgt mit den elastischen Kennwerten gemäß Tabelle 2-1.

Tabelle 2-1: Kennwerte für elastisches Materialverhalten

Schicht	Elastizitätsmodul [MPa]	Querkontraktionszahl [-]
Schichten des Quartär	100	0,33
Schichten des Tertiär	500	0,33
Schichten der Oberkreide	9.000	0,25
Schichten der Unterkreide	12.000	0,25
Schichten des Buntsandstein	15.000	0,25
Schichten des Oberrotliegenden	17.000	0,25
Zechstein: Steinsalz	25.000	0,25
Zechstein: Anhydrit	60.000	0,23
Zechstein: Carnallitit	16.000	0,25

Steinsalz und Carnallitit weisen elastisch-viskoplastisches Materialverhalten auf. Hinsichtlich des viskoplastischen Verhaltens werden für Steinsalz und Carnallitit in Variantenbetrachtungen unterschiedliche Stoffgesetze und Materialparameter angesetzt. Kriechvermögen von Carnallitit und höheres Kriechvermögen für Steinsalz wird mit

$$\dot{\varepsilon}_{eff}^{cr} = A \cdot e^{\frac{-Q}{R \cdot T}} \cdot \left(\frac{\sigma_{eff}}{\sigma_*} \right)^n$$

modelliert, geringeres Kriechvermögen für Steinsalz wird mit

$$\dot{\varepsilon}_{eff}^{cr} = A_1 \cdot e^{\frac{-Q_1}{R \cdot T}} \cdot \left(\frac{\sigma_{eff}}{\sigma_*} \right)^n + A_2 \cdot e^{\frac{-Q_2}{R \cdot T}} \cdot \left(\frac{\sigma_{eff}}{\sigma_*} \right)^m$$

angesetzt. Für beide Stoffgesetze gelten

$$\sigma_{eff} = \sqrt{3 I_2^D}, I_2^D = \frac{1}{6}\left[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 \right]$$

mit σ_1, σ_2, σ_3 Hauptspannungen, I^D_2 zweite Invariante des Spannungsdeviators

und die Parameter

Gaskonstante	R	= 8,314*10^{-3} [kJ/mol K]
Normierungsspannung	σ_*	= 1 [MPa]

Die weiteren Parameter sind in der Tabelle 2-2 dargestellt.

Tabelle 2-2: Kennwerte für viskoplastisches Materialverhalten

Materialparameter		Steinsalz, höheres Kriech-vermögen	Steinsalz, geringeres Kriech-vermögen	Carnallitit, höheres Kriech-vermögen	Carnallitit, geringeres Kriech-vermögen
A	[1/d]	0,18	-	1,8	0,18
A_1	[1/d]	-	0,05	-	-
A_2	[1/d]	-	$2{,}1 \cdot 10^{-6}$	-	-
Q	[kJ/mol]	54,0	-	54,0	54,0
Q_1	[kJ/mol]	-	58,6	-	-
Q_2	[kJ/mol]	-	113,0	-	-
n	[-]	5	5	5	5
m	[-]	-	5	-	-

Für die Hebung an der Tagesoberfläche ergeben sich hier Maximalwerte von ca. 3,5 m im Zeitbereich zwischen ca. 1000 – 3000 Jahre nach Einlagerung. Die größten Hebungsraten treten zu Beginn des betrachteten Zeitraums auf und betragen maximal ca. 1 m in 50 Jahren. Danach nimmt die Hebungsrate deutlich ab. Die Hebungen treten nicht lokal auf sondern erstrecken sich (in weiterer Entfernung abnehmend) deutlich über den Einlagerungsbereich (600 m Breite) hinaus. Aus den in /BGR 1988/ dargestellten Ergebnissen kann nur grob abgeschätzt werden, dass die zulässigen Schiefstellungsrate bei Hebungen von 1/600 pro 100 Jahre eingehalten wird. Hier ist bei zu-künftigen Berechnungen eine detailliertere Auswertung erforderlich. Hinsichtlich des Nachweiszeitraums zeigt die Berechnung, dass eine Betrachtung über einen Zeitraum von 10.000 Jahren ausreichend ist, da dann nur noch geringfügige Auswirkungen vorhanden sind.

Die Ergebnisse der Variantenbetrachtung zeigen, dass die Wahl unterschiedlicher Krieche-igenschaften hier nur untergeordneten Einfluss hat.

Zu beachten ist, dass die Hebung der Tagesoberfläche am Referenzstandort insbesondere von der Wärmeleistung der einzulagernden Abfälle, damit wiederum vom Inventar und den Zwischenlagerzeiten sowie des für den Einlagerungsbereich angesetzten Flächenbedarf abhängt. Zur Abschätzung der maximalen Hebung kann konservativ die maximal zu erwartende Wärmeleistung in Verbindung mit dem geringsten Flächenbedarf angesetzt werden.

2.3.3 Berechnung zur Abschätzung der Senkung

Die zuvor genannte Berechnung aus /BGR 1988/ berücksichtigt für den Einlagerungsbereich keine Auffahrung. Daher kann aus dieser Berechnung keine Abschätzung für die aus den Auffahrungen resultierenden Senkungen abgeleitet werden.

Im Rahmen der Untersuchungen zur Aktualisierung des Endlagerkonzepts Gorleben /DBE 1998/ wurde jedoch eine Berechnung zur Bewertung von Standsicherheit und Integrität

durchgeführt. In dieser Berechnung erfolgte auch eine Auswertung der Senkung am Salzspiegel, die hier zur Abschätzung der Senkung an der Tagesoberfläche genutzt werden kann. In der Berechnung wurde die Streckenlagerung unter Verwendung des POLLUX-8 als Endlagerbehälter betrachtet und eine Zwischenlagerzeit von 15 Jahren zugrunde gelegt. Im Anschluss an den Startzeitpunkt zur Erzeugung des Primärspannungszustandes wird die Auffahrung von zwei Richtstrecken simuliert. Nach einer Standzeit der Richtstrecken von zwei Jahren wird die erste Einlagerungsstrecke ausgebrochen. Danach wird jeweils nach 0,1 Jahren die nächste Einlagerungsstrecke ausgebrochen. Gleichzeitig wird in der aktuell offenen Einlagerungsstrecke die Einlagerung und Verfüllung der Strecke simuliert. Insgesamt werden 16 Einlagerungsstrecken aufgefahren und (nach Simulation der Einlagerung) verfüllt. Zusammen mit der letzten Einlagerungsstrecke werden die beiden Richtstrecken verfüllt. Der Einlagerungszeitraum, um alle Strecken zu befüllen, beträgt damit insgesamt 1,5 Jahre. Die Berechnung erstreckte sich vom Startzeitpunkt aus auf einen Zeitraum von 1000 Jahren.

Die hier angesetzten Materialmodelle und Parameter weichen zum Teil von den in der oben dargestellten Berechnung ab. Im Rahmen der zu betrachtenden Fragestellung sind die Abweichungen jedoch als geringfügig einzustufen und werden deshalb nicht weiter detailliert. Die Berechnungsergebnisse zeigten, dass bereits auf Höhe des bei - 250 m NN angenommenen Salzspiegels bis zum Jahr 1.000 nach Berechnungsbeginn nur eine maximale Senkung von 0,1 m auftrat. Für die Tagesoberfläche sind noch geringere Senkungen zu erwarten.

2.4 Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes

Die bereits durchgeführten Berechnungen im Rahmen der Studien zum Endlagerkonzept Gorleben zeigen, dass für den Referenzstandort ein bezüglich der thermomechanischen Modellparameter ausreichender Kenntnisstand zur Modellierung und Berechnung der hier zu behandelnden thermomechanischen Aufgabenstellung besteht. Die Auswertung von Schiefstellungsraten an der Tagesoberfläche wurde bisher nicht vor-genommen, stellt aber keine Schwierigkeit dar. Eine grobe Abschätzung aus vorhandenen Berechnungsergebnissen lässt darauf schließen, dass die zulässige Schiefstellungsrate von 1/600 pro 100 Jahre (Grenzwert bei Hebungen) für den zu betrachtenden Nachweiszeitraum eingehalten wird.

Hinsichtlich des Kriteriums einer zulässigen Senkung von 1 m zeigen die bereits vorhandenen Berechnungen /DBE 1998/, dass die aus den Auffahrungen folgenden Senkungen am Salzspiegel und damit auch an der Tagesoberfläche gering sind und dieses Kriterium eingehalten wird. Aufgrund der sehr geringen Senkung lässt sich abschätzen, dass auch die zulässige Senkungsrate von 1/300 pro 100 Jahre eingehalten wird.

Die zum Nachweis erforderlichen Nachweiskriterien liegen vor. Es sind Programmsysteme vorhanden, mit denen der Nachweis rechnerisch geführt werden kann. Hinsichtlich der Berechnungsannahmen ist jedoch anzumerken, dass, insbesondere in Hinblick auf andere rechnerisch zu führende Nachweise (Standsicherheit und Integrität der Barrieren), ein gebirgsmechanisches Modell vorliegen muss, in dem Materialmodelle sowie Parameter und ihre zu erwartenden Bandbreiten beschrieben sind. Bezüglich der anzusetzenden Wärme-

leistung des Inventars wird auf die Ausführungen in /ISIBEL 2008a/ verwiesen. Für den Nachweis des Schutzes der Tagesoberfläche ist allerdings eine exakte Kenntnis der Wärmeleistung nicht erforderlich, sondern es kann konservativ eine maximale Wärmeleistung in den Berechnungen angesetzt werden.

3 Langzeitsicherheitsnachweis zum Schutz des Grundwassers vor chemotoxischen Stoffen

Nach § 34 Abs. 2 Wasserhaushaltsgesetz /WHG 2005/ dürfen Stoffe nur so gelagert oder abgelagert werden, dass eine schädliche Verunreinigung des Grundwassers oder eine sonstige nachteilige Veränderung seiner Eigenschaften nicht zu besorgen ist. Im WHG werden auch „Maßnahmen, die geeignet sind, dauernd oder in einem nicht nur unerheblichen Ausmaß schädliche Veränderungen der physikalischen, chemischen oder biologischen Beschaffenheit des Wassers herbeizuführen“ (§ 3 Abs. 2 Nr. 2 WHG) als Benutzung definiert. In diesem Zusammenhang ist der Nachweis zu führen, dass eine schädliche Verunreinigung des Grundwassers oder eine sonstige nachteilige Veränderung seiner Eigenschaften nicht zu besorgen ist. Für bestimmte gefährliche Stoffe verdeutlicht und interpretiert die Grundwasserverordnung /GrWV 1997/ die wasserrechtlichen Anforderungen zum Schutz des Grundwassers gegen Verschmutzung durch diese Stoffe. In Bezug auf den Langzeitsicherheitsnachweis für HAW-Endlager im Salzgestein stellt sich die Frage nach der Anwendbarkeit dieser Vorschriften und sich ggf. daraus abzuleitende Anforderungen an den Nachweis.

In Kapitel 3.1 werden die Vorgaben der Grundwasserverordnung dargestellt und die Ableitung der Grenz- und Prüfwerte für chemotoxische Stoffe als Bewertungskriterien von Grundwasserverunreinigungen beschrieben. In Kapitel 3.2 wird das Inventar chemischer und chemotoxischer Stoffe eines solchen HAW-Endlagers beschrieben. In Kapitel 3.3 werden Schlussfolgerungen aus dem Grundwasserschutz vor chemotoxischen Stoffen bei der Endlagerung schwach- und mittelradioaktiver Abfälle gezogen. In Kapitel 3.4 erfolgt aufgrund der international üblichen Anforderungen an einen radiologischen Langzeitsicherheitsnachweis eine Auseinandersetzung mit der Frage der Übertragbarkeit auf den Langzeitsicherheitsnachweis für chemotoxische Stoffe. In Kapitel 3.5 wird die derzeitige rechtliche Situation bei der Lagerung/Ablagerung gefährlicher Abfälle in Untertagedeponien dargestellt und die Frage der Übertragbarkeit auf den Langzeitsicherheitsnachweis für chemotoxische Stoffe beantwortet. Auf dieser Grundlage wird in Kapitel 3.6 ein Vorschlag für einen Langzeitsicherheitsnachweis für chemo-toxische Stoffe beschrieben. Abschließend erfolgt eine zusammenfassende Bewertung, ob FuE-Bedarf für den in Kapitel 3.6 beschriebenen Konzeptvorschlag zum Nachweis des Grundwasserschutzes besteht (s. Kapitel 3.7).

3.1 Vorgaben der Grundwasserverordnung und Bewertungskriterien für Grundwasserverunreinigungen

Nach § 3 Abs. 2 Grundwasserverordnung bedarf das Ablagern von Stoffen der Liste I, das zu einem Eintrag dieser Stoffe in das Grundwasser führen kann, als Gewässerbenutzung im Sinne des § 3 Abs. 2 Nr. 2 WHG der behördlichen Erlaubnis, soweit es nicht einer Planfeststellung oder Genehmigung nach abfallrechtlichen Vorschriften bedarf. Eine Zulassung darf nur erteilt werden, wenn nicht zu besorgen ist, dass Stoffe der Liste I in das Grundwasser gelangen. Nach § 3 Abs. 3 GrWV gilt der Abs. 2 nicht, wenn Stoffe der Liste I nur in so geringen Mengen und Konzentrationen in das Grundwasser gelangen können, dass jede

gegenwärtige oder zukünftige Gefahr einer Beeinträchtigung der Grundwasserqualität ausgeschlossen ist.

Nach § 4 Abs. 1 GrWV bedarf das Ablagern von Stoffen der Liste II, das zu deren Eintrag in das Grundwasser führen kann, als Gewässerbenutzung nach § 3 Abs. 2 Nr. 2 WHG der behördlichen Erlaubnis, soweit es nicht einer Planfeststellung oder Genehmigung nach abfallrechtlichen Vorschriften bedarf. Eine Zulassung darf nur erteilt wer-den, wenn eine schädliche Verunreinigung des Grundwassers oder eine sonstige nachteilige Veränderung seiner Eigenschaften durch Stoffe der Liste II nicht zu besorgen ist.

Hinsichtlich des Nachweises des Grundwasserschutzes sind daher die in der Anlage der GrWV benannten Stoffe der Listen I und II zu betrachten. Hierzu können die von der Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) abgeleiteten Geringfügigkeitsschwellenwerte (GFS) /LAWA 2004/ als Bewertungskriterien von Grundwasserverunreinigungen herangezogen werden.

Im Folgenden sind die Stoffe der Liste I und II der GrWV aufgeführt. Die Liste I umfasst die einzelnen Stoffe der aufgeführten Stofffamilien und -gruppen mit Ausnahme der Stoffe, die aufgrund des geringen Toxizitäts-, Langlebigkeits- oder Bioakkumulationsrisikos als ungeeignet für die Liste I angesehen werden. Stoffe, die im Hinblick auf Toxizität, Langlebigkeit oder Bioakkumulation für die Liste II geeignet sind, sind als Stoffe der Liste II zu behandeln. Die Liste II umfasst die einzelnen Stoffe und Stoffkategorien aus den aufgeführten Stofffamilien und Stoffgruppen, die eine schädliche Wirkung auf das Grundwasser haben können.

Liste I der Stofffamilien und Stoffgruppen

1. Organische Halogenverbindungen und Stoffe, die im Wasser derartige Verbindungen bilden können
2. Organische Phosphorverbindungen
3. Organische Zinnverbindungen
4. Stoffe, die im oder durch Wasser krebserregende, mutagene oder teratogene Wirkung haben; dazu gehören auch Stoffe aus Liste II, soweit sie diese Wirkung haben
5. Quecksilber und Quecksilberverbindungen
6. Cadmium und Cadmiumverbindungen
7. Mineralöle und Kohlenwasserstoffe
8. Cyanid

Liste II der Stofffamilien und Stoffgruppen

1. Folgende Metalloide, Metalle und ihre Verbindungen:

1.1 Zink	1.8 Antimon	1.15 Uran
1.2 Kupfer	1.9 Molybdän	1.16 Vanadium
1.3 Nickel	1.10 Titan	1.17 Kobalt
1.4 Chrom	1.11 Zinn	1.18 Thallium
1.5 Blei	1.12 Barium	1.19 Tellur
1.6 Selen	1.13 Beryllium	1.20 Silber
1.7 Arsen	1.14 Bor	

2. Biozide und davon abgeleitete Verbindungen, die nicht in der Liste I enthalten sind
3. Stoffe, die eine für den Geschmack oder den Geruch des Grundwassers abträgliche Wirkung haben, sowie Verbindungen, die im Grundwasser zur Bildung solcher Stoffe führen und es für den menschlichen Gebrauch ungeeignet machen können
4. Giftige oder langlebige organische Siliziumverbindungen und Stoffe, die im Wasser zur Bildung solcher Verbindungen führen können, mit Ausnahme derjenigen, die biologisch unschädlich sind oder sich im Wasser rasch in biologisch unschädliche Stoffe umwandeln
5. Anorganische Phosphorverbindungen und reiner Phosphor
6. Fluoride
7. Ammoniak und Nitrite

Von der LAWA wurden für die Bewertung von Änderungen der chemischen Beschaffenheit des Grundwassers Geringfügigkeitsschwellen (GFS) abgeleitet /LAWA 2004/. Diese Schwellenwerte dienen als Maßstab, bis zu welchen Stoffkonzentrationen Änderungen der chemischen Beschaffenheit des Grundwassers als geringfügig einzustufen sind und ab welcher Konzentration eine Grundwasserverunreinigung (= Grundwasserschaden) vorliegt. Die GFS bilden die Grenze zwischen einer geringfügigen Veränderung der chemischen Beschaffenheit des Grundwassers und einer schädlichen Verunreinigung.

Die Konzentrationswerte für die GFS wurden wirkungsorientiert, d. h. human- und ökotoxikologisch begründet, abgeleitet. Die GFS wird definiert als Konzentration, bei der trotz einer Erhöhung der Stoffgehalte gegenüber regionalen Hintergrundwerten keine relevanten ökotoxischen Wirkungen auftreten können und die Anforderungen der Trinkwasserverordnung (TrWV) oder entsprechend abgeleiteter Werte eingehalten werden. Damit soll das Grundwasser für den menschlichen Gebrauch als Trinkwasser nutzbar bleiben.

Zur Ableitung der GFS-Werte wurden dementsprechend human- und ökotoxikologische Daten zusammengetragen und beurteilt. Vorrangig wurden gesetzlich geregelte Werte gegenüber Werten auf der Basis einer gutachterlichen Bewertung bevorzugt. In der Regel wurden keine Veröffentlichungen einzelner Testergebnisse, sondern bewertete, in der Fachöffentlichkeit diskutierte und akzeptierte Datenzusammenstellungen herangezogen. Wurden bei der Ableitung im Hinblick auf die Trinkbarkeit und im Hinblick auf ökotoxikologische Kriterien unterschiedliche Werte abgeleitet, entspricht der GFS-Werte dem niedrigeren Wert. Lagen entweder nur human- oder nur ökotoxikologische Daten vor, erfolgte die Ableitung

allein auf diesen Erkenntnissen. Da die so begründeten Werte in Einzelfällen in sehr niedrigen Konzentrationsbereichen liegen können, wurden sie in einem nachfolgenden Schritt auf einen unteren Wert von 0,01 µg/l begrenzt, sofern es sich nicht um rechtsverbindliche Werte handelt, bei denen eine Wirkung nachgewiesen ist.

Die Ableitung der GFS-Werte erfolgt auf der Basis von human- und ökotoxikologischen Daten für Einzelstoffe. In der Praxis werden chemisch ähnliche Verbindungen häufig zu Stoffgruppen zusammengefasst (z. B. Polycyclische Aromatische Kohlenwasserstoffe PAK, Polychlorierte Biphenyle PCB, alkylierte Monoaromate BTEX einschließlich Benzol und leichtflüchtige halogenierte Kohlenwasserstoffe LHKW), da sie in der Umwelt im Allgemeinen auch gemeinsam auftreten. Da die Zusammensetzung der zu bewertenden Mischungen variiert, wurde auch die Summe von Einzelstoffen nach oben begrenzt und es sind dementsprechend sowohl GFS-Werte für Einzelstoffe – soweit vorhanden – als auch Stoffsummen zu berücksichtigen.

Der Nachweis der Einhaltung der GFS-Werte erfolgt grundsätzlich durch Vergleich der ermittelten oder prognostizierten Stoffkonzentrationen mit den Geringfügigkeitsschwellenwerten, muss jedoch für jeden Anwendungsfall spezifisch erfolgen. Überschreiten die regionalen geogenen Hintergrundwerte im Grundwasser die GFS-Werte, können von den zuständigen Behörden unter Berücksichtigung der in /LAWA 2004/ aufgestellten Ableitungskriterien für den Einzelfall Werte festgelegt werden.

Für die Ableitung der GFS-Werte erfolgte die Beurteilung in Anlehnung an die TrWV /TrWV 2001/ wie folgt:

1. Soweit die in der TrWV genannten Grenzwerte entweder der Begründungsoption "Unbedenklich für die menschliche Gesundheit" oder der Option "Ästhetisch ein-wandfreie Qualität des Trinkwassers" entsprechen, also weder aufbereitungs- noch verteilungstechnisch begründet sind, wurden sie bei der Festlegung der GFS-Werte vorrangig und unverändert berücksichtigt.
2. Sind die Grenzwerte der TrWV aufbereitungs- oder verteilungstechnisch begründet oder fehlen Grenzwerte für relevante Parameter, wurde eine gesundheitliche und ästhetische Bewertung im Einzelfall analog nach TrWV vorgenommen. Dazu wurden folgende Daten herangezogen:
   - toxikologischen Basisdaten /EIKMANN 1999/
   - toxikologische Stoffdaten des Umweltbundesamtes (UBA) /UBA 1999/.
   - weitere geeignete Quellen wie z. B.
     - die Stoffberichte der World Health Organization (WHO) /WHO/
     - das Integrated Risk Information System (IRIS) /IRIS/ der US Environmental Protection Agency (EPA).

Für die Ableitung der Geringfügigkeitsschwellenwerte wurden ökotoxikologische Daten in der folgenden Reihenfolge berücksichtigt:

1. Rechtlich verbindliche, ökotoxikologisch begründete Umweltqualitätsnormen für aquatische Lebensgemeinschaften der Oberflächengewässer wurden bei der Festlegung der GFS-Werte vorrangig und unverändert berücksichtigt. Sie stammen insbesondere aus Anhang 5 (Umweltqualitätsnormen für die Einstufung des chemischen Zustands) des Entwurfs der LAWA-Musterverordnung zur Umsetzung der Anhänge II und V der Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) /LAWA 2003/. Eine Übernahme erfolgte nicht, wenn die Hintergrundwerte oder Schwebstoffgehalte der Oberflächengewässer maßgebend für die Ableitung der Umweltqualitätsnorm waren.
2. Die PNEC (Predicted No Effect Concentration)-Werte standen nach den gesetzlich verankerten Umweltqualitätsnormen des European Chemicals Bureau (ECB) an zweiter Stelle:
   - Technical Guidance Document /TGD 2003/
   - Risk Assessment Report /RAR 2002/
3. Lag für einen Stoff weder eine Umweltqualitätsnorm noch ein PNEC-Wert vor, wurde auf die LAWA-Zielvorgaben zum Schutz oberirdischer Binnengewässer zurückgegriffen /LAWA 1997/, /LAWA 1998a/, /LAWA 1998b/.
4. Lag auch diese nicht vor, wurden MPC (Maximum Permissible Concentration)- bzw. MPA (Maximum Permissible Addition)-Werte des niederländischen National Institute of Public Health and Environment (RIVM) Grundlage der GFS-Werte /RIVM 1997/, / RIVM 1999/.

In Tabelle 3-1 bis Tabelle 3-3 sind die von der LAWA abgeleiteten GFS-Werte zur Beurteilung lokal begrenzter Grundwasserverunreinigungen aufgeführt. Tabelle 3-1 und Tabelle 3-2 enthalten darüber hinaus Angaben über die maßgebliche Basis für den Vorschlag der GFS-Werte für anorganische und organische Substanzen/Parameter und die Grenzwerte der TrWV. Die im einzelnen ausgewerteten Quellen können den Datenblättern der Einzelstoffe im Anhang 3 der /LAWA 2004/ entnommen werden.

Der Vergleich zeigt, dass in der TrWV nicht für alle anorganischen und organischen Substanzen / Parameter Grenzwerte vorgeschrieben sind, für die GFS-Werte abgeleitet wurden. Weiterhin zeigt sich, dass die GFS-Werte entweder den Grenzwerten der TrWV entsprechen oder diese teilweise erheblich unterschreiten. Einzige Ausnahme ist der GFS-Wert für die Summe der polycyclischen aromatischen Kohlenwasserstoffe ohne Naphthalin und Methylnaphthaline (PAK): Der Grenzwert der TrWV (0,1 µg/l) berücksichtigt 4 Einzelstoffe; der entsprechende GFS-Wert (0,2 µg/l) berücksichtigt 16 Einzelstoffe.

Tabelle 3-1: Vergleich der Geringfügigkeitsschwellenwerte und Grenzwerte nach TrWV für anorganische Parameter

Substanzname	Geringfügigkeits-schwellenwert [µg/l]	Maßgebliche Basis für den Vorschlag				Grenzwert TrWV [µg/l]
		TrWV	Analog TrWV	Öko-toxizität	Basiswert/ Untergrenze	
Antimon (Sb)	5	X				5
Arsen (As)	10	X				10
Barium (Ba)	340			X	X	-
Blei (Pb)	7			X	X	10
Bor (B)	740			X	X	1.000
Cadmium (Cd)	0,5			X	X	5
Chrom (Cr III)	7			X	X	50
Kobalt (Co)	8			X	X	-
Kupfer (Cu)	14			X	X	2.000[2)]
Molybdän (Mo)	35		X			-
Nickel (Ni)	14			X	X	20
Quecksilber (Hg)	0,2			X	X	1
Selen (Se)	7			X	X	10
Thallium (Tl)	0,8		X			-
Vanadium (V)[1)]	4		X			-
Zink (Zn)	58			X	X	-
Chlorid (Cl^-)	250.000	X				250.000
Cyanid (CN^-)	5 (50)			X		50
Fluorid (F^-)	750		X			1.500
Sulfat (SO_4^{2-})	240.000	X				240.000

1. Die Anwendung des GFS-Wertes für Vanadium ist bis zum 31.12.2007 ausgesetzt. Diese GFS entspricht zwar dem aktuellen Wissen über die Humantoxizität von Vanadium und dem lebenslangen Schutz vor möglichen Wir-kungen. Sie beruht jedoch auf einer unvollständigen und nur strittig zu bewertenden Datenbasis. Durch die Aus-setzung soll insbesondere der Industrie die Gelegenheit gegeben werden, die experimentelle Datenbasis zur Hu-man- und Ökotoxizität zu ergänzen. Es wird vermutet, dass auf verbesserter Datenbasis die GFS für Vanadium er-höht werden kann.
2. Der Grenzwert der TrWV für Kupfer ist technisch begründet.

Tabelle 3-2: Vergleich der Geringfügigkeitsschwellenwerte und Grenzwerte nach TrWV für organische Parameter

Substanzname	Geringfügigkeits-schwellenwert [µg/l]	Maßgebliche Basis für den Vorschlag				Grenzwert TrWV [µg/l]
		TrWV	Analog TrWV	Öko-toxizität	Basiswert/ Untergrenze	
Σ PAK[1)]	0,2	X				0,1
Anthracen	jeweils 0,01	X		X		-
Benzo[a]pyren				X		0,01
Dibenz(a,h)anthracen			X			-
Benzo[b]fluoranthen	jeweils 0,025			X		0,1
Benzo[k]fluoranthen				X		0,1
Benzo[g,h,i]perylen				X		0,1
Fluoranthen				X		-
Indeno[1,2,3-cd]pyren				X		0,1
Σ Naphthalin u. Methylnaphthaline	1			X		-
Σ LHKW[2)]	20	X		X		3; 0,5; 50
Σ Tri- und Tetrachlorethen	10	X		X		10
1,2 Dichlorethan	2			X		3
Chlorethen (Vinylchlorid)	0,5	X				0,5
Σ PCB[3)]	0,01		X	X	X	-
Kohlenwasserstoffe[4)]	100		X			-
Σ Alkylierte Benzole	20		X	X		-
Benzol	1	X				1
MTBE	15		X			-
Phenol[5)]	8			X		-
Nonylphenol	0,3			X		-
Σ Chlorphenole	1		X	X		-
Hexachlorbenzol	0,01			X	X	0,1
Σ Chlorbenzole	1		X	X		-
Epichlorhydrin	0,1	X				0,1

1. PAK, gesamt: Summe der polycyclischen aromatischen Kohlenwasserstoffe ohne Naphthalin und Methylnaphthaline, in der Regel Bestimmung über die Summe von 15 Einzelsubstanzen gemäß Liste der US Environmental Protection Agency (EPA) ohne Naphthalin; ggf. unter Berücksichtigung weiterer relevanter PAK (z. B. aromatische Heterocyclen wie Chinoline).
   Der Grenzwert der TrWV gilt für die Summe der folgenden 4 Einzelstoffe: Benzo[b]fluoranthen, Benzo[k]fluoranthen, Benzo[g,h,i]perylen, Indeno[1,2,3-cd]pyren
2. LHKW, gesamt: Leichtflüchtige Halogenkohlenwasserstoffe, d. h. Summe der halogenierten C1- und C2-Kohlenwasserstoffe; einschließlich Trihalogenmethane. Die GFS zu Tri- und Tetrachlorethen, Dichlorethan und Chlorethen ist zusätzlich einzuhalten.
   Die Grenzwerte der TrWV gelten für 3 Einzelstoffe: 1,2 Dichloethan, Chlorethen (Vinylchlorid), S Trihalomethane

3. PCB, gesamt: Summe der polychlorierten Biphenyle; in der Regel Bestimmung über die 6 Kongeneren nach Ballschmiter gemäß AltölV (DIN 51527) multipliziert mit 5; ggf. z. B. bei bekanntem Stoffspektrum einfache Summenbildung aller relevanten Einzelstoffe (DIN 38407-F3), dann allerdings ohne Multiplikation
4. Bestimmung nach DEV H53. Bei höheren Konzentrationen kann die Gravimetrie (nach ISO 9377-1-Entwurf) ein-gesetzt werden. Bei GC-Analyse bezieht sich der o. a. Wert auf die KW-Summe zwischen C10 und C40.
5. Derzeit steht kein genormtes Verfahren zur Verfügung, dessen untere Anwendungsgrenze niedriger oder gleich dem GFS-Wert ist. Es muss daher auf nicht genormte Verfahren zurückgegriffen werden, die nach den einschlägigen Regeln für Analysenverfahren zu validieren sind. Üblicherweise wird eine Bestimmung des Phenolindex durchgeführt. Bei positivem Befund ist eine Bestimmung der relevanten Einzelstoffe durch-zuführen.

Tabelle 3-3: Geringfügigkeitsschwellenwerte für Pflanzenschutzmittel und Biozidprodukte sowie sprengstofftypische Verbindungen

Pflanzenschutzmittel und Biozidprodukte (PSMBP)	Geringfügigkeits-schwellenwert [µg/l]	Sprengstofftypische Verbindungen	Geringfügigkeits-schwellenwert [µg/l]
Σ PSMBP	0,5	Nitropenta (PETN)	10
PSMBP Einzelstoff	jeweils 0,1	2-Nitrotoluol	1
Aldrin, Azinphosmethyl, Dichlorvos, Dieldrin, Endosulfan, Etrimfos, Fenitrothion, Fenthion, Parathionethyl	jeweils 0,01	3-Nitrotoluol	10
Chlordan	0,003	4-Nitrotoluol	3
Disulfoton	0,004	2-Amino-4,6-Dinitrotoluol	0,2
Diuron	0,05	4-Amino-2,6-Dinitrotoluol	0,2
Hexazinon	0,07	2,4-Dinitrotoluol	0,05
Malathion, Parathion-methyl	jeweils 0,02	2,6-Dinitrotoluol	0,05
Mevinphos	0,0002	2,4,6-Trinitrotoluol	0,2
Pentachlorphenol	0,1	Hexogen	1
Phoxim	0,008	2,4,6-Trinitrophenol (Pikrinsäure)	0,2
Triazophos, Trifluralin, Heptachlor, Heptachlorepoxid	jeweils 0,03	Nitrobenzol	0,7
Tributylzinn[1)]	0,0001	1,3,5-Trinitrobenzol	100
Trichlorphon	0,002	1,3-Dinitrobenzol	0,3
Triphenylzinnverbindungen, Dibutylzinnverbindungen	0,01	Hexanitrodiphenylamin (Hexyl)	2
		Tetryl	5
		Octogen	175

1. Derzeit steht kein genormtes Verfahren zur Verfügung, dessen untere Anwendungsgrenze niedriger oder gleich dem Geringfügigkeitsschwellenwert ist. Es muss daher auf nicht genormte Verfahren zurückgegriffen werden, die nach den einschlägigen Regeln für Analysenverfahren zu validieren sind

Bei der Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle werden insbesondere anorganische Stoffe (s. Tabelle 3-1) in das Salzgestein eingebracht; die organischen Verbindungen (s. Tabelle 3-2) spielen eine untergeordnete Rolle und die in der Tabelle 3-3 aufgeführten Pflanzenschutzmittel, bioziden Wirkstoffe und sprengstofftypischen Verbindungen spielen keine Rolle. Daher wird vorgeschlagen, die in Tabelle 3-1 und Tabelle 3-2 aufgeführten GFS-Werte als Grenz- und Prüfwerte für den Langzeitsicherheitsnachweis für chemotoxische Stoffe eines HAW-Endlagers im Wirtsgestein Salz heranzuziehen.

Die in der Tabelle 3-1 aufgeführten anorganischen Parameter entsprechen mit Ausnahme von Chlorid (Cl-) und Sulfat (SO_4^{2-}-) den anorganischen Stoffen bzw. Verbindungen der in den Listen I und II der Grundwasserverordnung aufgeführten Stofffamilien und Stoffgruppen. Chlorid und Sulfat sind der Liste II Nr. 3 „Stoffe, die eine für den Geschmack oder den Geruch des Grundwassers abträgliche Wirkung haben, sowie Verbindungen, die im Grundwasser zur Bildung solcher Stoffe führen und es für den menschlichen Gebrauch ungeeignet machen können“ zuzuordnen. Für die darüber hinaus in der GrWV benannten anorganischen Stoffe gibt die LAWA keine GFS-Werte vor und werden daher auch beim Nachweis des Grundwasserschutzes nicht berücksichtigt.

3.2 Inventar chemischer und chemotoxischer Stoffe eines HAW-Endlagers im Wirtsgestein Salz

Das Inventar chemischer und chemotoxischer Stoffe in einem zukünftigen HAW-Endlager setzt sich zusammen aus

- Abfall-, Konditionierungs- und Behältermaterialien der radioaktiven Abfälle,
- Versatz- und Barrierematerialien aus Verfüll- und Verschlussmaßnahmen sowie
- Materialien für den Ausbau von Schächten.

3.2.1 Chemische und chemotoxische Stoffe der wärmeentwickelnden radioak-tiven Abfälle

Das Inventar chemischer und chemotoxischer Stoffe der wärmeentwickelnden radioaktiven Abfälle setzt sich aus den Materialien der Behälter und der konditionierten Abfälle zusammen. Soweit nicht anders angegeben werden die entsprechenden Daten dem Bericht /ISIBEL 2008a/ entnommen. In Kapitel 3.2.1.1 erfolgt die Beschreibung der Werkstoffe bzw. Materialien. Die chemische Zusammensetzung der Werkstoffe und Materialien ist in Kapitel 3.2.1.2 beschrieben. In Kapitel 3.2.1.3 ist das Inventar der chemotoxischen Stoffe der wärmeentwickelnden radioaktiven Abfälle dargestellt. In der Tabelle 3-17 sind die identifizierten chemotoxischen Stoffe und deren Masse je Abfallgebinde getrennt nach den Anteilen der Behältermaterialien und der konditionierten Abfälle dargestellt.

3.2.1.1 Werkstoffe und Materialien der wärmeentwickelnden radioaktiven Abfälle

Behältermaterialien

HAW-Kokillen, CSD-B und CSD-C

Das Behältermaterial der HAW-Kokillen mit verglasten hochradioaktiven Spaltprodukten und Feedklärschlämmen, der CSD-B mit verglasten mittelradioaktiven Deko- und Spülwässern und der CSD-C mit kompaktierten mittelradioaktiven Brennelementhülsen, Strukturteilen und Technologieabfällen besteht aus Edelstahl der Sorte Z 15 CN 24.13 (french standard) (s. Tabelle 3-4).

Tabelle 3-4: Werkstoffe und Massen einer HAW-Kokille, CSD-B und CSD-C (unbeladen)

Bauteil	Werkstoff	Masse [kg]
Behälterkörper mit Deckel	Edelstahl Z 15 CN 24.13 (= Werkstoff 1.4833)	80

POLLUX-Behälter und Brennstabkokille

Der POLLUX-Behälter besteht aus einem Innen- und einem Außenbehälter. Der Innenbehälter hat eine Wandstärke von 160 mm und wird durch einen geschraubten Primärdeckel und einen geschweißten Sekundärdeckel dicht verschlossen. Innenbehälter, Primär- und Sekundärdeckel bestehen aus Feinkornbaustahl (15MnNi6.3). Der Innenraum ist in 5 Kammern unterteilt, in die je eine Brennstabbüchse mit den gezogenen Brennstäben der Brennelemente (BE) eingesetzt wird. Der Abschirmbehälter ist wie der Abschirmdeckel aus Sphäroguss (GGG40) hergestellt und hat eine Wandstärke von ca. 270 mm. Im Mantel sind in radial verteilten Bohrungen Stäbe aus Polyethylen zur Neutronenmoderation eingesetzt. Die für die Bauteile des POLLUX-Behälters zum Einsatz kommenden Werkstoffe sind in der Tabelle 3-5 aufgeführt /GNB 1998a/.

Darüber hinaus wird die Masse an Polyethylen je POLLUX-Behälter mit ca. 1.540 kg abgeschätzt. Dies berücksichtigt die Moderatorstäbe (Durchmesser: 76 mm, Länge: 347 lfm, Dichte: 0,96 g/cm³) und die Moderatorplatte im Bereich des Abschirmbehälters (Durchmesser: 900 mm, Dicke: 46 mm, Dichte: 0,96 g/cm³). Die Masse an Grafit des Neutronenmoderators im Primärdeckel (Durchmesser: 690 mm, Dicke: 50 mm, Dichte: 8,0 g/cm³) wird mit ca. 150 kg abgeschätzt.

Tabelle 3-5: Werkstoffe und Massen eines POLLUX-Behälters (unbeladen)

Bauteil	Werkstoff	Masse [kg]
Grundkörper Innenbehälter	Stahl 15MnNi6.3 (1.6210)	ca. 20.650
Primärdeckel mit Moderator	Stahl 15MnNi6.3 (1.6210) Graphit mit Edelstahlblech ummantelt	
Sekundärdeckel	Stahl 15MnNi6.3 (1.6210)	
Büchse/Korb (für Brennstäbe von max. 10 DWR-BE)	Edelstahl (1.4541) mit Borstahlblech beplankt (ca. 1 Ma.-% Bor) Oberflächen teilweise mit Kupfer beschichtet	ca. 2.100
Grundkörper Abschirmbehälter	Gusseisen mit Kugelgraphit GGG40 (0.7040)	ca. 34.810
Abschirmdeckel	Gusseisen mit Kugelgraphit GGG40 (0.7040)	
Kühlrippe	Aluminium EN AW 6060	
Tragzapfen	Edelstahl (1.4313) X 5CrNi13.4	
Dämpfungselement Bodenbereich	Stahlblechgitter mit Neutronenmoderator	
Dämpfungselement Kopfbereich	30 mm Rundprofile aus Al 3.0255	
Neutronenmoderator	Hostalen oder Lupolen	
Schrauben für Primärdeckel	Festigkeitsklasse 10.9	
Schrauben für Tragzapfen	Festigkeitsklasse 8.8	
Summe		ca. 57.560

Die Brennstabkokille (BSK) wurde als Alternative zum POLLUX-Behälter zur Aufnahme der gezogenen Brennstäbe entworfen. Die BSK besteht aus einem zylindrischen Behälterkörper mit 40 mm Wandstärke und einem angepressten oder angeschweißten Boden. Der Behälterkörper besteht wie der Primär- und der Sekundärdeckel der BSK aus Feinkornbaustahl (15MnNi6.3). In einer Aussparung in der Unterseite des verschraubten Primärdeckels wird eine Moderatorplatte zur Neutronenabschirmung eingelegt; eine endgültige Festlegung bezüglich des Moderatormaterials (Polyethylen oder Grafit) ist noch nicht getroffen worden. Über den Primärdeckel wird ein Sekundärdeckel aufgelegt, der mit dem Behälterkörper gasdicht verschweißt wird. Die für die Bauteile der BSK zum Einsatz kommenden Werkstoffe sind in der Tabelle 3-6 aufgeführt /GNB 1998b/. Darüber hinaus wird das Moderatormaterial mit ca. 7 kg Polyethylen bzw. alternativ mit ca. 62 kg Graphit je BSK abgeschätzt (Durchmesser: 350 mm, Dicke: 80 mm, Dichte Polyethylen: 0,96 g/cm³, Dichte Grafit: 8,0 g/cm³).

Tabelle 3-6: Werkstoffe und Massen einer Brennstabkokille (unbeladen)

Bauteil	Werkstoff	Masse [kg]
Behälterkörper mit Primär- und Sekundärdeckel (und Moderator an der Unterseite des Primärdeckels)	Stahl 15MnNi6.3 (1.6210)	2.526
2 Innenbüchsen	Edelstahl (1.4541) *(Annahme wie bei POLLUX)*	340
Summe		2.866

CASTOR AVR/THTR

Der CASTOR-Behälter des Typs AVR/THTR besteht aus einem zylindrischen Grundkörper aus Gusseisen mit Kugelgraphit (Werkstoffbezeichnung GGG) und aus zwei übereinanderliegenden, einzeln abgedichteten Deckeln aus Gusseisen bzw. aus unlegiertem Baustahl (Primär- und Sekundärdeckel). Der Innenraum kann entweder eine Stahlkanne mit THTR-BE oder zwei Stahlkannen mit AVR-BE aufnehmen. Die für die Bauteile des CASTOR AVR/THTR zum Einsatz kommenden Werkstoffe sind in der Tabelle 3-7 aufgeführt /BfS 2005a/ /GNS 2004/.

Tabelle 3-7: Werkstoffe und Massen eines CASTOR AVR/THTR (unbeladen)

Bauteil	Werkstoff	Masse [kg]
Behältergrundkörper	Gusseisen mit Kugelgraphit GGG	*Keine Angabe*
Primärdeckel	Gusseisen (GGG40) oder unlegierter Baustahl (St 52-3 oder TSt E 355)	
Sekundärdeckel	Gusseisen (GGG40) oder unlegierter Baustahl (St 52-3 oder TSt E 355)	
Schrauben für Primärdeckel	*Keine Angabe*	
Schrauben für Sekundärdeckel	*Keine Angabe*	
Primärdeckeldichtung	Metall	
Sekundärdeckeldichtung	Metall	
1 Stahlkanne (für max. 2.320 THTR-BE)	*Keine Angabe*	
2 Stahlkannen für AVR-BE (für max. 1.900 AVR-BE)	*Keine Angabe*	
Tragzapfen	*Keine Angabe*	
Schrauben für Tragzapfen	*Keine Angabe*	
Summe		22.450

CASTOR MTR 2

Der CASTOR MTR 2 besteht aus einem einteiligen, dickwandigen zylindrischen Behälterkörper mit Boden aus Gusseisen mit Kugelgraphit. Am oberen Zylinderende sind der Primärdeckel (Werkstoffnr. 1.0566 oder 1.4313) und der Sekundärdeckel (Werkstoffnr. 1.0566) angeordnet. Zwischen Behälterkörper und Primär- und Sekundärdeckel befinden sich Metalldichtungen. Der Behälterkörper wird mit Primär- und Sekundärdeckel verschraubt. Im Behälterinnenraum ist einer von sechs möglichen Tragkörben angeordnet. Im Folgenden wird eine Beladung mit 5 Brennelementen des Forschungsreaktors München (FRM II) in Tragkorb 6/5 als Referenzbeladung des CASTOR MTR 2 angenommen. Die für die Bauteile des CASTOR MTR 2 zum Einsatz kommenden Werkstoffe sind in der Tabelle 3-8 aufgeführt /BfS 2005b/ /GNS 2004/.

Tabelle 3-8: Werkstoffe und Massen eines CASTOR MTR 2 (unbeladen)

Bauteil	Werkstoff	Masse [kg]
Behältergrundkörper	Gusseisen mit Kugelgraphit	*Keine Angabe*
Primärdeckel	Werkstoff 1.0566 oder 1.4313	
Sekundärdeckel	Werkstoff 1.0566	
Schrauben für Primärdeckel	*Keine Angabe*	
Schrauben für Sekundärdeckel	*Keine Angabe*	
Primärdeckeldichtung	Metall	
Sekundärdeckeldichtung	Metall	
Tragkorb 6/5 (für max. 5 FRM II-BE)	Werkstoff 3.3241.62 und Werkstoff 1.4306 boriert	
Tragzapfen	*Keine Angabe*	
Schrauben für Tragzapfen	*Keine Angabe*	
Summe		15.170

CASTOR KNK

Der Aufbau des CASTOR KNK ist weitestgehend identisch zum CASTOR AVR/THTR. Beim CASTOR KNK befindet sich im Behälterschachtraum ein Tragkorb, der jeweils 9 verschweißte Büchsen mit bestrahlten und unbestrahlten Kernbrennstoffen aufnimmt. Es existieren zwei Tragkorbvarianten. Die Variante 1 nimmt neun Büchsen vom Typ Phenix, die Variante 2 nimmt acht Büchsen vom Typ Phenix und eine Büchse vom Typ OH auf. Die Phenix-Büchsen enthalten Kernbrennstoffe aus der kompakten natriumgekühlten Kernreaktoranlage KNK II oder aus Nuklearexperimenten (Mol). In der OH-Büchse sind Kernbrennstoffe aus dem Nuklearschiff Otto-Hahn verpackt. Die für die Bauteile des CASTOR KNK zum Einsatz kommenden Werkstoffe sind in der Tabelle 3-9 aufgeführt. /BfS 2005a/.

Tabelle 3-9: Werkstoffe und Massen eines CASTOR KNK (unbeladen)

Bauteil	Werkstoff	Masse [kg]
Behältergrundkörper	Gusseisen mit Kugelgraphit GGG	*Keine Angabe*
Primärdeckel	Gusseisen (GGG40) oder unlegierter Baustahl (St 52-3 oder TSt E 355)	
Sekundärdeckel	Gusseisen (GGG40) oder unlegierter Baustahl (St 52-3 oder TSt E 355)	
Schrauben für Primärdeckel	*Keine Angabe*	
Schrauben für Sekundärdeckel	*Keine Angabe*	
Primärdeckeldichtung	Metall	
Sekundärdeckeldichtung	Metall	
Tragkorb (für 9 Büchsen mit Brenn-stäben des KNK)	*Keine Angabe*	
9 Büchsen (für Brennstäbe des KNK)	*Keine Angabe*	
Tragzapfen	*Keine Angabe*	
Schrauben für Tragzapfen	*Keine Angabe*	
Summe		*Keine Angabe*

Abfallmaterialien

HAW-Kokillen, CSD-B

Die beim Wiederaufarbeitungsprozess entstehenden Spaltproduktlösungen werden aufkonzentriert und in einem keramischen Schmelzer mit Glasfritte zu einem Borosilikatglasprodukt verarbeitet (s. Tabelle 3-10). Es werden ca. 150 Liter (ca. 410 kg) flüssige Glasschmelze in eine HAW-Kokille abgefüllt. Die radioaktiven Reststoffe aus der Betriebsabwasseraufbereitung in La Hague werden verdampft und die Konzentrate als mittelradioaktive Glasprodukte konditioniert. Da zu den CSD-B bislang noch keine Abfallspezifikation vorliegt, wird die chemische Zusammensetzung der HAW-Kokillen auch für die CSD-B herangezogen.

Tabelle 3-10: Material und Massen der Abfallprodukte einer HAW-Kokille

Material	Masse	
	[kg]	[%]
Borsilikatglas	410	100

CSD-C

Die zu kompaktierenden mittelradioaktiven Brennelementhülsen, Strukturteile und Technologieabfälle (CSD-C) bestehen nach Abschätzungen von COGEMA langfristig zu 90 % aus Hülsen und Strukturteilen bestrahlter Leichtwasserreaktor-Brennelemente und zu 10 % aus technologischen Abfällen. Der technologische Abfall besteht aus metallischen Komponenten und Materialien aus den heißen Zellen des Wiederaufarbeitungsprozesses. Das zur Kompaktierung zugelassene Material ist bisher auf Metalle und Legierungen beschränkt. Nichtmetallische und nennenswerte organische Bestandteile sind derzeit ausgeschlossen. Als nicht nennenswerte Menge stuft COGEMA 10 g Organika pro CSD-C ein. Im Rahmen des technologischen Abfalls können auch Sonderabfälle, im Wesentlichen Metallfilter, verarbeitet werden.

Zur Ermittlung der chemischen Zusammensetzung der CSD-C werden Angaben zu Werkstoffen und Massen eines beispielhaften DWR-BE herangezogen /DBE 2006/. Das BE besteht aus Federbeinen (Werkstoff Inc X-750 und 1.4541), Kopf (1.4541), Führungsrohren inkl. Kopf- und Fußverbindungen (Zr-Alloy/Zry-4 und 1.4541), Abstandhalter (Inc 718 und Zr-Alloy/Zry-4) und Fuß (1.4541) und dem Brennstab. Ein Brennstab besteht aus Endstopfen (Zry-4), Hüllrohren (Zr-Alloy), Druckfedern (1.4568), Isoliertabletten (Al_2O_3), Stützrohren (1.4541) und dem Brennstoff (UO_2). In der Tabelle 3-11 sind Werkstoffe und Massen der Hülsen und Strukturteile eines beispielhaften DWR-BE dargestellt.

Tabelle 3-11: Werkstoffe und Massen der Hülsen und Strukturteile eines DWR-BE

Werkstoff	Masse	
	[kg]	[%]
Zr-Alloy/Zry-4	189,62	82,14
Inc X-750	3,10	1,34
Inc 718	1,34	0,58
1.4541	32,31	14,00
1.4568	4,48	1,94
Summe	230,85	100,00

Die in der Tabelle 3-11 dargestellte prozentuale Verteilung wird für die mittlere Zusammensetzung der kompaktierten Abfälle in den CSD C herangezogen. Die Abfallmasse errechnet sich aus der mittleren Gesamtmasse je CSD C (ca. 700 kg) abzgl. der Leermasse der CSD C (ca. 80 kg) zu 620 kg.

POLLUX-Behälter und Brennstabkokille

Zur Ermittlung der chemischen Zusammensetzung der Brennstäbe werden Angaben zu Werkstoffen und Massen eines beispielhaften DWR-BE herangezogen /DBE 2006/. Ein Brennstab besteht aus Endstopfen (Zry-4), Hüllrohren (Zr-Alloy), Druckfedern (1.4568), Isoliertabletten (Al_2O_3), Stützrohren (1.4541) und dem Brennstoff (UO_2). In der Tabelle 3-12 sind Werkstoffe und Massen der Brennstäbe eines beispielhaften DWR-BE dargestellt.

Tabelle 3-12: Werkstoffe und Massen der Hülsen und Strukturteile eines DWR-BE

Werkstoff	Masse	
	[kg]	[%]
Zr-Alloy/Zry-4	189,62	82,14
Inc X-750	3,10	1,34
Inc 718	1,34	0,58
1.4541	32,31	14,00
1.4568	4,48	1,94
Summe	230,85	100,00

Die in der Tabelle 3-12 dargestellten Werkstoffe und Massen werden für die Zusammensetzung der Brennstäbe in POLLUX-Behältern und Brennstabkokillen herangezogen. Für die POLLUX-Behälter wird die Masse der Brennstäbe von 10 Brennelementen (7.853 kg) und für die Brennstabkokillen von 3 Brennelementen (2.356 kg) berücksichtigt.

CASTOR AVR/THTR

Es werden BE-Kugeln des THTR-300 als Referenzbrennelemente des CASTOR AVR/THTR herangezogen. Diese THTR-BE bestehen aus einer Graphitkugel, in welche ebenfalls kugelförmige Brennstoffpartikel aus Uran-Thorium-Mischoxid eingebettet sind (s. Tabelle 3-13).

Tabelle 3-13: Werkstoffe und Massen einer BE-Kugel des THTR-300

Werkstoff	Masse	
	[kg]	[%]
Graphit (C)	0,192	94,58
Thorium (Th)	0,010	4,93
Uran (U)	0,001	0,49
Summe	0,203	100,00

Die in der Tabelle 3-13 dargestellten Werkstoffe und Massen werden für die Zusammensetzung der Brennelemente in CASTOR AVR/THTR herangezogen. Es werden 2.320 BE-Kugeln (471 kg) berücksichtigt.

CASTOR MTR 2

Es werden die BE des FRM II als Referenzbrennelemente des CASTOR MTR 2 herangezogen. Diese FRM II-BE bestehen aus Uransilizid (U_3Si_2), welches in Aluminium gewalzt ist. Es ist vorgesehen, die spaltmaterialfreien Kopfstücke der BE nach Entnahme aus dem Reaktor abzutrennen. Mit den vorliegenden Massenangaben eines BE (max. 45 kg) und zum Uran (max. Anfangsmasse: 8,186 kg) wurde die Masse an U_3Si_2 und Aluminium je FRM II-BE berechnet (s. Tabelle 3-14).

Tabelle 3-14: Werkstoffe und Massen eines Brennelementes des FRM II

Werkstoff	Masse	
	[kg]	[%]
U_3Si_2	8,830	19,62
Aluminium (Al)	36,170	80,38
Summe	45,000	100,00

Die in der Tabelle 3-14 dargestellten Werkstoffe und Massen werden für die Zusammensetzung der Brennelemente in CASTOR MTR 2 herangezogen. Es werden 5 FRM II-BE (225 kg) berücksichtigt.

CASTOR KNK

Es werden die Brennstäbe aus 27 BE mit U-/Pu-Mischoxidbrennstoff aus dem Betrieb der KNK II als Referenzbrennelemente des CASTOR KNK herangezogen. Die Brennstäbe bestehen aus der oberen und unteren Endkappe, oberer Reflektorstange bzw. unteres Stützrohr (Reflektor), oberer/unterer Isoliertablette, der Brennstofftablettensäule und einer Feder. Für die Bestandteile der Brennstäbe liegen Angaben zu folgenden Materialien vor: Hüllrohr (Werkstoff: 1.4970), Brennstoff (UO_2, PuO_2), Reflektor (Werkstoff: 1.4541), Isoliertabletten (Al_2O_3) /INTERATOM 1986/. Massenangaben liegen lediglich zum Brennstoff vor (s. Tabelle 3-15) /WTI 2006/.

Tabelle 3-15: Werkstoffe und Massen der Brennstäbe des KNK II – mittleres Inventar eines CASTOR KNK

Werkstoff	Masse	
	[kg]	[%]
Uran (U)	114,502	*Keine Angabe*
Plutonium (Pu)	21,812	*Keine Angabe*
1.4970	*Keine Angabe*	*Keine Angabe*
1.4541	*Keine Angabe*	*Keine Angabe*
Al_2O_3	*Keine Angabe*	*Keine Angabe*
Summe	*Keine Angabe*	100,00

Die in der Tabelle 3-15 (derzeit noch unvollständigen) Angaben zu Werkstoffen und Massen können für die mittlere Zusammensetzung der Brennstäbe des KNK herangezogen werden.

3.2.1.2 Chemische Zusammensetzung der Werkstoffe und Materialien der wärmeentwickelnden radioaktiven Abfälle

Behältermaterialien

HAW-Kokillen, CSD-B, CSD-C

Im Folgenden ist die chemische Zusammensetzung des Behältermaterials der HAW-Kokillen, CSD-B und CSD-C (s. Tabelle 3-4) aufgeführt.

Hitzebeständiger Stahl Z 15 CN 24.13 (french standard) (= Werkstoff 1.4833) /THERMAX 2002/

C:	< 0,15 %	Si:	< 1,0 %	N:	0,08 %	Mn:	< 2,0 %
Cr:	22,0…24,0 %	Ni:	12,0…14,0 %	Fe:	> 58,8 %		

POLLUX-Behälter, Brennstabkokillen, CASTOR-Behälter der Typen AVR/THTR, MTR 2 und KNK

Im Folgenden sind die chemischen Zusammensetzungen der Werkstoffe der Bauteile der o. g. Endlagergebinde für Brennstäbe ausgedienter Brennelemente aus Leistungsreaktoren sowie ausgedienter Brennelemente aus Forschungsreaktoren (s. Tabelle 3-5 bis Tabelle 3-9) beschrieben.

Feinkornbaustahl 15MnNi6.3 (Werkstoff Nr. 1.6210) /KTA 1988/

C:	0,1…0,2 %	Si:	0,15…0,37 %	Mn:	1,15…1,7 %	P:	< 0,017 %
S:	< 0,007 %	Ni:	0,5…0,9 %	Al:	0,015…0,065 %	As:	< 0,016 %
Cr:	< 0,2 %	Cu:	< 0,07 %	Mo:	< 0,05 %	N:	< 0,016 %
Nb:	< 0,004 %	Sn:	< 0,013 %	Ti:	< 0,02 %	V:	< 0,02 %
Fe:	> 96,33 %						

Sphäroguss GGG40 (Werkstoff Nr. DIN/EN: EN-JS1030) /SPHÄROGUSS 2006/

Fe:	> 91,5 %	C:	3,4…3,8 %	Mn:	0,1…0,6%	S:	0,003…0,015 %
Si:	2,0…3,0 %	Cr:	< 0,1 %	Cu:	< 1 %		

Unlegierter Baustahl ST 52-3 (Werkstoff Nr. 1.0553) /SALZGITTER 2006/

Fe:	> 97,6 %	C:	< 0,2 %	Mn:	< 1,6%	Si:	< 0,55 %
S:	< 0,03 %	P:	< 0,03 %				

Feinkornbaustahl 1.0566 /SALZGITTER 2006/

Fe:	> 96,9 %	C:	< 0,18 %,	Mn:	1,1…1,7 %,	Nb:	< 0,05 %
Si:	< 0,5 %,	Cu:	< 0,3 %,	S:	< 0,015 %	V:	< 0,1 %
P:	< 0,025 %	N:	< 0,012 %	Al:	> 0,02 %	Ti:	< 0,03 %
Ni:	< 0,5 %						

Rostfreier Stahl 1.4313 (X3CrNiMo13-4) /METALLOGRAPH 2006/

Fe:	> 79,0 %	C:	< 0,05 %	Mn:	< 1,0 %	Ni:	3,5…4,5 %
Si:	< 0,6 %	S:	< 0,015 %	P:	< 0,035 %	Mo:	0,4…0,7 %
N:	> 0,02 %	Cr:	12,5 … 14,0 %				

Bezeichnung TSt E 355 (Werkstoff Nr. 1.0549) /SALZGITTER 2007/

Fe:	> 97,5 %	C:	< 0,18 %	Mn:	0,9 … 1,65 %	Ni:	< 0,5 %
Si:	< 0,5 %	S:	< 0,025 %	P:	< 0,03 %	Mo:	< 0,1 %
N:	> 0,015 %	Cr:	< 0,3 %	Al:	> 0,02 %	V:	< 0,12 %
Cu:	< 0,35 %	Nb:	< 0,05 %	Ti:	< 0,03 %		

Werkstoff-Nr. 1.4541 /DOLDER 2006/

Fe:	> 65,0 %	C:	< 0,08 %	Mn:	< 2,0 %	Ni:	9,0 … 12,0 %
Si:	< 1,0 %	S:	< 0,015 %	Cr:	17,0 … 19,0 %	Ti:	< 0,7 %

Werkstoff-Nr. 1.4306 boriert /DOLDER 2006/

Fe:	> 65,0 %	C:	< 0,03 %	Mn:	< 2,0 %	Ni:	10,0 … 12,0 %
Si:	< 1,0 %	S:	< 0,015 %	Cr:	18,0 … 20,0 %	N:	< 0,11 %
B:	< 0,15 % *)						

*) maximale Löslichkeit von Bor als Legierungselement in Eisen bei erhöhter Temperatur /STAHL 2007/

Werkstoff-Nr. GK-AlMgSi 3.3241.62 (DIN 1725-2) /MELIS 2007/

Al:	> 93,8 %	Fe:	0,5 %	Mn:	0,001 … 0,4 %	Mg:	2,5 … 3,5 %
Si:	0,9 … 1,3 %	Zn:	0,1 %	Cu:	0,05 %	Ti:	0,001 … 0,2 %
Sonst.:	0,05 … 0,15 %						

Aluminium AW-Al Si Mg (A) (Werkstoff Nr. EN AW 6060) /SCHREIER 2007/

Al:	> 98,5 %	Fe:	0,1 … 0,3 %	Mg:	0,35 … 0,6 %	Si:	0,3 … 0,6 %

Al 99,5 (Werkstoff-Nr. 3.0255) /SCHREIER 2007/

Al:	99,5 %	Fe:	< 0,4 %	Si:	< 025 %

Grafit:

C:	ca. 99,8 %	Si:	Ca. 0,2 %	Si:	< 025 %

Polyethylen
(Hostalen und Lupolen: Hersteller-Markenbezeichnung für Polyethylen)
$(C_2H_4)n$

Elastomer: Thermoplast wie z. B. Polyethylen, Polypropylen u.ä.
C-H-Verbindungen

Abfallmaterialien

HAW-Kokillen, CSD-B

In der Tabelle 3-16 ist die chemische Zusammensetzung der verglasten hochradioaktiven Spaltprodukte und Feedklärschlämme für die von AREVA-NC zurückzunehmenden HAW-Kokillen aufgeführt. Da ca. 80 % der in Deutschland endzulagernden HAW-Kokillen von A-REVA-NC stammen, wird ihre Zusammensetzung als repräsentativ für die Ermittlung der chemotoxischen Stoffe aller HAW-Kokillen herangezogen. Zu den CSD-B mit verglasten mittelradioaktiven Deko- und Spülwässern liegt bislang noch keine Abfallspezifikation vor. Daher wird die chemische Zusammensetzung der HAW-Kokillen auch für die CSD-B herangezogen.

Tabelle 3-16: Chemische Zusammensetzung des Borsilikatglases (HAW-Kokille, CSD-B)

	Masse	
	[kg]	[%]
SiO_2	184,91	45,1
B_2O_3	56,99	13,9
Al_2O_3	20,09	4,9
Na_2O	40,18	9,8
CaO	16,40	4,0
Fe_2O_3	11,89	2,9
NiO	1,64	0,4
Cr_2O_3	2,05	0,5
P_2O_5	1,23	0,3
Li_2O	8,20	2,0
ZnO	10,25	2,5
FP oxides	45,51	11,1
Zr oxides	4,10	1,0
Metallic particles	2,87	0,7
Actinides oxides	3,69	0,9
Summe	410,00	100,0

CSD-C

Im Folgenden sind die chemischen Zusammensetzungen der in der Tabelle 3-11 dargestellten Werkstoffe der Hülsen und Strukturteile eines DWR-BE beschrieben.

Zr-Alloy/Zry-4, Zr-Alloy /DBE 1999/

Zr:	98,15 %	Sn:	1,5 %	Fe:	0,2 %	Ni:	0,05 %
Cr:	0,1 %						

Inc X-750 /ESPI 2006/

Ni:	70 %	Co:	1 %	Cr:	15,5 %	Fe:	7 %
Si:	0,5 %	Mn:	1 %	C:	0,08 %	Al:	0,7 %
Ti:	2,5 %	Cu:	0,5 %	S:	0,01 %	Nb, Ta:	0,95 %

Inc 718 /ESPI 2006/

Ni:	52,5 %	Co:	1 %	Cr:	19 %	Mo:	3,05 %
Fe:	17 %	Si:	0,35 %	Mn:	0,35 %	C:	0,08 %
Al:	0,6 %	Ti:	0,9 %	Cu:	0,3 %	P:	0,015 %
B:	0,006 %	S:	0,015 %	Nb, Ta:	5,125 %		

Werkstoff 1.4541, Rost- und säurebeständiger Stahl (X6CrNiTi18-10) /METALLOGRAPH 2006/

C:	< 0,08 %	Si:	< 1,0 %	Mn:	< 2,0 %	P:	< 0,045 %
S:	< 0,03 %	Cr:	17,0 … 19,0 %	Ni:	9,0 … 12,0 %	Ti:	bis 0,4 %
Fe:	> 65,4 %						

Werkstoff 1.4568, Rost- und säurebeständiger Stahl (X12CrNiAl17-7) /BOSSARD 2003/

C:	< 0,09 %	Si:	< 0,7 %	Mn:	< 1,0 %	P:	< 0,04 %
S:	< 0,015 %	Cr:	16,0…18,0 %	Ni:	6,5…7,8 %	Al:	0,7…1,5 %
Fe:	> 70,8 %						

POLLUX-Behälter und Brennstabkokillen

Im Folgenden sind die chemischen Zusammensetzungen der in der Tabelle 3-12 dargestellten Werkstoffe der Brennstäbe eines DWR-BE beschrieben.

Zr-Alloy/Zry-4, Zr-Alloy /DBE 1999/

Zr:	98,15 %	Sn:	1,5 %	Fe:	0,2 %	Ni:	0,05 %
Cr:	0,1 %						

Werkstoff 1.4541, Rost- und säurebeständiger Stahl (X6CrNiTi18-10) /METALLOGRAPH 2006/

C:	< 0,08 %	Si:	< 1,0 %	Mn:	< 2,0 %	P:	< 0,045 %
S:	< 0,03 %	Cr:	17,0 … 19,0 %	Ni:	9,0 … 12,0 %	Ti:	bis 0,4 %
Fe:	> 65,4 %						

Werkstoff 1.4568, Rost- und säurebeständiger Stahl (X12CrNiAl17-7) /BOSSARD 2003/

C:	< 0,09 %	Si:	< 0,7 %	Mn:	< 1,0 %	P:	< 0,04 %
S:	< 0,015 %	Cr:	16,0…18,0 %	Ni:	6,5…7,8 %	Al:	0,7…1,5 %
Fe:	> 70,8 %						

Al_2O_3

Al:	52,9 %	O:	47,1 %

UO_2

U:	88,1 %	O:	11,9 %

CASTOR AVR/THTR

Bei den chemischen Bestandteilen der BE-Kugeln des THTR-300 handelt es sich um Graphit (C), Thorium (Th) und Uran (U). Die jeweiligen Massenanteile können Tabelle 3-13 entnommen werden.

CASTOR MTR 2

Bei den chemischen Bestandteilen der Brennelemente des FRM II handelt es sich um U_3Si_2 und Aluminium (Al). Die jeweiligen Massenanteile können Tabelle 3-14 entnommen werden.

CASTOR KNK

Bei den chemischen Bestandteilen der Brennstäbe des KNK II handelt es sich u. a. um Uran (U) und Plutonium (Pu). Im Folgenden ist die chemische Zusammensetzung der darüber hinaus in der Tabelle 3-15 aufgeführten Werkstoffe der Brennstäbe der KNK II beschrieben.

Werkstoff 1.4541, Rost- und säurebeständiger Stahl (X6CrNiTi18-10) /METALLOGRAPH 2006/

C:	< 0,08 %	Si:	< 1,0 %	Mn:	< 2,0 %	P:	< 0,045 %
S:	< 0,03 %	Cr:	17,0 … 19,0 %	Ni:	9,0 … 12,0 %	Ti:	bis 0,4 %
Fe:	> 65,4 %						

Werkstoff 1.4970 /HÜBNER 2000/

Cr:	15 %	Ni:	15 %	Mn:	1,6 %	Mo:	1,5 %
Si::	0,4 … 1 %	Ti:	0,3 … 0,5 %	Fe:	> 65,4 %		

Al_2O_3

Al:	52,9 %	O:	47,1 %

3.2.1.3 Inventar chemotoxischer Stoffe der wärmeentwickelnden radioaktiven Abfälle

Mit den in den Kapiteln 3.2.1.1 und 3.2.1.2 vorliegenden Angaben zu Werkstoffen und Materialien der wärmeentwickelnden radioaktiven Abfälle und der jeweiligen chemischen Zusammensetzung erfolgt die Abschätzung des Inventars der chemotoxischen Stoffe. Die Tabelle 3-17 enthält eine Übersicht der ermittelten Massen chemotoxischer Stoffe je Abfallgebinde getrennt nach den Anteilen der Behältermaterialien und den Anteilen der konditionierten Abfälle. Nicht berücksichtigt wurden einige Stoffe der Listen I und II GrWV, für die keine Geringfügigkeitsschwellenwerte festgelegt worden sind. Dazu gehören Phosphor, Titan und Zinn, die in den betrachteten Abfallmaterialien nur als gering prozentuale Bestandteile in Stählen und Aluminium vorhanden sind, sowie Uran, das als Bestandteil der ausgedienten Brennelemente bereits beim radiologischen Langzeitsicherheitsnachweis Berücksichtigung findet.

Am Beispiel der HAW-Kokillen wird die Vorgehensweise erklärt: Zur Ermittlung der chemotoxischen Stoffe des Behältermaterials wird die chemische Zusammensetzung des Werkstoffes Nr. 1.4833 herangezogen; als chemotoxische Stoffe werden Chrom und Nickel identifiziert. Die Massenanteile von Cr und Ni werden unter Berücksichtigung der jeweils maximalen Werte der chemischen Zusammensetzung des Werkstoffes (Cr: 24,0 %, Ni: 14,0 %) und der Masse des Behälters (Leermasse: ca. 80 kg) errechnet. Zur Ermittlung der chemotoxischen Stoffe des konditionierten Abfalls wird die chemische Zusammensetzung des Borsilikatglases herangezogen (s. Tabelle 3-16). Von den dort aufgeführten Verbindungen werden Anteile von chemotoxischen Stoffen in den Verbindungen B_2O_3, NiO, Cr_2O_3 und ZnO identifiziert; dies sind Bor, Nickel, Chrom und Zink. Die Massenanteile der chemotoxischen Stoffe wurden unter Berücksichtigung der Massenanteile der jeweiligen Verbindung am Borsilikatglas (B_2O_2: 13,9 %, NiO: 0,4 %, Cr_2O_3: 0,5 % und ZnO: 2,5 %), der Massenanteile der chemotoxischen Stoffe an der Verbindung (B_2O_3: 31,06 % Bor, NiO: 78,58 % Nickel, Cr_2O_3: 68,42 % Chrom, ZnO: 80,34 % Zink) und der Masse des Borsilikatglases (ca. 410 kg) errechnet.

Da zu den CSD-B bislang noch keine Abfallspezifikation vorliegt, wird die chemische Zusammensetzung der HAW-Kokillen auch für die CSD-B herangezogen. Die für die HAW-Kokillen ermittelten chemotoxischen Stoffe können daher in erster Näherung auch für die CSD-B herangezogen werden.

In der Tabelle 3-17 sind die ermittelten Massen chemotoxischer Stoffe für HAW-Kokillen, CSD-B, CSD-C, POLLUX-Behälter, Brennstabkokillen und CASTOR AVR/THTR aufgeführt. Für diese Abfallgebinde liegt eine sehr gute Datenbasis sowohl für die Behältermaterialien als auch für die konditionierten Abfälle vor. Dies gilt auch für POLLUX-Behälter, obwohl sich die vorliegenden Massenangaben der Behältermaterialien auf die wesentlichen Komponenten beschränken; Massenangaben zu geringeren Massenanteilen, wie der Oberflächenbeschichtung von Büchse/Korb, von Kühlrippen, Tragzapfen oder Moderator liegen nicht vor. Bei der Ermittlung der chemotoxischen Stoffe wurden die Massenanteile entsprechend der Tabelle 3-5 berücksichtigt und damit die Behältermasse des POLLUX-Behälters (Leermasse: ca. 57.560 kg) vollständig berücksichtigt.

Hinsichtlich der Behältermaterialien des CASTOR AVR/THTR gilt gleiches wie für den POLLUX-Behälter; die Behältermasse des CASTOR AVR/THTR (Leermasse: ca. 22.450 kg) wurde vollständig als Gusseisen mit Kugelgraphit (GGG) berücksichtigt. Für die Ermittlung der chemotoxischen Stoffe des CASTOR MTR 2 fehlt die Aufteilung der Behältermasse auf Behältergrundkörper sowie Primär- und Sekundärdeckel (s. Tabelle 3-8) und für den CASTOR KNK fehlt die Angabe der Behältermasse (s. Tabelle 3-9).

Bei den betrachteten Referenzbrennelementen der CASTOR-Behälter der Typen AVR/THTR und MTR 2 liegen keine chemotoxischen Stoffe vor. Bei den BE-Kugeln des THTR-300 (CASTOR AVR/THTR) handelt es sich um Graphit, Thorium und Uran (s. Tabelle 3-13) und bei den BE des FRM II (CASTOR MTR 2) um Aluminium und U_3Si_2 (s. Tabelle 3-14). Für die Brennstäbe des KNK II sind die Angaben zur chemischen Zusammensetzung unvollständig (s. Tabelle 3-15) und konnten daher für den CASTOR KNK nicht berücksichtigt werden.

Die Tabelle 3-17 beschränkt sich auf die Darstellung der anorganischen Parameter analog Tabelle 3-1, da bei der Ermittlung der chemotoxischen Stoffe nur anorganische Stoffe und keine organischen Verbindungen (s. Tabelle 3-2) identifiziert wurden.

Tabelle 3-17: Massen chemotoxischer Stoffe je Abfallgebinde getrennt nach den Anteilen aus den Behältermaterialien und den Anteilen der konditionierten radioaktiven Abfälle

Anorganische Parameter	HAW-Kokillen + CSD-B			CSD-C			POLLUX-Behälter			Brennstabkokillen			CASTOR AVR/THTR		
	Behälter	Abfall	Gesamt	Behälter	Abfall	Gesamt	Behälter	Abfall	Gesamt	Behälter	Abfall	Gesamt	Behälter	Abfall	Gesamt
	[kg]	[kg]	[kg]	[kg]	[kg]	[kg]	[kg]	[kg]	[kg]	[kg]	[kg]	[kg]	[kg]	[kg]	[kg]
	80	410	490	80	620	700	57.560	7.853	65.413	2.866	2.356	5.222	22.450	471	22.921
Antimon (Sb)															
Arsen (As)							3,304		3,304	0,404		0,404			
Barium (Ba)															
Blei (Pb)															
Bor (B)		17,701	17,701		0,000	0,000									
Cadmium (Cd)															
Chrom (Cr III)	19,200	1,403	20,603	19,200	20,628	39,828	475,110	22,167	497,277	69,652	6,650	76,302	22,450		22,450
Kobalt (Co)					0,119	0,119									
Kupfer (Cu)					0,052	0,052	362,555		362,555	1,768		1,768	224,500		224,500
Molybdän (Mo)					0,110	0,110	10,325		10,325	1,263		1,263			
Nickel (Ni)	11,200	1,289	12,489	11,200	19,058	30,258	437,850	12,195	450,045	63,534	3,659	67,193			
Quecksilber (Hg)															
Selen (Se)															
Thallium (Tl)															
Vanadium (V)							4,130		4,130	0,505		0,505			
Zink (Zn)		8,235	8,235												
Chlorid (Cl^-)															
Cyanid (CN^-)															
Fluorid (F^-)															
Sulfat (SO_4^{2-})															
Σ chemotoxische Stoffe	30	29	59	30	40	70	1.293	34	1.328	137	10	147	247		247

3.2.2 Chemische und chemotoxische Stoffe der Versatz- und Barrierematerialien aus Verfüll- und Verschlussmaßnahmen

In diesem Kapitel werden die Zusammensetzungen der Versatzmaterialien für Bohrlöcher, Strecken und andere untertägige Hohlräume sowie der Barrierematerialien für den Verschluss des Endlagers gegenüber der Geo-/Biosphäre beschrieben. In der Tabelle 3-26 sind die identifizierten chemotoxischen Stoffe in den Versatz- und Barrierematerialien dargestellt.

3.2.2.1 Chemische und chemotoxische Stoffe der Versatzmaterialien

Für den Versatz von Bohrlöchern, Strecken und anderen untertägigen Hohlräumen und für den Verschluss der Bohrlöcher ist nach heutigen Planungen ausschließlich Salzgrus vorgesehen. Beispielhaft ist in der Tabelle 3-18 die durchschnittliche Zusammensetzung des Staßfurt Hauptsalzes (z2HS) und in der Tabelle 3-19 die des Steinsalzes in der unteren Leine-Folge (z3LS und z3OS) für den Standort Gorleben aufgeführt /MÜLLER-SCHMITZ 1985/.

Tabelle 3-18: Zusammensetzung des Staßfurt Hauptsalzes (z2HS)

Mineralname	Verbindung	Masse [%]	Dichte [g/cm³]
Halit	NaCl	95,0	2,164
Anhydrit	$CaSO_4$	4,9	2,97
Polyhalit	$Ca_2K_2Mg(SO_4)_4 \cdot 2H_2O$	0,1	2,78
wasserunlösliche Bestandteile (Tone, Quarz usw.)		0 – 1	-

Tabelle 3-19: Zusammensetzung des Steinsalzes in der unteren Leine-Folge (z3LS und z3OS)

Mineralname	Verbindung	Masse [%]	Dichte [g/cm³]
Halit	NaCl	94,4	2,164
Anhydrit	$CaSO_4$	5,0	2,97
Polyhalit	$Ca_2K_2Mg(SO_4)_4 \cdot 2H_2O$	0,5	2,78
Carnallit	$KCl \cdot MgCl_2 \cdot 6H_2O$	< 0,1	1,602
wasserunlösliche Bestandteile (Tone, Quarz usw.)		0 – 1	-

In den betrachteten Versatzmaterialien wurden Chlorid (Cl-) und Sulfat (SO_4^{2-}) als chemotoxische Stoffe identifiziert (Cl-: ca. 60 Ma.-% der Verbindung NaCl; SO_4^{2-}: ca. 70 Ma.-% der Verbindung $CaSO_4$). Die Chloridanteile des Carnallit und die Sulfatanteile des Polyhalit sind gegenüber den o. g. Massenanteilen des Halit bzw. des Anhydrit vernachlässigbar. Da es sich bei dem Versatzmaterial um Material des Salzstockes selbst handelt, wird vorgeschlagen, Salzgrus hinsichtlich des Nachweises zum Schutz des Grundwassers vor chemotoxischen Stoffen nicht weiter zu berücksichtigen.

3.2.2.2 Chemische und chemotoxische Stoffe der Barrierematerialien

Für den Verschluss des Endlagers gegenüber der Geo-/Biosphäre sind zwei Barrieren vorgesehen: eine zwischen Infrastruktur- und Einlagerungsbereich und eine zweite am Schacht. Nach heutigen Planungen kommen folgende Materialien in Betracht: Bentonit, Magnesiabinder, Salzbeton, Baustoffgruppen aus Salzmineralien, Steinsalz-Anhydrit-Baustoffe und Schotter.

Bentonit

Bentonite sind smektitische Tongesteine. Sie entstehen durch Umwandlung vulkanischer Aschen oder durch Degradation von Illit, eines strukturell ähnlichen Tonminerals mit hohem Kaliumgehalt im Schichtzwischenraum. Bentonite können geringe Gehalte von Quarz, Karbonat, Glimmer, Feldspat, Fe-Sulfide oder -[Hydr]oxide, organische Substanzen und/oder weitere Tonminerale, insbesondere Illit, enthalten.

Im Folgenden werden die beiden meist verwendeten Bentonite mineralogisch beschrieben /MÜLLER-VONMOOS et al 1983/. In der Tabelle 3-20 ist ihre mineralogische Zusammensetzung dargestellt.

SPV Volclay, Na-Bentonit, Wyoming (USA), Dichte: 2,75 g/cm³
$(Si_{3.96}\ Al_{0.04})\ (Al_{1.55}\ Fe^{3+}_{0.20}\ Fe^{2+}_{0.01}Mg_{0.24})\ O_{10}(OH)_2$ $Na_{0.30}$

Calcigel (früher Montigel), Ca-Bentonit, Deutschland, Dichte: 2,84 g/cm³
$(Si_{4.0})\ (Al_{1.36}\ Fe^{3+}_{0.31}\ Fe^{2+}_{0.01}Mg_{0.35})\ O_{10}(OH)_2$ $Ca,Mg\ /\ 2_{0.28}$

Tabelle 3-20: Zusammensetzung von Bentonit /MÜLLER-VONMOOS et al 1983/

Mineralname	Verbindung	SPV Volclay	Calcigel
		Masse [%]	Masse [%]
Montmorillonit	$(Al,Mg)_2\ [(OH)_2Si_4O_{10}]\ (Na,Ca)_x \cdot H_2O$	75	66
Quarz	SiO_2	15,2	8,3
Feldspat	Alkalifeldspäte und Plagioklase: $X[AlSi_3O_8]$ Die Position X wird bei Alkalifeldspäten von den Kationen K und Na eingenommen; bei den Plagioklasen von den Kationen Na und Ca - bei Ca folgende Formel: $Ca[Al_2Si_2O_8]$	5 - 8	2 – 4
Glimmer	$XY[(OH)_2AlSi_3O_{10}]$ Die Position von X kann von den Kationen Na und K eingenommen werden; die Position von Y kann im Wesentlichen von Fe^{2+}, Mg, Al und Li eingenommen werden.	< 1	12 – 15
Karbonat	$(Ca,Fe,Mg)CO_3$ und $Ca(Mg,Fe)[CO_3]_2$	1,4	3,8
Sonstige Minerale		2,4	5,5

Die mineralogische Zusammensetzung von aktiviertem Calciumbentonit (Ca-Bentonit, Schüttdichte: 0,75 t/m³) aus ausgesuchten bayrischen Rohtonen für den industriellen Einsatz ist in der Tabelle 3-21 dargestellt /SÜD CHEMIE/.

Tabelle 3-21: Zusammensetzung von Bentonit /SÜD CHEMIE/

Mineralname	Verbindung	Masse [%]
Montmorillonit	$(Al,Mg)_2[(OH)_2Si_4O_{10}](Na,Ca)_x \cdot H_2O$	70 – 75
Quarz	SiO_2	6 – 9
Feldspat	Alkalifeldspäte und Plagioklase: $X[AlSi_3O_8]$ Die Position X wird bei Alkalifeldspäten von den Kationen K und Na eingenommen; bei den Plagioklasen von den Kationen Na und Ca; bei Ca folgende Formel: $Ca[Al_2Si_2O_8]$	1 – 2
Glimmer	$XY[(OH)_2AlSi_3O_{10}]$ Die Position von X können die folgenden Kationen einnehmen: Na, K; die Position von Y: Fe^{2+}, Mg, Al und Li im Wesentlichen.	1 – 2
Kaolinit	$Al_2[(OH)_4Si_2O_5]$	1 – 2
Sonstige Minerale		5 - 10

In den betrachteten Zusammensetzungen des Bentonits wurden keine chemotoxischen Stoffe identifiziert. Es wird vorgeschlagen, Bentonit hinsichtlich des Nachweises zum Schutz des Grundwassers vor chemotoxischen Stoffen nicht weiter zu berücksichtigen.

Magnesiabinder

Magnesiabinder zählen zu den klassischen Baustoffen des Kalibergbaus. Im Auftrag des Bundesamtes für Strahlenschutz (BfS) entwickelte die K-UTEC GmbH Sondershausen einen Magnesiabinder mit der Rezepturbezeichnung 29.6 zum Verfüllen der Abbauhohlräume im Kalilager des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben (ERAM) /KÖSTER et al 2000/, /KRAUKE et al 1999/, /KRAUKE 2004/. Diese Rezeptur wurde an die Anforderungen des Bergwerkes Asse (höhere Gebirgstemperatur am Einsatzort) mit einem Wechsel im Steinsalzzuschlag angepasst (Rezepturbezeichnung 29.6 A2). Die mineralogische Zusammensetzung ist in der Tabelle 3-22 dargestellt.

Tabelle 3-22: Zusammensetzung des Magnesiabinders 29.6 A2 /KRAUKE 2004/

Mineralname	Verbindung	Masse [%]	Dichte [g/cm³]
Magnesiumoxid /Lehmann et al/	97,0 % MgO 1,8 % CaO 0,2 % Fe 0,1 % SO_3 1 % SiO_2 0,015 % Cl 0,04 % Mn 2 % Glühverlust	6,0	3,32
Halbbranntdolomit /WÜLFRATHER 1996/	39,0 % CaO 27,9 % MgO 1,1 % SiO_2 0,4 % Fe_2O_3 0,4 % Al_2O_3 31,5 % Glühverlust	11,3	2,86
Schiefermehl /VTS 2005/	58,1 % SiO_2 20,7 % Al_2O_3 7,4 % Fe_2O_3 0,95 % TiO_2 0,56 % CaO 1,43 % MgO 1,09 % Na_2O 3,16 % K_2O 0,11 % MnO 0,15 % P_2O_5 4,67 % Glühverlust 0,14 % S_{ges}	12,8	2,71
Steinsalzgrus	NaCl	45,2	2,17
Anmischlösung $MgCl_2 \cdot xH_2O$ /DEUSA 2004/	30,1 % $MgCl_2$ 2,4 % $MgSO_4$ 0,3 % NaCl 0,1 % KCl 0,1 % $CaSO_4$ 5 mg/l Fe	24,7	1,29

In dem betrachteten Magnesiabinder wurden Chlorid und Sulfat als chemotoxische Stoffe identifiziert (Cl-: ca. 60 Ma.-% des NaCl (Steinsalzgrus) und ca. 75 Ma.-% des $MgCl_2$ der Anmischlösung; SO_4^{2-}: ca 80 Ma.-% des $MgSO_4$ (Anmischlösung). Die übrigen Chlorid- und Sulfatanteile des Magnesiabinders sind gegenüber den o. g. Massenanteilen vernachlässigbar.

Da es sich bei Chlorid und Sulfat um Bestandteile des Salzstockes selbst handelt, wird vorgeschlagen, diese Stoffe hinsichtlich des Nachweises zum Schutz des Grundwassers vor chemotoxischen Stoffen nicht weiter zu berücksichtigen.

Salzbeton

Für die bergbauliche Gefahrenabwehrmaßnahme Zentralteil (bGZ) und die Stilllegung des ERAM wurden Salzbetonrezepturen untersucht, die in der Tabelle 3-23 dargestellt sind /Köster et al 2000/. Die Bestandteile der Rezeptur - Salzbeton M2 - sind Hochofenzement, Steinkohlenflugasche, Haldensalz (Mittelwerte von unveröffentlichten Analysen der Kali und Salz AG, Zielitz) und Leitungswasser.

Tabelle 3-23: Zusammensetzung von Salzbeton

Salzbeton	Verbindung	Dichte [g/cm³]	Masse [%]		
			M1	M2	M3
Hochofenzement /HOLCIM 2007/	SiO_2 Al_2O_3 Fe_2O_3 CaO MgO SO_3 Na_2O K_2O Na_2O Chlorid unlösl. Rückstände Glühverlust	3,05	22,4	16,4	9,9
Steinkohlenflugasche /BAUMINERAL 2003/	SiO_2 Al_2O_3 Fe_2O_3 CaO Amorphe Eisen- und Alumosilikate	2,29	0,0	16,4	23,0
Salzzuschlag	NaCl	2,16	45,6	53,7	54,5
Wasser	H_2O	1,0	32,0	13,4	12,6

In dem betrachteten Salzbeton wurde Chlorid (ca. 60 Ma.-% des Salzzuschlags NaCl) als chemotoxischer Stoff identifiziert.

Da es sich bei Chlorid um einen Hauptbestandteil des Salzstockes selbst handelt, wird vorgeschlagen, diesen Stoff hinsichtlich des Nachweises zum Schutz des Grundwassers vor chemotoxischen Stoffen nicht weiter zu berücksichtigen.

Baustoffgruppen aus Salzmineralien

Bei der Baustoffgruppe aus Salzmineralien basiert die Erhärtung auf der Reaktion von Evaporitmineralen ohne oder mit geringem Kristallwasseranteil, wie $MgSO_4$-wasserfrei oder Kieserit ($MgSO_4 \cdot H_2O$), zu kristallwasserreicheren Salzen. In der Tabelle 3-24 ist die (unveröffentlichte) Zusammensetzung der Referenzmischung dargestellt.

Tabelle 3-24: Zusammensetzung der Referenzmischung der Baustoffgruppe aus Salzmineralien

Mineralname	Verbindung	Masse [%]	Dichte [g/cm³]
ESTA Kieserit $MgSO_4 \cdot H_2O$ /K+S KALI 2002/	81,0 % $MgSO_4$ 5,0 % sonst. Sulfate (K_2SO_4, $CaSO_4$) 2,5 % Chloride (KCl, NaCl) 11,5 % Sonstiges (vorwiegend Kristallwasser) max. 3 % Cl	48,7	2,57
Gewerbesalz	NaCl	27,2	2,16
Mikrosilika	Amorphes SiO_2	6,0	2,8
Gesättigte NaCl-Lösung	55,5 mol 2 NaCl in 1.000 mol H_2O entsprechend 358 g NaCl in 1 l H_2O	18,1	1,20

In der betrachteten Baustoffgruppe aus Salzmineralien wurden Sulfat und Chlorid als chemotoxische Stoffe identifiziert (SO_4^{2-}: ca 80 Ma.-% des $MgSO_4$, und ca. 70 Ma.-% des K_2SO_4 und $CaSO_4$; Cl-: ca. 60 Ma.-% des NaCl).

Da es sich bei Sulfat und Chlorid um Bestandteile des Salzstockes selbst handelt, wird vorgeschlagen, diese Stoffe hinsichtlich des Nachweises zum Schutz des Grundwassers vor chemotoxischen Stoffen nicht weiter zu berücksichtigen.

Steinsalz-Anhydrit-Baustoffe

Gips-/Anhydritbinder sind anorganisch-mineralische Bindemittelsysteme, die auf der Bildung von Hydratphasen des Systems $CaSO_4$-H_2O basieren. Die Tabelle 3-25 enthält die chemische Zusammensetzung der Rezeptur nach /LANGEFELD 2005/. Die Masse der zuzugebenen Anmischlösung (gesättigte NaCl-Lösung) ist der Veröffentlichung nicht zu entnehmen.

Tabelle 3-25: Zusammensetzung der Steinsalz-Anhydrit-Baustoffe

Mineralname	Verbindung	Masse [%]	Dichte [g/cm³]
Calciumsulfat α-Halbhydrat	$CaSO_4$ x 0,5 H_2O	25	2,619
Anhydrit – löslicher	$CaSO_4$ III	50	2,58
Steinsalz	NaCl	25	2,16
Gesättigte NaCl-Lösung	55,5 mol 2 NaCl in 1.000 mol H_2O entsprechend 358 g NaCl in 1 l H_2O	Keine Angabe	1,20

In dem betrachteten Steinsalz-Anhydrit-Baustoff wurde Sulfat und Chlorid als chemotoxische Stoffe identifiziert (SO_4^{2-}: ca 70 Ma.-% des $CaSO_4$; Cl-: ca. 60 Ma.-% des NaCl).

Da es sich bei Sulfat und Chlorid um Bestandteile des Salzstockes selbst handelt, wird vorgeschlagen, diese Stoffe hinsichtlich des Nachweises zum Schutz des Grundwassers vor chemotoxischen Stoffen nicht weiter zu berücksichtigen.

Schotter

In einem Betriebsplan des K+S Werkes Bad Salzdetfurth ist von der Bergbehörde der von der Fa. Telge und Eppers gelieferte Diabas-Schotter von Steinbruch Huneberg (Mineralgemisch 32/80) zugelassen. In der Tabelle 3-26 ist die (unveröffentlichte) Zusammensetzung des Schotters dargestellt.

Tabelle 3-26: Zusammensetzung des Diabas-Schotters

Mineralname/Verbindung	Masse [%]
SiO_2	49,95
TiO_2	2,33
Al_2O_3	14,67
∑ Fe als Fe_2O_3	12,31
MnO	0,15
MgO	5,95
CaO	6,7
Na_2O	4,21
K_2O	0,91
P_2O_5	0,28
Zwischensumme	97,46
Minerale	
Plagioklas ($NaAlSi_3O_8$ – $CaAl_2Si_2O_8$)	45 – 55
Pyroxene ($XY(Z_2O_6)$) Der Chemismus der Pyroxene kann durch die allgemeine Formel $XY(Z_2O_6)$ ausgedrückt werden. Die Position von X können die folgenden Kationen einnehmen: Na, Ca, Fe^{2+}, Mg, Mn; die Position von Y: Fe^{2+}, Mg, Mn, Fe^{3+}, Al, Cr, Ti; die Position von Z: Si, Al im Wesentlichen.	20 – 30
Magnetit (Fe_3O_4)	5 – 10
Karbonat ($CaCO_3$)	< 1
Chlorit $(Fe,Mg,Al)_6(Si,Al)_4O_{10}(OH)_8$ + Titanit ($CaTiSiO_5$)	10 – 20
Phrenit ($Ca_2Al\,[(OH)_2AlSi_3O_{10}]$) + Serizit ($KAl_2\,[(OH)_2AlSi_3O_{10}]$) + Apatit ($Ca_5\,[(F,Cl,OH)\,(PO_4)_3]$)	< 1

Im Schotter wurden Fluorid und Chlorid (F- und Cl- als Bestandteile des Apatit) und Chrom (Cr als möglicher Bestandteil der Pyroxene) als chemotoxische Stoffe identifiziert. Da es sich bei Chlorid um einen wesentlichen Bestandteil des Salzstockes selbst handelt, wird vorgeschlagen, diesen Stoff hinsichtlich des Nachweises zum Schutz des Grundwassers vor chemotoxischen Stoffen nicht weiter zu berücksichtigen.

Bitumen und Asphalt

Für die Kurzzeitdichtung der Barriere am Schacht kommen nach heutigen Planungen auch Bitumen und Asphalt in Betracht.

Bitumen sind die höchst- und nichtsiedenden Komponenten einer mehrstufigen schonenden Destillation von Erdöl. Bitumen sind keine chemisch genau definierbaren Stoffe, sondern Vielstoffgemische aus Kohlenwasserstoffverbindungen (n-, iso- und cyclo-Alkanen, Aromaten und Naphthenaromaten und Asphaltenen), die sich von der allgemeinen Formel C_xH_y ableiten lassen, und Heteroverbindungen in Form von oleophilen Assoziationskolloiden.

Unter Asphalt ist ein natürlich vorkommendes oder technisch hergestelltes Gemisch aus Bitumen oder bitumenhaltigen Bindemitteln und Mineralstoffen sowie ggf. weiteren Zuschlägen und/oder Zusätzen zu verstehen. Die mineralischen Beimengungen, d. h. Füllstoffe wie z. B. Steinmehl, werden zur Verbesserung von z. B. mechanischen Eigenschaften hinzugegeben.

Da es sich bei Bitumen um einen Naturstoff handelt, und Bitumen oder bitumenhaltige Bindemittel zur Herstellung von Asphalt verwendet werden, wird vorgeschlagen, diese Stoffe hinsichtlich des Nachweises zum Schutz des Grundwassers vor chemotoxischen Stoffen nicht weiter zu berücksichtigen.

3.2.2.3 Inventar chemotoxischer Stoffe der Versatz- und Barrierematerialien

Mit den in den Kapiteln 3.2.2.1 und 3.2.2.2 vorliegenden Angaben zur chemischen Zusammensetzung wurden die chemotoxischen Stoffe der für den Verschluss des Endlagers nach heutigen Planungen vorgesehenen Versatz- und Barrierematerialien identifiziert und in der Tabelle 3-27 die anorganischen Parameter zusammenfassend dargestellt.

Im Wesentlichen wurden Chlorid und Sulfat als chemotoxische Stoffe identifiziert. Da es sich hierbei um Bestandteile des Salzstockes selbst handelt, wird vorgeschlagen, diese Stoffe hinsichtlich des Nachweises zum Schutz des Grundwassers vor chemotoxischen Stoffen nicht weiter zu berücksichtigen. Darüber hinaus wurden lediglich im Schotter die chemotoxischen Stoffe Fluorid und Chrom identifiziert.

Die betrachteten Versatz- und Barrierematerialien kommen meist in der Natur bzw. im natürlichen Untergrund vor. Dazu gehören im Wesentlichen Bentonit und Schotter. Weiterhin ist der Einsatz einer Baustoffgruppe aus Salzmineralien vorgesehen. Magnesiabinder, Salzbeton und Steinsalz-Anhydrit-Baustoffe sind chemisch stabil gegenüber NaCl-Lösung (Salzbeton) bzw. $MgCl_2$-Lösungen Magnesiabinder und Steinsalz-Anhydrit-Baustoffe). Sie gehören zu den klassischen Baustoffen des Kalibergbaus und für Salzbergwerke, die als Untertagedeponien für gefährliche Abfälle genutzt werden (z. B. Sondershausen, Zielitz). Auch bei Bitumen handelt es sich um einen Naturstoff und zur Herstellung von Asphalt wird Bitumen oder es werden bitumenhaltige Bindemittel verwendet.

Beim Magnesiabinder ist nach /VOIGT 1999/ die stabile 3-1-8-Phase in den Gleichgewichtslösungen M und Q des Quinären Systems thermodynamisch stabil. Die Bindemittelmatrix der Mörtel besteht aus Sorel-Phasen. In /FZK INE 2002/ wird die Beständigkeit von Sorel-Phasen wie folgt bewertet: „Baustoffe auf Basis von Sorel-Phasen sind in Q-Lösung stabil. In NaCl-Lösung wird eine endliche Menge des Baustoffs aufgelöst bis geochemisch stabile Bedingungen erreicht sind. Diese Mengen hängen von der zutretenden Lösungsmenge ab und sind quantifizierbar." Für die Konzeptplanung und Nachweisführung bei der Verfüllung von Strecken mit hohen Anforderungen ist für den Salzbeton M 2 bei Nachweis einer Anfangspermeabilität von $k \leq 10^{-18}$ m² eine hinreichende Langzeitstabilität /Dauerhaftigkeit der Abdichtungen für den erforderlichen Betrachtungszeitraum gegeben /GRS 2002a/. Hinsichtlich der Stabilität der Baustoffe auf Steinsalz-Anhydrit-Basis liegen Untersuchungen für Dammbauwerke im Salzgebirge /MISCHO 2002/ vor: „...Bei Belastung der Bohrlochverschlüsse mit Salzlaugen unterschiedlicher Zusammensetzung war zu erkennen, dass der Baustoffkörper beim Andrang ungesättigter Laugen angelöst wurde. Diese Anlösung des Baustoffkörpers konnte weder für gesättigte $MgCl_2$- noch für gesättigte NaCl-Laugen beobachtet werden...".

Bitumen sind chemisch sehr beständig. Durch die absolute Flüssigkeitsdichtheit, der weit einstellbaren Bandbreite von Viskosität und Dichte sowie der Unlöslichkeit in Wässern und salinaren Lösungen stellen Asphalte/Bitumen daher einen besonders im Bergbau gebräuchlichen Dichtbaustoff dar.

Aus den vorgenannten Gründen wird vorgeschlagen, diese Materialien nicht in die Betrachtungen zum Nachweis des Grundwasserschutzes vor chemotoxischen Stoffen einzubeziehen.

Tabelle 3-27: Chemotoxische Stoffe in Versatz- und Barrierematerialien

Anorganische Parameter	Salzgrus (z2HS)	Bentonit	Magnesia-binder	Salzbeton	Baustoff-gruppe aus Salzmineralien	Steinsalz-Anhydrid-Baustoffe	Schotter
	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
Antimon (Sb)							
Arsen (As)							
Barium (Ba)							
Blei (Pb)							
Bor (B)							
Cadmium (Cd)							
Chrom (Cr III)							(Spuren)
Kobalt (Co)							
Kupfer (Cu)							
Molybdän (Mo)							
Nickel (Ni)							
Quecksilber (Hg)							
Selen (Se)							
Thallium (Tl)							
Vanadium (V)							
Zink (Zn)							
Chlorid (Cl^-)	57%		33%	30%	4%	15%	< 0,01 %
Cyanid (CN^-)							
Fluorid (F^-)							< 0,01 %
Sulfat (SO_4^{2-})	3%		0%		33%	53%	
Σ chemotoxische Stoffe	60%		33%	30%	37%	68%	< 0,01 %

3.2.3 Chemische und chemotoxische Stoffe der Materialien für den Schachtausbau

Als Beispiel für den Schachtausbau wird das Außen- und Innenausbausystem der Gefrierschächte Gorleben 1 und 2 herangezogen /JESSBERGER 1995a/. Es werden folgende Bauteile genannt:

- Vorschachtausbau
- Stahlblechmantel
- Bitumen
- Betonformsteine
- Stahlringausbau mit Fundamenten
- Stahlbetonsäule
- Dichtsystem
- Spritzbeton
- Kies
- Fundamentinnenausbau
- Stützringe
- Betonsohle

In /JESSBERGER 1995b/ wird für den Ausbau der Schächte Gorleben 1 und 2 der Einsatz folgender Materialien/Werkstoffe beschrieben:

- Betonformsteine (Qualität B55)
- Tübbingring (Werkstoff GGG55)
- Doppel-T-Stahlringe (Werkstoff STE 690)
- Verfüll- und Hinterfüllmörtel

In /JESSBERGER 1995b/ wird für das Fundament-System Schacht Gorleben 1 beschrieben: Die Fundamente bestehen aus einer Stahlring-Stahlbeton-Verbundkonstruktion. An der Innenkante sind Ringe aus STE 460 angeordnet, an der Außenkante Ringe aus St 52 3. Der Betonkörper ist starkbewehrter B45. Die sonst üblichen Betonstützringe bestehen aus Doppel-T-Stützringen in N A XTRA 70. Fundament und Stützring sind an drei Stellen von einem Stahldichtmantel umgeben. Im einzelnen werden folgende Materialien/Werkstoffe genannt:

- Asphalt (Bitumenqualität B 200)
- Asphalt (Bitumenqualität B 80)
- Sandasphalt (Asphaltmastix)
- Gussasphalt
- Beton B45
- Spritzbeton B25
- Mörtelverfüllung
- Kies
- Mineralwolle
- Teflongleitschicht
- St 52-3
- STE 460
- N-A-XTRA 70 (Werkstoff Nr. 1.8964)

3.2.3.1 Inventar chemotoxischer Stoffe der Materialien für den Schachtausbau

Auf die Ermittlung der Anteile der chemotoxischen Stoffe in den jeweiligen Materialien/Werkstoffe für den Schachtausbau (Außen- und Innenausbausystem und Schachtfundament) wird an dieser Stelle verzichtet. Der nach Ende der Betriebszeit des Endlagers vorgesehene Schachtverschluss hat die Aufgabe, als hydraulische Barriere das Endlager von der Geo-/Biosphäre zu trennen.

Durch den Schachtverschluss, der unterhalb des Salzspiegels angelegt wird, wird die durch bauliche Aktivitäten verletzte Barrierewirkung des Wirtsgesteins wiederhergestellt. Es besteht die Möglichkeit, die oberhalb des Schachtverschlusses für den Schachtausbau verwendeten Bauteile aus Materialien/Werkstoffen mit chemotoxischen Stoffen, vor Verschluss zurückzubauen. Daher werden die Schachtausbaumaterialien nicht in die Betrachtungen zum Nachweis des Grundwassers vor chemotoxischen Stoffen einbezogen.

3.3 Schlussfolgerungen aus dem Grundwasserschutz vor chemotoxischen Stoffen bei der Endlagerung von schwach- und mittelradioaktiven Abfällen

Die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in einem zukünftigen HAW-Endlager im Wirtsgestein Salz zeichnet sich gegenüber Konzepten in anderen Wirtsgesteinen dadurch aus, dass im Salz der vollständige Einschluss als normale bzw. planmäßige Entwicklung anzusehen ist. Das Wirtsgestein Salz bietet dafür die erforderlichen Voraussetzungen, da es in den fluidfreien zentralen Partien eines Salzstockes keinen durchströmbaren Porenraum enthält, also dort hydraulisch dicht ist. In Ergänzung zur geologischen Hauptbarriere, die zwangsweise für die Einlagerung der Abfälle durchörtert werden muss, gewährleisten die technischen Barrieren, insbesondere Streckenverschlüsse und Schachtverschluss, den vollständigen Einschluss der Abfälle /KRONE 2007/. Der Nachweis des vollständigen Einschlusses umfasst den geologischen und den geotechnischen Sicherheitsnachweis. Beide Nachweise berücksichtigen neben der planmäßigen Entwicklung auch die gestörte Entwicklung des Endlagers. Bei der gestörten Entwicklung werden Ereignisse mit geringen Eintrittswahrscheinlichkeiten berücksichtigt, die die Vollständigkeit des Einschlusses einschränken könnten.

Im Hinblick auf den Nachweis des vollständigen Einschlusses stellt sich die Frage nach den Anforderungen an den Langzeitsicherheitsnachweis, speziell bezüglich des Grundwasserschutzes vor chemotoxischen Stoffen der radioaktiven Abfälle in einem HAW-Endlager im Salzgestein.

Die Möglichkeit, in einem zukünftigen HAW-Endlager im Wirtsgestein Salz den Nachweis des vollständigen Einschlusses zu führen, stellt einen wesentlichen Unterschied zu dem bereits existierenden Endlager für radioaktive Abfälle in Deutschland, dem Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben (ERAM), und dem geplanten und genehmigten Endlager in der Schachtanlage Konrad dar.

Beim ERAM handelt es sich um ein ehemaliges Gewinnungsbergwerk für Stein- und Kalisalze. Auf die Standsicherheit des Grubengebäudes und den Erhalt der geologischen Barriere wurde nur insoweit Rücksicht genommen, dass der auf wenige Jahr-zehnte ausgelegte Gewinnungsbetrieb möglichst ungestört und sicher erfolgen konnte. Im Vordergrund stand eine hohe Salzausbeute, die zwangsläufig zu entsprechend großen untertägigen Hohlräumen führte. Im Gegensatz zu einem Gewinnungsbergwerk stehen bei einem zukünftigen HAW-Endlager im Wirtsgestein Salz die Erhaltung einer ausreichend mächtigen und langzeitstabilen Salzbarriere, die Erstellung eines möglichst kleinen Hohlraumvolumens und die Begrenzung der Offenhaltungszeit durch frühzeitige Wiederverfüllung im Vordergrund. Dazu bestehen wegen der Nutzung eines unverritzten Salzstockes weitaus günstigere Voraussetzungen als bei einem Gewinnungsbergwerk. Die im Zusammenhang mit den wasserrechtlichen Aspekten im derzeit laufenden Planfeststellungsverfahren Stilllegung E-RAM bereits eingereichten Unterlagen wurden bislang der Öffentlichkeit nicht zugänglich gemacht (Plan zur Stilllegung des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben) und können daher nicht für dieses Vorhaben herangezogen werden.

Bei der Schachtanlage Konrad (ehemaliges Eisenerzbergwerk) wird konservativ angenommen, dass nach der Einstellung des Endlagerbetriebes das Grundwasser aus dem den Endlagerbereich umgebenden Gebirge in die Resthohlräume des verfüllten Grubengebäudes eindringt, aus dem Endlager als salzhaltiges Tiefengrundwasser austritt und in oberflächennahe Grundwasserhorizonte gelangt. Vor diesem Hintergrund ging die Planfeststellungsbehörde im Planfeststellungsverfahren Konrad bei der Endlagerung der radioaktiven Abfälle von einer erlaubnispflichtigen Grundwasserbenutzung i.S.d. § 3 Abs. 1 i.V.m. § 4 Abs. 2 Nr. 2, § 11, § 137 Abs. 2 NWG (§ 2 Abs. 1 i.V.m. § 3 Abs. 2 Nr. 2, § 34 Abs. 2 WHG) aus. Es war daher zu prüfen, ob der Erteilung der Erlaubnis der in § 137 Abs. 2 NWG (§ 34 Abs. 2 WHG) festgelegte Besorgnisgrundsatz entgegensteht. Dies wurde im Ergebnis verneint, weil das „Tiefengrundwasser wegen seiner geringen Menge in Verbindung mit seiner Tiefenlage, seiner hohen Mineralisierung und der weitgehenden Abgeschlossenheit schlechterdings keinen Ge- oder Verbrauchswert für Mensch, Tier und Pflanze besitzt“ und daher „... für sich allein betrachtet im vorliegenden Fall nicht in den Schutzbereich des § 137 Abs. 2 NWG (§ 34 Abs. 2 WHG) fällt.“

Das oberflächennahe Grundwasser unterfällt jedoch nach Ansicht der Planfeststellungsbehörde dem Schutzbereich des § 137 Abs. 2 NWG (§ 34 Abs. 2 WHG), gleichwohl sind durch das Endlager Konrad schädliche Verunreinigungen oder sonstige nachteilige Veränderungen der Grundwassereigenschaften nicht zu besorgen.

Dieses Ergebnis übertragen auf HAW-Endlager im Wirtsgestein Salz, bei denen der Nachweis des vollständigen Einschlusses geführt werden kann, bedeutet Folgendes:

1. Ausgehend von einer vergleichbaren Tiefenlage, hohen Mineralisierung und weitgehender Abgeschlossenheit des „Tiefengrundwassers“ bei einem HAW-Endlager im Salzgestein würde hier das Tiefengrundwasser wegen seines fehlenden Ge- und Verbrauchswertes für Menschen, Tiere und Pflanzen ebenfalls nicht in den Schutzbereich des § 34 Abs. 2 WHG fallen.

2. Selbst wenn das Tiefengrundwasser zum Schutzbereich zählen würde, würde keine Besorgnis einer schädlichen Verunreinigung des Grundwassers oder sonstigen nachteiligen Veränderung seiner Eigenschaften bestehen, da durch den Nachweis des vollständigen Einschlusses ein Übertritt von Stoffen in das Grundwasser bzw. deren chemische Lösung durch das Grundwasser ausgeschlossen ist.

3. In der Konsequenz könnten auch keine vom Tiefengrundwasser aufgenommenen Stoffe in das oberflächennahe Grundwasser gelangen, so dass auch keine schädlichen Verunreinigungen des oberflächennahen Grundwassers oder eine sonstige nachteilige Veränderung zu besorgen ist.

4. Vor diesem Hintergrund des vollständigen Einschlusses im Unterschied zum Endlager Konrad wäre darüber hinaus auch keine Erlaubnispflicht für eine Benutzung des Grundwassers (weder des Tiefengrundwassers noch des oberflächennahen Grundwassers) gegeben, weil die Endlagerung nicht geeignet wäre, dauernd oder in einem nicht nur unerheblichen Ausmaß schädliche Veränderungen der physikalischen, chemischen oder biologischen Beschaffenheit des Wassers herbeizuführen.

3.4 Übertragbarkeit der Anforderungen des radiologischen Langzeitsicherheitsnachweises

In diesem Kapitel erfolgt die Analyse der rechtlichen Situation in der Hinsicht, ob Ausführungsbestimmungen (z. B. Verwaltungsvorschriften oder Richtlinien) erlassen worden sind, in denen die Vorgehensweise zum Nachweis der Einhaltung des Schutzziels festgelegt ist, und ob es für die Bewertung von Beeinträchtigungen des Grundwassers insbesondere im Hinblick auf die Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen unmittelbar geltende, verbindliche Grenz- oder Richtwerte gibt. Abschließend wird die Übertragbarkeit der Anforderungen an den radiologischen Langzeitsicherheitsnachweis auf den Nachweis der Langzeitsicherheit für chemotoxische Stoffe in einem HAW-Endlager im Salzgestein bewertet.

Generell sieht das Konzept für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in der Bundesrepublik Deutschland einen dauerhaften Verbleib der radioaktiven Abfälle in tiefen geologischen Schichten vor. Daher steht neben dem sicheren Einlagerungsbetrieb eines Endlagers der Nachweis der Langzeitsicherheit im Mittelpunkt der Planfeststellungsvoraussetzungen für ein Endlager gemäß § 9b Abs. 4 AtG /ATG 2006/ i.V.m. § 7 Abs. 2 AtG (konkret die erforderliche Schadensvorsorge nach dem Stand von Wissenschaft und Technik gem. § 7 Abs. 2 Nr. 3 AtG).

Mit dem Langzeitsicherheitsnachweis wird die Einhaltung der erforderlichen Schadensvorsorge nach dem Stand von Wissenschaft und Technik nachgewiesen, um Risiken und Gefahren für die während der Nachbetriebsphase des Endlagers lebenden Personen sowie deren Umwelt auszuschließen. Hierfür bedarf es eines sicheren Abschlusses des Endlagers von der Biosphäre. Das Risiko- und Gefahrenpotential rührt von einer eventuellen Ausbreitung der aus den eingelagerten Abfällen stammenden Stoffe mit den ggf. in die

Einlagerungsbereiche eindringenden Wässer in das umgebene Gestein und durch die Geosphäre bis in das von Menschen, Tieren und Pflanzen nutzbare Grundwasser (Biosphäre) her. Daher dient der Nachweis des sicheren Abschlusses von der Biosphäre insbesondere dem Schutz des Grundwassers und der damit in Berührung kommenden Menschen und Umwelt.

Konkrete Anforderungen an die Erstellung, den Inhalt und den Umfang des Langzeitsicherheitsnachweises für Endlager sind weder im Atomgesetz noch in anderen Gesetzen mit Relevanz für das Planfeststellungsverfahren für Endlager für radioaktive Abfälle geregelt. Solche finden sich im untergesetzlichen Regelwerk, den sog. „Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk“ aus dem Jahr 1983 (GMBl. 1983, S. 220). Die Gesellschaft für Reaktorsicherheit (GRS) hat einen Vorschlag zur Überarbeitung der Sicherheitskriterien im Auftrag des Bundesumweltministeriums vorgelegt /GRS 2002b/. Sowohl die Sicherheitskriterien von 1983 als auch der Vorschlag zu deren Weiterentwicklung beziehen sich ausschließlich auf die radio-logischen Schutzziele und Anforderungen, die das im Atomgesetz enthaltene Gebot der atomrechtlichen Schadensvorsorge konkretisieren. Demgegenüber enthalten diese Regelwerke keine Vorgaben für den Nachweis des Grundwasserschutzes für chemo-toxische Stoffe. Derartige Vorgaben in den Sicherheitskriterien würden sich auch verbieten, weil es sich hierbei um ein untergesetzliches Regelwerk handelt, welches keine ranghöheren Vorschriften zum Grundwasserschutz aus Gesetzen und Verordnungen rechtsverbindlich überregeln darf. Es könnten lediglich Ausführungsbestimmungen zur Konkretisierung der gesetzlichen Regelungen getroffen werden, die sich wegen der Zielsetzung der Sicherheitskriterien nur auf die atomrechtliche Schadensvorsorge nicht aber auf die chemotoxischen Stoffe beziehen dürfen.

Kernbrennstoffe, sonstige radioaktive Stoffe und somit auch radioaktive Abfälle unterfallen ausdrücklich nicht dem Anwendungsbereich des konventionellen Abfallrechts (siehe § 2 Abs. 2 Nr. 3 KrW-/AbfG /KRW-/ABFG 2006/), sondern unterliegen den speziellen Vorschriften des Atomrechts. Chemotoxische Stoffe unterfallen hingegen den Regelungen des konventionellen Abfallrechts. Die Anforderungen an den Langzeitsicherheitsnachweis für radioaktive Abfälle aus den Sicherheitskriterien leiten sich aus der atomgesetzlich festgelegten Schadensvorsorge nach dem Stand von Wissenschaft und Technik in § 7 Abs. 2 Nr. 3 AtG ab, die ein sehr weitgehendes Schutzerfordernis darstellt. Diese Schadensvorsorge findet über § 9b Abs. 4 S. 1 AtG Anwendung auf Endlager für radioaktive Abfälle und ist spezifisch auf das Gefährdungspotential der Radionuklide ausgerichtet. Demgegenüber bemessen sich die Anforderungen an eine Abfallbeseitigung nach konventionellem Abfallrecht nach dem Stand der Technik (siehe § 12 Abs. 2 Krw-/AbfG und Ziff. 1 TA Abfall /TA ABFALL 1991/). Insofern sieht das Recht bei der Vorsorge vor Schäden durch Radioaktivität/Strahlung ein anderes Maß vor als bei der Vorsorge vor Gefahren durch chemotoxische Stoffe. Aufgrund dieser Unterschiedlichkeit besteht keine Notwendigkeit zur Übertragung der Anforderungen an den radiologischen Langzeitsicherheitsnachweis auf den Nachweis der Langzeitsicherheit für chemotoxische Stoffe in einem HAW-Endlager im Salzgestein.

3.5 Übertragbarkeit der Anforderungen des Langzeitsicherheitsnachweises für Untertagedeponien

In diesem Kapitel wird die derzeitige rechtliche Situation bei der Lagerung/Ablagerung gefährlicher Abfälle (bisherige Bezeichnung: besonders überwachungsbedürftige Abfälle) in Untertagedeponien (UTDs) beschrieben. Abschließend wird die Möglichkeit, die Anforderungen an den Langzeitsicherheitsnachweis für Untertagedeponien auf den Nachweis der Langzeitsicherheit für chemotoxische Stoffe in einem HAW-Endlager im Salzgestein zu übertragen, bewertet.

Anforderungen für die Ablagerung chemotoxischer Stoffe außerhalb von Endlagern für radioaktive Abfälle finden sich u. a. in der DepV /DEPV 2002a/. Gemäß § 3 Abs. 5 DepV hat der Betreiber einer UTD bei der Errichtung die Hinweise zum Langzeitsicherheitsnachweis nach Anhang 2 der Verordnung zu beachten. In § 6 Abs. 2 der DepV sind die Voraussetzungen für eine Ablagerung von gefährlichen Abfällen u. a. in einer UTD festgelegt. Danach muss eine solche Deponie alle Anforderungen für die Deponieklasse IV im Salzgestein erfüllen. Damit müssen auch die Hinweise zum Langzeitsicherheitsnachweis im Anhang 2 (Hinweise zur Durchführung des Langzeitsicherheitsnachweises im Rahmen der standortbezogenen Sicherheitsbeurteilung für Bergwerke im Salzgestein) der Verordnung beachtet werden. Laut der Verordnungsbegründung zu diesem Anhang 2 ist „das Prinzip des dauerhaften Abschlusses die zentrale Anforderung der Deponieverordnung an UTD im Salzgestein. Nachzuweisen ist dieser dauerhafte Abschluss insbesondere über den Langzeitsicherheitsnachweis im Rahmen der standortbezogenen Sicherheitsbeurteilung.“ /DEPV 2002b/

„Das Prinzip des dauerhaften Abschlusses im Salzgestein ist die zentrale Anforderung dafür, dass das Schadstoffpotential der Abfälle langfristig nicht in die Biosphäre gelangen kann. Eine Beschränkung des Schadstoffpotentials ist wegen dieses dauerhaften Abschlusses von der Biosphäre sachlich nicht gerechtfertigt.“ /DEPV 2002c/

Mit dieser Begründung sind im Anhang 2 Ziff. 2.1 der DepV Regelungen zum Langzeitsicherheitsnachweis von UTD für gefährliche Abfälle in Salzgestein enthalten. Danach ist „..der Langzeitsicherheitsnachweis für das Gesamtsystem “Abfall/Untertagebauwerk/Gebirgskörper“ unter Berücksichtigung planmäßiger und außer-planmäßiger (hypothetischer) Ereignisabläufe zu führen, wobei den standortspezifischen Gegebenheiten Rechnung zu tragen ist. Der Langzeitsicherheitsnachweis als übergreifender und zusammenfassender Einzelnachweis im Rahmen der nach Nummer 10.3 der TA Abfall geforderten standortbezogenen Sicherheitsbeurteilung basiert im Wesentlichen auf den Ergebnissen der beiden Einzelnachweise,

- dem geotechnischen Standsicherheitsnachweis und
- dem Sicherheitsnachweis für die Betriebsphase.

Insbesondere dem geotechnischen Standsicherheitsnachweis kommt zur Beurteilung der langfristigen Wirksamkeit und Integrität der Barriere Salz eine entscheidende Bedeutung zu. Ist der vollständige Einschluss durch den geotechnischen Standsicherheitsnachweis belegt,

kann auf Modellrechnungen zu nicht planbaren Ereignisabläufen verzichtet werden, sofern plausibel dargelegt wird, ob und wie sich nicht planbare Ereignisse auswirken werden. Hierzu wird in der Regel eine verbalargumentative Betrachtung als ausreichend angesehen, die jedoch standortbezogen zu verifizieren ist. Ist der vollständige Einschluss im geotechnischen Standsicherheitsnachweis belegt, kann auch beim Langzeitsicherheitsnachweis auf Modellrechnungen zur Schadstoffausbreitung im Deckgebirge verzichtet werden.“ /DEPV 2002d/

Für die UTDs Herfa-Neurode und Zielitz wurde der Nachweis des vollständigen Einschlusses für einen Zeitraum von 10.000 Jahren geführt, und es konnte eine Beeinflussung des Grundwassers ausgeschlossen werden. Dieser Maßstab ist damit auch Grundlage für die Bewertung der chemotoxischen Stoffe in einem HAW-Endlager im Salzgestein.

Durch den dauerhaften und vollständigen Einschluss/Abschluss von der Biosphäre wird dem Umwelt- und insbesondere dem Grundwasserschutz Rechnung getragen, weil dadurch eine Vermischung mit dem Grundwasser bzw. ein Eintrag der chemotoxischen Stoffe in das Grundwasser ausgeschlossen ist. Aufgrund des Nachweises einer dauerhaften Trennung der chemotoxischen Stoffe vom Grundwasser und von der sonstigen Biosphäre können sich gesetzliche Änderungen bzw. Verschärfungen zum Umwelt- bzw. Grundwasserschutz nicht auf die Gültigkeit dieses Langzeitsicherheitsnachweises, speziell bezüglich des Grundwasserschutzes, auswirken.

In § 7 Abs. 2 DepV sind für die Ablagerung in einer UTD im Salzgestein nicht zugelassene Abfälle aufgeführt. Dazu gehören u. a. flüssige, explosionsgefährliche, hoch entzündliche, leicht entzündliche, infektiöse oder geruchsbelästigende Abfälle. Anhang 3 DepV enthält Zuordnungskriterien, die für die Ablagerung auf oberirdischen Deponien und in UTDs in anderen Gesteinen als Salzgestein Beschränkungen darstellen. Diese Zuordnungskriterien beziehen sich auf die Festigkeit, den organischen Anteil des Trockenrückstandes der Originalsubstanz, sonstige Feststoffkriterien, Eluatkriterien und den Brennwert der Abfälle. In diesem Zusammenhang werden u. a. folgende Parameter genannt: Total Organic Carbon (TOC), alkylierte Monoaromaten: Benzol, Toluol, Ethylbenzol, Xylol (BTEX), Polychlorierte Biphenyle (PCB), Mineralölkohlenwasserstoffe, Polycyclische Aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK), Dissolved Organic Carbon (DOC), Gesamtphenol, Arsen, Blei, Cadmium, Chrom VI, Kupfer, Nickel, Quecksilber, Zink, Fluorid, Ammoniumstickstoff, Cyanid (leicht freisetzbar), Adsorbierbare Organische Halogenverbindungen (AOX), Barium, Chrom gesamt, Molybdän, Antimon, Selen, Chlorid und Sulfat. Für UTDs im Salzgestein gelten diese Beschränkungen nicht.

Die Anforderungen an den Langzeitsicherheitsnachweis für UTDs aus der DepV sind auf den Langzeitsicherheitsnachweis für chemotoxische Stoffe in einem HAW-Endlager im Salzgestein analog anwendbar. Hintergrund dafür ist, dass es sich in Bezug auf die chemotoxischen Stoffe um gleichartige Sachverhalte handelt. Der Langzeitsicherheitsnachweis dient dem Schutz von Menschen und deren Umwelt vor den potentiellen Gefahren der chemotoxischen Stoffe. Dabei müssen die gleichen Schutzmaßstäbe gelten, denn es macht keinen Unterschied, ob die potentiellen Gefahren der chemotoxischen Stoffe aus einer UTD oder der gleichen Stoffe in einem untertägigen Endlager herrühren. Anders gesagt, die chemotoxischen Abfallstoffe und deren Ablagerung unterfallen dem konventionellen Abfallrecht,

gleichgültig, ob sie in einer UTD oder in einem Endlager für radioaktive Abfallstoffe abgelagert werden. Demgegenüber finden auf die Ablagerung/Endlagerung radioaktiver Abfallstoffe die Anforderungen des Atomrechts, insbesondere der atomrechtlichen Schadensvorsorge Anwendung. Durch die Endlagerung der chemotoxischen Abfallstoffe zusammen mit radioaktiven Abfallstoffen in einem Endlager erfolgt keine Ausdehnung der Anforderungen der atomrechtlichen Schadensvorsorge auf die chemotoxischen Stoffe, weil sich diese Schadensvorsorge ausschließlich auf radiologische Schutzziele und Anforderungen bezieht, die für chemotoxische Stoffe gerade keine Relevanz haben (vgl. Kapitel 3.4).

Somit ist eine analoge Anwendung der Anforderungen an den konventionellen Langzeitsicherheitsnachweis für UTDs auf den Nachweis der Langzeitsicherheit zum Schutz des Grundwassers vor chemotoxischen Stoffen in einem HAW-Endlager im Salzgestein gerechtfertigt. Gelingt der Nachweis des vollständigen Einschlusses und damit des dauerhaften Abschlusses der chemotoxischen Abfälle von der Biosphäre im Sinne der DepV im Endlager, so besteht keine Veranlassung, trotzdem Modellrechnungen zur Schadstoffausbreitung im Deckgebirge durchzuführen, da eine derartige Ausbreitung durch den nachgewiesenen Einschluss der Stoffe ausgeschlossen ist. Insofern haben hier auch die Grenz- und Prüfwerte der GrWV für chemotoxische Stoffe keine Bedeutung.

3.6 Langzeitsicherheitsnachweis für chemotoxische Stoffe - Vorschlag für ein Nachweiskonzept

Bei einem zukünftigen HAW-Endlager im Wirtsgestein Salz wird von einer ungestörten Entwicklung ausgegangen. Im Rahmen des radiologischen Langzeitsicherheitsnachweises erfolgt für diese wahrscheinliche Entwicklung der Nachweis des vollständigen Einschlusses und damit der Nachweis der Einhaltung der radiologischen Schutzziele. Dafür werden in /ISIBEL 2008b/ funktionale Anforderungen an die einzelnen technischen Barrieren (Behälter, Versatz sowie Bohrloch-, Strecken- und Schachtverschlüsse) abgeleitet, das Design bzw. die Zusammensetzung der einzelnen technischen Barrieren dargestellt und die jeweilige Barriere und ihre Komponenten beschrieben. Mit dem Nachweis des vollständigen Einschlusses ist auch der Nachweis erbracht, dass es zu keinem Eintrag von chemotoxischen Stoffen in das Grundwasser kommen kann und dem Grundwasserschutz ist genüge getan.

Aufgrund der atomgesetzlich festgelegten Schadensvorsorge nach dem Stand von Wissenschaft und Technik wird im Rahmen des radiologischen Langzeitsicherheitsnachweises auch für gering wahrscheinliche Entwicklungen des Endlagers, d. h. gestörte Entwicklungen, der Nachweis der Einhaltung der radiologischen Schutzziele geführt. Zur Ermittlung und Bewertung der potentiellen Strahlenexposition gering wahrscheinlicher Freisetzungsszenarien werden Modellrechnungen zu Grunde gelegt.

Für UTDs wird aufgrund der abfallrechtlich festgelegten Schadensvorsorge nach dem Stand der Technik der Langzeitsicherheitsnachweis für planbare Ereignisabläufe geführt. Wenn (in einer verbalargumentativen Betrachtung) plausibel dargelegt wird, ob und wie sich nicht planbare Ereignisse auswirken werden, kann auf Modellrechnungen dazu verzichtet werden

(vgl. Anhang 2 Ziff. 2.1 DepV). Dieser Maßstab gilt in gleicher Weise für den Langzeitsicherheitsnachweis für chemotoxische Stoffe in einem HAW-Endlager im Salzgestein.

Ungeachtet dieser rechtlichen Vorgaben für den Langzeitsicherheitsnachweis für chemotoxische Stoffe werden von verschiedenen Fachkreisen auch Ansätze vertreten, die darüber hinaus Modellrechnungen zur Ausbreitung von chemotoxischen Stoffen bei nicht planbaren Ereignissen vorsehen. Wie bereits in Kapitel 3.4 und Kapitel 3.5 ausführlich erläutert, finden solche Rechnungen keine Grundlage in den gesetzlichen Bestimmungen für chemotoxische Stoffe und sind deshalb abzulehnen.

Über die gesetzlichen Anforderungen der DepV hinausgehenden Maßnahmen zum Langzeitsicherheitsnachweis für chemotoxische Stoffe, beispielweise in Form eines What-If-Szenarios, lassen sich nur insoweit rechtfertigen als dass sie der Untermauerung der verbal-argumentativen Betrachtung und damit der Vertrauensbildung dienen, ohne jedoch die gesetzlichen Anforderungen an den Langzeitsicherheitsnachweis auszudehnen.

3.7 Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes

Inventar chemotoxischer Stoffe eines HAW-Endlagers im Wirtsgestein Salz

Im Rahmen des Vorhabens ISIBEL wurden die Vorgaben der Grundwasserverordnung dargestellt und die Ableitung der Grenz- und Prüfwerte für chemotoxische Stoffe als Bewertungskriterien von Grundwasserverunreinigungen beschrieben. Es wurden die chemotoxischen Stoffe der wärmeentwickelnden radioaktiven Abfälle (Abfall-, Konditionierungs- und Behältermaterialien) und der Versatz- und Barrierematerialien aus Verfüll- und Verschlussmaßnahmen identifiziert. Darüber hinaus wurden Materialien für den Schachtausbau beschrieben.

Für die Ermittlung des Inventars chemotoxischer Stoffe der wärmeentwickelnden radioaktiven Abfälle wurden die entsprechenden Angaben dem Bericht /ISIBEL 2008a/ entnommen. Nach einer ausführlichen Beschreibung der Werkstoffe/Materialien (Kapitel 3.2.1.1) und deren chemische Zusammensetzung (Kapitel 3.2.1.2) erfolgt die Darstellung des Inventars der chemotoxischen Stoffe der wärmeentwickelnden radioaktiven Abfälle (Kapitel 3.2.1.3). In der Tabelle 3-17 sind die identifizierten chemotoxischen Stoffe und deren Masse je Abfallgebinde dargestellt. Der Übersicht kann der jeweilige Anteil der Behältermaterialien und der konditionierten Abfälle entnommen werden.

Es lässt sich feststellen, dass für den Hauptteil der Abfallgebinde eine gute Datenbasis sowohl für die Behältermaterialien als auch für die konditionierten Abfälle vorliegt. Dazu zählen HAW-Kokillen, CSD-B und CSD-C, POLLUX-Behälter und Brennstabkokillen sowie CASTOR AVR/THTR. Wünschenswert wären allerdings detaillierte Massenangaben der Behältermaterialien von POLLUX-Behältern und CASTOR AVR/THTR, die sich derzeit auf die wesentlichen Komponenten beschränken. Darüber hinaus fehlen bei CASTOR MTR 2 Angaben zur Aufteilung der Behältermasse auf Behältergrundkörper sowie Primär- und Sekundärdeckel und bei CASTOR KNK die Angabe der Behältermasse. Für die Brennstäbe

des KNK sind die Angaben zur chemischen Zusammensetzung unvollständig und konnten daher nicht berücksichtigt werden.

Für den Versatz von Bohrlöchern, Strecken und anderen untertägigen Hohlräumen und den Verschluss der Bohrlöcher ist nach heutigen Planungen ausschließlich Salzgrus vorgesehen. Für den Verschluss des Endlagers gegenüber der Geo-/Biosphäre sind zwei Barrieren vorgesehen. Dafür kommen nach heutigen Planungen folgende Materialien in Betracht: Bentonit, Magnesiabinder, Salzbeton, Baustoffgruppen aus Salzmineralien, Steinsalz-Anhydrit-Baustoffe und Schotter. In Kapitel 3.2.2.1 erfolgt eine ausführliche Beschreibung der Versatz- und Barrierematerialien und die Darstellung ihrer chemischen Zusammensetzung einschließlich der jeweiligen chemotoxischen Stoffe. In der Tabelle 3-27 sind die identifizierten chemotoxischen Stoffe in den Versatz- und Barrierematerialien dargestellt.

Es lässt sich feststellen, dass für die betrachteten Versatz- und Barrierematerialien eine gute Datenbasis vorliegt. Im Versatzmaterial (Salzgrus) wurden Chlorid (Cl-) und Sulfat (SO_4^{2-}) als chemotoxische Stoffe identifiziert. Da es sich beim Versatzmaterial um Material des Salzstockes selbst handelt, wurde vorgeschlagen, Salzgrus hinsichtlich des Nachweises zum Schutz des Grundwassers vor chemotoxischen Stoffen nicht weiter zu berücksichtigen. Auch für die Barrierematerialien wurden im Wesentlichen Chlorid und Sulfat als chemotoxische Stoffe identifiziert (s. Kapitel 3.2.2.2). Darüber hinaus wurden im Schotter Fluorid (F-) und Chrom (Cr) als chemotoxische Stoffe identifiziert. Da es sich bei Chlorid und Sulfat wie beim Versatzmaterial ebenfalls um Bestandteile des Salzstockes selbst handelt, wird vorgeschlagen, diese Stoffe hinsichtlich des Nachweises zum Schutz des Grundwassers vor chemotoxischen Stoffen nicht weiter zu berücksichtigen.

Die betrachteten Materialien/Werkstoffe kommen meist in der Natur bzw. im natürlichen Untergrund vor. Dazu gehören im Wesentlichen Bentonit und Schotter. Weiterhin ist der Einsatz einer Baustoffgruppe aus Salzmineralien vorgesehen. Magnesiabinder, Salzbeton und Steinsalz-Anhydrit-Baustoffe sind chemisch stabil gegenüber NaCl-Lösung (Salzbeton) bzw. $MgCl_2$-Lösungen (Magnesiabinder und Steinsalz-Anhydrit-Baustoffe). Sie gehören zu den klassischen Baustoffen des Kalibergbaus und für Salzbergwerke, die als Untertagedeponien für gefährliche Abfälle genutzt werden (z. B. Sondershausen, Zielitz). Auch dies spricht dafür, die Barrierematerialien nicht in die Betrachtungen zum Nachweis des Grundwasserschutzes vor chemotoxischen Stoffen einzubeziehen.

In Kapitel 3.2.2.3 werden die Materialien für den Schachtausbau beschrieben. Auf die Ermittlung der Anteile der chemotoxischen Stoffe in den jeweiligen Materialien/Werkstoffen für den Schachtausbau (Außen- und Innenausbausystem und Schachtfundament) wurde verzichtet, da der nach Ende der Betriebszeit des Endlagers vorgesehene Schachtverschluss als hydraulische Barriere das Endlager von der Geo-/Biosphäre trennt. Weiterhin besteht die Möglichkeit, die oberhalb des Schachtverschlusses für den Schachtausbau verwendeten Bauteile aus Materialien/Werkstoffen mit chemotoxischen Stoffen, vor Verschluss zurückzubauen. Daher werden die Schachtausbaumaterialien nicht in die Betrachtungen zum Nachweis des Grundwassers vor chemotoxischen Stoffen einbezogen.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass für die endzulagernden wärmeentwickelnden radioaktiven Abfälle und die betrachteten Versatz- und Barrierematerialien eine sehr gute Datenbasis vorliegt und hinsichtlich der Ermittlung des Inventars chemo-toxischer Stoffe kein FuE-Bedarf besteht. Die noch fehlenden Daten/Informationen können durch Recherche ermittelt werden und die damit bereits vorliegende Datenbasis ergänzen/vervollständigen.

Langzeitsicherheitsnachweis für chemotoxische Stoffe

Für UTDs wird aufgrund der abfallrechtlich festgelegten Schadensvorsorge nach dem Stand der Technik der Langzeitsicherheitsnachweis für planbare Ereignisabläufe geführt. Wenn (in einer verbalargumentativen Betrachtung) plausibel dargelegt wird, ob und wie sich nicht planbare Ereignisse auswirken werden, kann auf Modellrechnungen dazu verzichtet werden (vgl. Anhang 2 Ziff. 2.1 DepV). Damit ist dem Besorgnisgrundsatz zum Grundwasserschutz genüge getan und dieser Maßstab kann in gleicher Weise für den Langzeitsicherheitsnachweis für chemotoxische Stoffe in einem HAW-Endlager im Salzgestein herangezogen werden.

Falls seitens des Antragstellers über die gesetzlichen Anforderungen der DepV hinaus ein What-If-Szenario betrachtet wird, um die Robustheit des Endlagersystems hinsichtlich des Grundwasserschutzes vor chemotoxischen Stoffen zu veranschaulichen, lässt sich daraus kein gesonderter FuE-Bedarf ableiten.

Tabellenverzeichnis

		Seite
Tabelle 2-1:	Kennwerte für elastisches Materialverhalten	12
Tabelle 2-2:	Kennwerte für viskoplastisches Materialverhalten	13
Tabelle 3-1:	Vergleich der Geringfügigkeitsschwellenwerte und Grenzwerte nach TrWV für anorganische Parameter	21
Tabelle 3-2:	Vergleich der Geringfügigkeitsschwellenwerte und Grenzwerte nach TrWV für organische Parameter	22
Tabelle 3-3:	Geringfügigkeitsschwellenwerte für Pflanzenschutzmittel und Biozidprodukte sowie sprengstofftypische Verbindungen	23
Tabelle 3-4:	Werkstoffe und Massen einer HAW-Kokille, CSD-B und CSD-C (unbeladen)	25
Tabelle 3-5:	Werkstoffe und Massen eines POLLUX-Behälters (unbeladen)	26
Tabelle 3-6:	Werkstoffe und Massen einer Brennstabkokille (unbeladen)	27
Tabelle 3-7:	Werkstoffe und Massen eines CASTOR AVR/THTR (unbeladen)	27
Tabelle 3-8:	Werkstoffe und Massen eines CASTOR MTR 2 (unbeladen)	28
Tabelle 3-9:	Werkstoffe und Massen eines CASTOR KNK (unbeladen)	29
Tabelle 3-10:	Material und Massen der Abfallprodukte einer HAW-Kokille	30
Tabelle 3-11:	Werkstoffe und Massen der Hülsen und Strukturteile eines DWR-BE	31
Tabelle 3-12:	Werkstoffe und Massen der Hülsen und Strukturteile eines DWR-BE	31
Tabelle 3-13:	Werkstoffe und Massen einer BE-Kugel des THTR-300	32
Tabelle 3-14:	Werkstoffe und Massen eines Brennelementes des FRM II	32
Tabelle 3-15:	Werkstoffe und Massen der Brennstäbe des KNK II – mittleres Inventar eines CASTOR KNK	33
Tabelle 3-16:	Chemische Zusammensetzung des Borsilikatglases (HAW-Kokille, CSD-B)	36
Tabelle 3-17:	Massen chemotoxischer Stoffe je Abfallgebinde getrennt nach den Anteilen aus den Behältermaterialien und den Anteilen der konditionierten radioaktiven Abfälle	41
Tabelle 3-18:	Zusammensetzung des Staßfurt Hauptsalzes (z2HS)	42
Tabelle 3-19:	Zusammensetzung des Steinsalzes in der unteren Leine-Folge (z3LS und z3OS)	42
Tabelle 3-20:	Zusammensetzung von Bentonit /MÜLLER-VONMOOS et al 1983/	43
Tabelle 3-21:	Zusammensetzung von Bentonit /SÜD CHEMIE/	44
Tabelle 3-22:	Zusammensetzung des Magnesiabinders 29.6 A2 /KRAUKE 2004/	45

Tabelle 3-23: Zusammensetzung von Salzbeton 46

Tabelle 3-24: Zusammensetzung der Referenzmischung der Baustoffgruppe aus Salzmineralien 47

Tabelle 3-25: Zusammensetzung der Steinsalz-Anhydrit-Baustoffe 47

Tabelle 3-26: Zusammensetzung des Diabas-Schotters 48

Tabelle 3-27: Chemotoxische Stoffe in Versatz- und Barrierematerialien 51

Abbildungsverzeichnis

Seite

Abbildung 2-1: Grenzwerte für Verformungen bei Ausbildung einer Setzungsmulde /SCHNEIDER 1994/ 9

Abkürzungsverzeichnis

Abs.	Absatz
AOX	Adsorbierbare Organische Halogenverbindungen
AtG	Atomgesetz
AVR	Atomversuchsreaktor, Jülich
BE	Brennelement
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
BTEX	Alkylierte Monoaromate: Benzol, Toluol, Ethylbenzol, Xylol
CSD-B	Colis de déchets boue
CSD-C	Colis de déchets compactés
DBE	Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe mbH
DepV	Deponieverordnung
DOC	Dissolved Organic Carbon
DWR	Druckwasserreaktor
ERAM	Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben
FRM	Forschungsreaktor München
GFS	Geringfügigkeitsschwelle
GrWV	Grundwasserverordnung
GWRL	Grundwasserrichtlinie
HAW	High Active Waste
HAW	High Active Waste
i.S.d.	Im Sinne der
i.V.m	In Verbindung mit
KNK	Kompakte Natriumgekühlte Kernreaktoranlage, Karlsruhe
KrW-/AbfG	Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz
LAWA	Länderarbeitsgemeinschaft Wasser
LHKW	leichtflüchtige halogenierte Kohlenwasserstoffe
Ma.-%	Massenprozent
MPA	Maximum Permissible Addition
MPC	Maximum Permissible Concentration
MTBE	Methyl-tert.-butylether
OH	Otto-Hahn
PAK	Polycyclische Aromatische Kohlenwasserstoffe
PCB	Polychlorierte Biphenyle
PETN	Nitropenta
PNEC	Predicted No Effect Concentration
PSMBP	Pflanzenschutzmittel und Biozidprodukte
StrlSchV	Strahlenschutzverordnung
TA Abfall	Technische Anleitung zur ... Ablagerung von besonders überwachungsbedürftigen Abfällen
THTR	Thorium-Hochtemperaturreaktor, Hamm-Uentrop
TOC	Total Organic Carbon
TrWV	Trinkwasserverordnung
UTD	Untertagedeponie

UVP	Umweltverträglichkeitsprüfung
WHG	Wasserhaushaltsgesetz
WRRL	Wasserrahmenrichtlinie

Literaturverzeichnis

/ANSYS 1999/	ANSYS: ANSYS Manuals, USA, 1999
/ATG 2006/	Gesetz über die friedliche Verwendung der Kernenergie und den Schutz gegen ihre Gefahren (Atomgesetz - AtG) in der Fassung der Bekanntmachung v. 15.07.1985 (BGBl. I S. 1565) zuletzt geändert durch Verordnung v. 31.10.2006 (BGBl. I S. 2407)
/BAUMINERAL 2003/	BauMineral GmbH, vorläufiges Sicherheitsdatenblatt, Steinkohlenflugasche, Produktname: MICROSIT, 03.03.2003
/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), 24. März 2005
/BfS 2005b/	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
/BGR 1988/	BGR, Thermomechanische Berechnungen zum Endlager im Salzstock Gorleben (Berechnungsmodell 1988), Hannover, Mai 1988
/BGR 2005/	BGR, F + E Endlagerung, 9Y3213060000 - Geologisches Referenzmodell für einen HAW-Endlagerstandort im Salz – Technischer Bericht, Beitrag für das Projekt ISIBEL, Hannover, Dezember 2005
/BJERRUM 1973/	Bjerrum, Problems of Soil Mechanics and Construction on Soft Clays and Structurally Instable Soils, General Report, Session 4, Proc. 8th ICSMFE, 3, S. 111 – 159, 1973
/BOSSARD 2003/	Bossard: Rost- und säurebeständige Verbindungselemente; 2003
/CZYCHOWSKI et al 1997/	Czychowski/Reinhardt: WHG-Kommentar, § 34, Rn. 2, 8. Aufl., München 2003, siehe auch Entwurf GrWV mit Begründung: BR-Drucksache 108/97, S. 1; Anlage 1, S. 4
/CZYCHOWSKI et al 2003/	Czychowski/Reinhardt: WHG-Kommentar, § 19g, Rn. 18, 8. Aufl., München 2003
/DBE 1998/	DBE, Aktualisierung des Konzepts "Endlager Gorleben" – Abschlußbericht, Peine, 1998

/DBE 1999/ Ein neuer Ansatz zur Bewertung der Wirksamkeit von Barrieren im Endlager (02 E 9087); Grundlagen der Bewertung von Hydroxylapatit als chemische Barriere gegenüber Schwermetallen; Abschlussbericht, Technischer Anhang 3; DBE, Juli 1999

/DBE 2006/ DBE-Reisebericht vom 12.05.2006, Besprechung am 11.05.2006 bei GNS Essen, Datenblatt mit Angaben zu Werkstoffen und Massen eines DWR-BE

/DEPV 2002a/ Verordnung über Deponien und Langzeitlager (Deponieverordnung – DepV) v. 24.07.2002 BGBl. I S. 2807, zuletzt geändert durch Verordnung v. 13.12.2006 (BGBl. I S. 2860)

/DEPV 2002b/ Entwurf DepV mit Begründung: BR-Drucksache 231/02, S. 120

/DEPV 2002c/ Entwurf DepV mit Begründung: BR-Drucksache 231/02, S. 85

/DEPV 2002d/ Anhang 2 Ziff. 2.1 DepV

/DEUSA 2004/ Deusa International GmbH, Sicherheitsdatenblatt Magnesiumchloridlösung 30 %, 02/2004

/DIN 1995/ DIN V ENV 1991-1, Eurocode 1, Grundlagen der Tragwerksplanung und Einwirkungen auf Tragwerke, Teil 1: Grundlagen der Tragwerksplanung, Deutsche Fassung ENV 1991-1:1994, Dezember 1995

/DIN 2002/ DIN EN 1990, Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung; Teil 1: Deutsche Fassung EN 1990: 2002, Oktober 2002

/DOLDER 2006/ http://www.dolder-ing.ch/wissen/Werkstoffe/Werkstoffe-Staehle.htm, Stand: März 2007

/EIKMANN 1999/ Eikmann Th., Heinrich U., Heinzow B., Konietzka R.: Gefährdungsabschätzung von Umweltschadstoffen ergänzbares Handbuch toxikologischer Basisdaten und ihre Bewertung, Erich Schmidt Verlag, Berlin, 1. Erg. Lfg. 12/99

/ESPI 2006/ Electronic Space Products International (ESPI): Alloy Composition; www.espi-metals.com, 11.09.2006

/FZK INE 2002/ Stellungnahme zur Beständigkeit von Baustoffen auf der Basis von Sorel-Phasen und Salzbeton gegenüber den im Grubengebäude des FB Asse auftretenden Lösungen, Karlsruhe 2002

/GNB 1998a/ Gesellschaft für Nuklear-Behälter, Beschreibung des Transport-, Lager- und Endlagerbehälters POLLUX 10 DWR-/ 30 SWR-BE, GNB B 063/96, September 1998, Revision 1 (S. 14, 15, 18, 19, 20)

/GNB 1998b/ Gesellschaft für Nuklear-Behälter, Beschreibung der Brennstabkokille BSK 3, GNB B 043/98, September 1998, Revision 0 (S. 14)

/GNS 2004/ Gesellschaft für Nuklear-Service, CASTOR MTR 2-Behälter, http://www.gns-nuklearservice.de/generator.aspx/templateId=renderPrint/doc=17470/lang=de/id=10650.html, 16.02.2004

/GRS 2002a/ GRS, Endlager Morsleben – Zementkorrosion, Abschlussbericht von GRS und IBMB, Projekt Morsleben PSP-Element 9M 232200-11/12, GRS-A-3034, April 2002

/GRS 2002b/ siehe hierzu GRS Jahresbericht 2002/2003, Kapitel 4.4, S. 95, veröffentlicht auf: http://www.grs.de/publikationen/publikationen_view.html?pe_id =148&pcon_list=41;

SSK „Gemeinsame Stellungnahme der RSK und SSK betreffend BMU-Fragen zur Fortschreibung der Endlager-Sicherheitskriterien“, Kapitel 2, S. 3 und Kapitel 4, S. 6, verabschiedet auf der 182. Sitzung der Strahlenschutzkommission am 04. - 06.12.2002, veröffentlicht auf: http://www.ssk.de/ werke/kurzinfo/2002/ssk0221.htm

/GrWV 1997/ Verordnung zur Umsetzung der Richtlinie 80/68/EWG des Rates vom 17.12.1979 über den Schutz des Grundwassers gegen Verschmutzung durch bestimmte gefährliche Stoffe (Grundwasserverordnung – GrWV) v. 18.03.1997 (BGBl. I S. 542)

/GrWV 1997/ Verordnung zur Umsetzung der Richtlinie 80/68/EWG des Rates vom 17.12.1979 über den Schutz des Grundwassers gegen Verschmutzung durch bestimmte gefährliche Stoffe (Grundwasserverordnung – GrWV) v. 18.03.1997 (BGBl. I S. 542)

/GWRL 2006/ Richtlinie 2006/118/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 12. Dezember 2006 zum Schutz des Grundwassers vor Verschmutzung und Verschlechterung, Grundwasserrichtlinie

/HEEMANN et al 2003/ Heemann, U., Sarfeld, W., Faust, B.

3D-calculation of dilatancy and permeability. European Comission CLUSTER Conference on the Impact of EDZ on the Performance of Radioactive Waste Geological Repositories, Nov. 3 –5, 2003 Luxembourg

/HOLCIM 2007/ Holcim Deutschland AG, Produktdaten, Hochofenzement DIN 1164 – CEM III/B 32,5N – LH/HS/NA, Januar 2007

/HÜBNER 2000/ Hübner, R.: Das Bestrahlungsverhalten des austenitischen Stahls DIN 1.4970; Forschungszentrum Karlsruhe GmbH – Wissenschaftliche Berichte FZKA 6372; 2000

/INTERATOM 1986/ INTERATOM Technischer Bericht, KNK II, 3. Kern: Auslegungsbericht für Treiberzonenelemente NU 401 bis 407 (ohne Moderator) und NW 401 bis 421 (mit Moderator), Oktober 1986, S. 22, 24

/IRIS/ IRIS, http://www.epa.gov/iris/

/ISIBEL 2008a/ Konzeptionelle Endlagerplanung und Zusammenstellung des endzulagernden Inventars. DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine, April 2008

/ISIBEL 2008b/ Nachweiskonzept zur Integrität der einschlusswirksamen technischen Barrieren. DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine, April 2008

/ITASCA 1997/ Itasca Consultants: FLAC Handbücher, Minnesota, USA, 1997

/JESSBERGER 1995a/ N. Schuster, H. Preuß, Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe mbH (DBE), Peine, Die Qualitätssicherung beim Einbringen des Außen- und Innenausbaus der Schächte Gorleben 1 und 2 – Planung (S. 236), veröffentlicht in H. L. Jessberger, Gefrierschächte Gorleben, 1995 Balkema

/JESSBERGER 1995b/ Th. Oellers, R. Buddensiek, Planung und Bemessung der Gefrierschächte Gorleben 1 und 2 (S. 45 – 51, 59), veröffentlicht in H. L. Jessberger, Gefrierschächte Gorleben, 1995 Balkema

/K+S KALI 2002/ K+S Kali GmbH, Kassel, Technisches Merkblatt, ESTS Kieserit ‚fein', 14.10.2002

/KÖSTER et al 2000/ Köster, R.; Preuss, J.; Maiwald-Rietmann, H.-U. & Skrzyppek, J.; On Backfill Materials for an Underground Repository. Proc. DisTec2000, Sept. 4-6, 2000, section 7, pp. 640-645

/KRAUKE 2004/ Krauke, W.: Eigenschaften und Anwendungsgebiete basischer Magnesiasalze als Dichtelemente im Srömungsbarrieren- und Dammbau. PtWT+E, Fachgespräch „Verschlussmaßnahmen für untertägige Entsorgungseinrichtungen - Kenntnisstand, offene Fragen, FuE-Bedarf", Vortragsunterlagen und Materialien, Braunschweig, 25./26.03.2004, S. 305-332

/KRAUKE et al 1999/ Krauke, W., Klimpke, A. & Laske, D. m Verfüllen von Abbauhohlräumen im Kalilager mit Magnesiabinder. Abschlussbericht zum Projekt-Nr. 9 M 664120-31, Kali Umwelttechnik GmbH Sondershausen, 1999

/KRONE 2007/ J. Krone, N. Müller-Hoeppe, W. Brewitz, J. Mönig, M. Wallner, J.R. Weber: Developing an Advanced Safety Concept for a HLW Repository in Rock Salt, NEA-Symposium “Safety Case for the Deep Disposal of Radioactive Waste: Where do we stand?”, 23-25 January 2007, Paris

/KRW-/ABFG 2006/ Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Beseitigung von Abfällen (Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz – Krw-/AbfG) v. 27.09.1994 (BGBl. I 2705), zuletzt geändert durch Verordnung v. 09.12.2006 (BGBl. I S. 2819)

/KTA 1988/ KTA 3401.1: Reaktorsicherheitsbehälter aus Stahl, Teil 1: Werkstoffe und Erzeugnisformen; Fassung September 1988, BAnz Nr. 37a vom 22. Februar 1989

/LANGEFELD 2005/ Entwicklung von Steinsalz-Anhydrit-Baustoffen für Dammbauwerke und ihre Erprobung in einem Großversuch. Fachgespräch „Verschlussmaßnahmen für untertägige Entsorgungseinrichtungen – CARLA – Streckenverschlüsse im Carnallitit und weitere FuE-Aktivitäten“, Teutschenthal, 13./14.10.2005

/LAWA 1997/ Zielvorgaben zum Schutz oberirdischer Binnengewässer, Band I: Teil I: Konzeption zur Ableitung von Zielvorgaben zum Schutz oberirdischer Binnengewässer vor gefährlichen Stoffen, Teil II: Erprobung der Zielvorgaben von 28 gefährlichen Wasserinhaltsstoffen in Fließgewässern. Länderarbeitsgemeinschaft Wasser, Berlin 1997

/LAWA 1998a/ Länderarbeitsgemeinschaft Wasser: Zielvorgaben zum Schutz oberirdischer Binnengewässer, Band II: Ableitung und Erprobung von Zielvorgaben zum Schutz oberirdischer Binnengewässer für die Schwermetalle Blei, Cadmium, Chrom, Kupfer, Nickel, Quecksilber und Zink. Berlin 1998

/LAWA 1998b/ Länderarbeitsgemeinschaft Wasser: Zielvorgaben zum Schutz oberirdischer Binnengewässer, Band III: Teil I: Konzeption zur Ableitung von Zielvorgaben zum Schutz oberirdischer Binnengewässer vor gefährlichen Stoffen, Teil II: Erprobung der Zielvorgaben für Wirkstoffe in Bioziden und Pflanzenbehandlungsmitteln für trinkwasserrelevante oberirdische Binnengewässer. Berlin 1998

/LAWA 2003/ „Musterverordnung zur Umsetzung der Anhänge II und V der Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik“, Länderarbeitsgemeinschaft Wasser, Entwurf Stand 2.7.2003

/LAWA 2004/ Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA): Ableitung von Geringfügigkeitsschwellenwerten für das Grundwasser, Düsseldorf, Dezember 2004

/LEHMANN et al/ Lehmann&Voss&Co., Produktdatenblatt Magnesiumoxid Type F 4-200, 2420 5011-2930

/MELIS 2007/ Melis gieterijen, Tilburg, NL: Werkstof-Gegevensblad: G-AlMg3Si

/METALLOGRAPH 2006/ Informationen über Stahl für Metallografen; www.metallograf.de, Stand 28.02.2006

/MISCHO 2002/ Untersuchungen an Baustoffen auf Steinsalz-Anhydrit-Basis für Dammbauwerke im Salzgebirge. Shaker Verlag GmbH, Aachen, ISBN 3-8322-0594-2, 232 S.

/MÜLLER-SCHMITZ 1985/ MÜLLER-SCHMITZ, S. (1985): Mineralogisch-petrographische und geochemische Untersuchungen an Salzgesteinen der Staßfurt-, Leine- und Aller-Serie im Salzstock Gorleben (Niedersachsen, B.R. Deutschland). Inaugural-Dissertation zur Erlangung der Doktorwürde der Naturwissenschaftlich-Mathematischen Gesamtfakultät der Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg.

/MÜLLER-VONMOOS et al 1983/ Müller-Vonmoos, M. & G. Kahr (1983): Mineralogische Untersuchungen von Wyoming Bentonit MX80 und Montigel, NAGRA NTB 83-12, Wettingen, Schweiz

/RAR 2002/ Risk Assessment Report gem. EEC 793/93 und EC 1488/94, recherchiert 2002 über European Chemicals Bureau, ggf. ergänzt durch Informationen des Umweltbundesamtes Berlin

/RIVM 1997/ Crommentuijn, T; Polder, MD; van de Plassche, EJ : Maximum permissible concentrations and negligible concentrations for metals, taking background concentrations into account. Report No. 601 501 001, National Institute of Public Health and the Environment, NL-Bilthoven, October 1997

/RIVM 1999/ J. de Bruijn, T. Crommentuijn, K. van Leeuwen, E. van de Plassche : Environmental risk limits in The Netherlands. National Institute of Public Health and Environment, RIVM-Report 601 640 001, NL-Bilthoven 1999

/SALZGITTER 2006/ Stahlsorten; www.salzgitter-flachstahl.de; Sept. 2006-09-13

/SALZGITTER 2007/ http://www.salzgitter-stahlhandel.de/Produkte/Rohre/Werkstoffe_Eigenschaften, Stand: März 2007

/SCHNEIDER 1994/ Schneider, K.-J., Bautabellen für Ingenieure mit europäischen und nationalen Vorschriften, Werner Verlag, 11. Auflage 1994

/SCHREIER 2007/ http://www.schreier-metall.de/de/lief_09.htm, Stand: März 2007

/SPHÄROGUSS 2006/ Sphäroguss / Chemische Zusammensetzung; www.sphaeroguss.de, Sept. 2006

/STAHL 2007/ http://members.fortunecity.de/neba1/Stahl/Stahl.htm, Stand: März 2007

/STRLSCHV 2005/ Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen (Strahlenschutzverordnung – StrlSchV) v. 20.07.2001 (BGBl. I 1714, ber. 2002 I S. 1459) zuletzt geändert durch Gesetz v. 01.09.2005 (BGBl. I S. 2653)

/SÜD CHEMIE/ Auszug Produktinformation Tixoton TE

/TA ABFALL 1991/ Zweite allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz – TA Abfall v. 12.03.1991 (GMBl. S. 139) zuletzt geändert durch Berichtigung v. 21.03.1991 (GMBl. S. 469)

/TGD 2003/ Technical Guidance Document on Risk Assessment for New and Existing Substances, siehe EC 1994 (http://ecb.jrc.it/)

/THERMAX 2002/ ThyssenKrupp Nirosta GmbH: Hitzebeständige Stähle THERMAX, Ausgabe 2, Stand 07/2002

/TrWV 2001/ Verordnung zur Novellierung der Trinkwasserverordnung vom 21. Mai 2001. Bundesgesetzblatt Teil I Nr. 24, 959 ff

/UBA 1999/ Berechnung von Prüfwerten zur Bewertung von Altlasten: Ableitung und Berechnung von Prüfwerten der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung für den Wirkungspfad Boden - Mensch aufgrund der Bekanntmachung der Ableitungsmethoden und -maßstäbe im Bundesanzeiger Nr. 161a vom 28. August 1999. Hrsg.: Umweltbundesamt, bearbeitet von Bachmann G, Oltmanns J, Konietzka R, Schneider K., Erich Schmidt Verlag, Berlin

/UVP 1990/ Verordnung über die Umweltverträglichkeitsprüfung bergbaulicher Vorhaben (UVP-V Bergbau) vom 13. Juli 1990

/VOIGT 1999/ Thermodynamische Modellrechnungen zur Nachweisführung der Langzeitstabilität der Verfüllstoffe. In: Endlager Morsleben – Verfüllen untertägiger Bohrungen und Abbauhohlräume mit Magnesiabinder. BfS, 9X/1141/BE/J/0001/02, Stand 03.09.1999.

/VTS 2005/ Vereinigte Thüringischen Schiefergruben GmbH & Co.KG, chemische Analyse der TU Bergakademie Freiberg von Schiefermehl, 24.01.2005

/WHG 2005/ Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts (Wasserhaushaltsgesetz – WHG) v. 19.08.2002 (BGBl. I S. 3245) zuletzt geändert durch Gesetz v. 25.06.2005 (BGBl. I S. 1746)

/WHG 2005/ Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts (Wasserhaushaltsgesetz – WHG) v. 19.08.2002 (BGBl. I S. 3245) zuletzt geändert durch Gesetz v. 25.06.2005 (BGBl. I S. 1746)

/WHO/ Environmental Health Criteria monographs, http://www.who.int/peh-emf/publications/monographs/en/

/WRRL 2000/ Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik, Wasserrahmenrichtlinie

/WTI 2006/ Wissenschaftlich Technische Ingenieurberatung, CASTOR KNK, Zusammenfassende Darstellung der Behälterinventare, WTI/98/05, Revision 1, Januar 2006 (S. 4, 5, 7, Anhang 1-4)

/WÜLFRATHER 1996/ Wülfrather, Harzer Dolomitwerke GmbH, Produktdatenblatt Halbbranntdolomit, Ausgabe 04/96