

Forschungsvorhaben

Chemisch-toxische Stoffe in einem Endlager für hochradioaktive Abfälle

Kurztitel: CHEMOTOX

APII –Inventar chemotoxischer Stoffe

Peine, 31.08.2009

Autorin dieses Berichts:

Marion Tholen (DBE TECHNOLOGY GmbH)

Federführung des Arbeitspakets AP II:

DBE TECHNOLOGY GmbH

Koordinator des Forschungsprojekts:

Öko-Institut e.V.

Kooperationspartner des Verbundprojekts:

DBE TECHNOLOGY GmbH

GRS mbH

Öko-Institut e.V.

DBE TECHNOLOGY GmbH
Eschenstrasse 55
D-31224 Peine
Telefon +49 (0) 5171 43-1520
Fax +49 (0) 5171 43-1506

APII –Inventar chemotoxischer Stoffe

Das diesem Bericht zugrunde liegende FE-Vorhaben wurde im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie unter den Kennzeichen 02E10387, 02E10397 und 02E10407 durchgeführt. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Vorgaben aus wasserrechtlichen Vorschriften und Bewertungskriterien für Grundwasserverunreinigungen.....	6
3	Inventar chemischer und chemotoxischer Stoffe eines HAW-Endlagers im Wirtsgestein Salz	14
3.1	Chemische und chemotoxische Stoffe der wärmeentwickelnden radioaktiven Abfälle	14
3.1.1	Werkstoffe und Materialien der wärmeentwickelnden radioaktiven Abfälle.....	14
3.1.2	Chemische Zusammensetzung der Werkstoffe und Materialien der wärmeentwickelnden radioaktiven Abfälle	24
3.1.3	Inventar chemotoxischer Stoffe der wärmeentwickelnden radioaktiven Abfälle.....	28
3.2	Chemische und chemotoxische Stoffe der Versatz- und Barrierematerialien aus Verfüll- und Verschlussmaßnahmen.....	32
3.2.1	Chemische und chemotoxische Stoffe der Versatzmaterialien.....	32
3.2.2	Chemische und chemotoxische Stoffe der Barrierematerialien	33
3.2.3	Inventar chemotoxischer Stoffe der Versatz- und Barrierematerialien.....	40
3.3	Chemische und chemotoxische Stoffe der Materialien für den Schachtausbau.....	43
3.3.1	Inventar chemotoxischer Stoffe der Materialien für den Schachtausbau	44
3.4	Auslegung des Grubengebäudes	44
4	Inventar chemischer und chemotoxischer Stoffe eines HAW-Endlagers im Wirtsgestein Ton	47
4.1	Chemische und chemotoxische Stoffe der wärmeentwickelnden radioaktiven Abfälle	47
4.2	Chemische und chemotoxische Stoffe der Versatz- und Barrierematerialien aus Verfüll- und Verschlussmaßnahmen.....	48
4.2.1	Chemische und chemotoxische Stoffe der Versatzmaterialien.....	48
4.2.2	Chemische und chemotoxische Stoffe der Barrierematerialien	49
4.3	Chemische und chemotoxische Stoffe der Materialien für den Schachtausbau.....	57
4.4	Auslegung des Grubengebäudes	57
	Literaturverzeichnis	60

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.1	Brennstabkokille (BSK), links, HAW-Kokille, Mitte, (CSD-V, entspricht auch CSD B) und CSD-C, rechts	4
Abb. 1.2	POLLUX-Behälter (POLLUX-10, Endlagerung im Wirtsgestein Salz)	4
Abb. 1.3	POLLUX-Behälter (POLLUX-3, Endlagerung im Wirtsgestein Ton).....	5
Abb. 1.4	CASTOR AVR/THTR, links, (entspricht im wesentlichen auch CASTOR KNK) und CASTOR MTR 2, rechts	5
Abb. 3.1	Ausschnitt eines Grubengebäudes für die Streckenlagerung von POLLUX-Behältern (POLLUX-10) und die Bohrlochlagerung von HAW-Kokillen und CSD-C im Wirtsgestein Salz	45
Abb. 3.2	Ausschnitt eines Grubengebäude für die Bohrlochlagerung von Brennstabkokillen (BSK 3), HAW-Kokillen und CSD-C im Wirtsgestein Salz	45
Abb. 4.1	Grubengebäudezuschnitt für die Streckenlagerung von POLLUX-Behältern (POLLUX-3) im Wirtsgestein Ton	58
Abb. 4.2	Grubengebäudezuschnitt für die Bohrlochlagerung von Brennstabkokillen (BSK 3) im Wirtsgestein Ton	59

Tabellenverzeichnis

Tab. 1.1	Mengengerüst der endzulagernden wärmeentwickelnden radioaktiven Abfälle	2
Tab. 2.1	Geringfügigkeitsschwellenwerte der LAWA für anorganische Parameter	12
Tab. 3.1	Werkstoffe und Massen einer HAW-Kokille, CSD-B und CSD-C (unbeladen)	14
Tab. 3.2	Werkstoffe und Massen eines POLLUX-Behälters (unbeladen)	15
Tab. 3.3	Werkstoffe und Massen einer Brennstabkokille (unbeladen)	16
Tab. 3.4	Werkstoffe und Massen eines CASTOR AVR/THTR (unbeladen)	17
Tab. 3.5	Werkstoffe und Massen eines CASTOR MTR 2 (unbeladen)	18
Tab. 3.6	Werkstoffe und Massen eines CASTOR KNK (unbeladen)	19
Tab. 3.7	Material und Massen der Abfallprodukte einer HAW-Kokille	20
Tab. 3.8	Werkstoffe und Massen der Hülsen und Strukturteile eines DWR-BE	21
Tab. 3.9	Werkstoffe und Massen der Brennstäbe eines DWR-BE	21
Tab. 3.10	Anorganische Stoffe in der Brennstoffmatrix eines DWR-BE	22
Tab. 3.11	Zusammensetzung einer BE-Kugel des THTR-300	22
Tab. 3.12	Werkstoffe und Massen eines Brennelementes des FRM II	23
Tab. 3.13	Werkstoffe und Massen der Brennstäbe des KNK II – mittleres Inventar eines CASTOR KNK	23
Tab. 3.14	Chemische Zusammensetzung des Borsilikatglases (HAW-Kokille, CSD-B)	26
Tab. 3.15	Massen chemotoxischer Stoffe je Abfallgebinde (HAW-Kokille, CSD-B und CSD-C) getrennt nach den Anteilen aus den Behältermaterialien und den Anteilen der konditionierten radioaktiven Abfälle	30
Tab. 3.16	Massen chemotoxischer Stoffe je Abfallgebinde (POLLUX-Behälter, Brennstabkokille und CASTOR AVR/THTR) getrennt nach den Anteilen aus den Behältermaterialien und den Anteilen der konditionierten radioaktiven Abfälle	31
Tab. 3.17	Zusammensetzung des Staßfurt Hauptsalzes (z2HS)	32
Tab. 3.18	Zusammensetzung des Steinsalzes in der unteren Leine-Folge (z3LS und z3OS)	32
Tab. 3.19	Zusammensetzung von Bentonit <MÜLLER-VONMOOS et al 1983>	33
Tab. 3.20	Zusammensetzung von Bentonit <SÜD CHEMIE>	34
Tab. 3.21	Spurenelemente in Bentonit <S&B 2007>	34
Tab. 3.22	Zusammensetzung des Magnesiabinders 29.6 A2 <KRAUKE 2004>	35
Tab. 3.23:	Zusammensetzung von Salzbeton	36
Tab. 3.24	Spurenelemente in Zement	36

Tab. 3.25	Zusammensetzung der Referenzmischung der Baustoffgruppe aus Salzmineralien.....	37
Tab. 3.26:	Zusammensetzung der Steinsalz-Anhydrit-Baustoffe	38
Tab. 3.27	Zusammensetzung des Diabas-Schotters	38
Tab. 3.28	Anteile chemotoxischer Stoffe in Versatz- und Barrierematerialien in einem HAW-Endlager im Wirtsgestein Salz	42
Tab. 4.1:	Zusammensetzung von Ausbruchmaterial im Bereich der Schachtanlage Konrad.....	48
Tab. 4.2	Zusammensetzung des Betons für den belgischen Supercontainer.....	50
Tab. 4.3	Zusammensetzung von CEM I Portlandzement.....	50
Tab. 4.4	Bandbreiten der Bestandteile verschiedener CEM III Hochofenzemente	51
Tab. 4.5	Zusammensetzung von Hüttensand (als Bestandteil von CEM III Hochofenzement).....	51
Tab. 4.6	Zusammensetzung von Traß	52
Tab. 4.7	Zusammensetzung von Steinkohlenflugasche <BENEDIX 2003>.....	52
Tab. 4.8	von Steinkohlenflugasche <HERBERT et al 2000>	53
Tab. 4.9	Zusammensetzung von Spritzbeton.....	54
Tab. 4.10	Anteile chemotoxischer Stoffe in Versatz- und Barrierematerialien in einem HAW-Endlager im Wirtsgestein Ton.....	56

1 Einleitung

In diesem Bericht wird das Inventar chemotoxischer Stoffe der endzulagernden hochradioaktiven und wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen (im Folgenden nur als wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle bezeichnet) und weiterer im Zusammenhang mit der Endlagerung in das Endlager einzubringender Stoffe (Versatz- und Barrierematerialien) beschrieben.

Im Folgenden wird ein Überblick über die verschiedenen Arten wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle und die für ihre Endlagerung vorgesehenen Endlagerbehälter gegeben. Im anschließenden Kapitel 2 werden die Vorgaben aus wasserrechtlichen Vorschriften dargestellt. Auf dieser Grundlage werden die als potentiell grundwassergefährdend bzw. chemotoxisch zu betrachtenden Stoffe identifiziert und es wird die Ableitung von Grenz- und Prüfwerten als Bewertungskriterien von Grundwasserunreinigungen beschrieben. Anschließend wird das Inventar chemischer und chemotoxischer Stoffe eines HAW-Endlagers im Wirtsgestein Salz (Kapitel 3) und im Ton (Kapitel 4) dargestellt. Dabei wird insbesondere eine Aussage in der Hinsicht getroffen, inwiefern das Inventar an chemischen und chemotoxischen Stoffe in einem HAW-Endlager im Salz und im Ton identisch ist bzw. worin es sich unterscheidet. In diesem Zusammenhang wird auch die Auslegung des Grubengebäudes für die verschiedenen Einlagerungskonzepte in den Wirtsgesteinen Salz und Ton beschrieben.

In diesem Vorhaben wird die im Rahmen des vom BMWi geförderten Vorhabens ISIBEL ermittelte Menge an endzulagernden wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen herangezogen <DBE 2008a>. Das Mengengerüst der radioaktiven Abfälle basiert auf dem Entwurf des Nationalen Entsorgungsplans <BMU 2003>, dem die Beendigung der Nutzung der Kernenergie gemäß der Konsensvereinbarung zwischen der Bundesregierung und den Energieversorgungsunternehmen vom 14.06.2000 zu Grunde liegt; dieses Mengengerüst ist durch Anfragen bei den Hauptablieferungspflichtigen aktualisiert worden und berücksichtigt ausgediente Brennelemente aus deutschen Leistungsreaktoren (Druck- und Siedewasserreaktoren) und Forschungsreaktoren (AVR, THTR, VKTA, FRM II, KNK) sowie Abfälle aus der Wiederaufarbeitung ausgedienter Brennelemente (WA-Abfälle) in Frankreich, England und der Verglasungseinrichtung des Forschungszentrums Karlsruhe (VEK).

Zu den WA-Abfällen zählen HAW-Kokillen (CSD-V) mit verglasten hochradioaktiven Spaltprodukten und Feedklärschlämmen, verglaste mittelradioaktive Deko- und Spülwässer (CSD-B) und kompaktierte mittelradioaktive Brennelementhülsen, Strukturteile und Technologieabfälle (CSD-C). Das Mengengerüst berücksichtigt die bei der VEK anfallenden HAW-Kokillen und die aus England und Frankreich zurückzuführenden WA-Abfälle. Von BN-GS (British Nuclear Group Sellafield, ehemals BNFL British Nuclear Fuels) werden ausschließlich HAW-Kokillen zurückgeführt. Von

AREVA-NC (ehemals COGEMA, La Hague) sind neben HAW-Kokillen auch mittel-radioaktive CSD-C und CSD-B zurückzuführen.

Die Menge der direkt endzulagernden Brennelemente wird mit insgesamt 10.678 tSM aus Druckwasserreaktoren (DWR), Siedewasserreaktoren (SWR) und aus DWR russischer Bauart (WWER-DWR) angegeben.

Es ist vorgesehen, die WA-Abfälle in Bohrlöchern endzulagern. Für die Brennelemente aus DWR, SWR und WWER-DWR wird einerseits die Streckenlagerung in POLLUX-Behältern und alternativ die Bohrlochlagerung in Brennstabkokillen (BSK) betrachtet. Für die CASTOR-Behälter der Typen AVR/THTR, MTR 2 und KNK mit Brennelementen aus Forschungsreaktoren wird vorrangig die Streckenlagerung betrachtet. Die Tab. 1.1 gibt einen Überblick über das aktualisierte Mengengerüst der Endlagergebände. In Abb. 1.1 bis Abb. 1.4 sind die verschiedenen Endlagergebäude graphisch dargestellt.

Für ein HAW-Endlager im Salz entsprechen die Angaben der im Rahmen des Vorhabens ISIBEL ermittelten Anzahl an Endlagergebänden <DBE 2008a>. Bei einer Endlagerung der gezogenen Brennstäbe ausgedienter Brennelemente in POLLUX-Behältern liegt die Anzahl der Endlagergebäude bei insgesamt 13.795 Stück; die Gesamtmasse der Endlagergebäude wird mit insgesamt 153.990 Mg angegeben. Kämen alternativ dazu BSK zum Einsatz, würde die Anzahl der Endlagergebäude bei insgesamt 18.567 Stück mit einer Gesamtmasse von insgesamt 57.195 Mg liegen.

Hinsichtlich einer möglichen Endlagerung von wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen in Tonformationen wird das vom BMWi geförderte Vorhaben GENESIS <DBE 2007> herangezogen. Dort werden modifizierte POLLUX-Behälter mit den Brennstäben von 3 DWR-BE anstelle von 10 DWR-BE betrachtet. Alle anderen Endlagergebäude sind identisch mit denen für die Endlagerung im Salzgestein. Die Anzahl der Endlagergebäude würden somit bei insgesamt 18.567 Stück liegen.

Tab. 1.1 Mengengerüst der endzulagernden wärmeentwickelnden radioaktiven Abfälle

Endlagergebäude	Anzahl (bei Endlagerung im Wirtsgestein Salz)	Anzahl (bei Endlagerung im Wirtsgestein Ton)
HAW-Kokille	3.767	
CSD-B	560	
CSD-C	6.902	
POLLUX-Behälter oder BSK	2.045 oder 6.817	6.817
CASTOR AVR/THTR	459	
CASTOR MTR 2	58	
CASTOR KNK	4	
Gesamt	13.795 oder 18.567	18.567

Ergänzend wird angemerkt, dass der im Rahmen der sicherheitstechnischen Einzelfragen erstellte Bericht „Ermittlung von Art und Menge chemotoxischer Stoffe ... und die Bewertung ihrer Freisetzung im Hinblick auf das Schutzziel des WHG“ <BUCHHEIM 2005> hinsichtlich des Abfallmengengerüsts nicht herangezogen wird. Dem o. g. Bericht liegt das Ein-Endlager-Konzept zugrunde, d. h. dort wird die gemeinsame Endlagerung von schwach-, mittel- und hochradioaktiven Abfällen mit einer Endlagergebundemasse von insgesamt 1.433.768 Mg betrachtet. Der Anteil der wärmeentwickelnden radioaktiven Abfälle (ausgediente Brennelemente und WA-Abfälle) wird mit 197.477 Mg, d. h. 13,8 % der v. g. gesamten Gebundemasse, angegeben. Der Vergleich mit den im Vorhaben ISIBEL ermittelten Angaben zeigt, dass das Mengengerüst in <BUCHHEIM 2005> nicht dem derzeit verfügbaren aktuellen Stand entspricht. So werden bspw. als WA-Abfälle auch bituminierte und zementierte mittelradioaktive sowie weitere leichtradioaktive Abfälle berücksichtigt; zwischenzeitlich wurde jedoch vertraglich vereinbart, dass solche WA-Abfälle substituiert werden und nicht nach Deutschland zurückgeführt werden.

Die Massenanteile der übrigen 1.236.291 Mg (86,2 %) setzen sich überwiegend aus Betriebsabfällen und aus der Stilllegung kerntechnischer Anlagen (z. B. zementierte und bituminierte Verdampferkonzentrate, Filterrückstände und Filterhilfsmittel, Ionenaustauscherharze (Kugel- und Pulverharze), Öle und Lösungsmittel sowie Aktivkohle, Asche, Bauschutt, Labor- und Mischabfälle und zellulosehaltige Materialien zusammen. Dies zeigt die gegenüber den wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen enorme Bandbreite an radioaktiven Abfällen mit unterschiedlichsten Zusammensetzungen, u. a. auch organischen Bestandteilen.

Es lässt sich zusammenfassend feststellen, dass das in <BUCHHEIM 2005> dargestellte Abfallmengengerüst und das daraus ermittelte Inventar an chemotoxischen Stoffen nicht für die Betrachtungen in diesem Vorhaben geeignet ist. Die weiteren <BUCHHEIM 2005> zu Grunde liegenden Randbedingungen des wirtsgesteinsunabhängigen Verdünnungsansatzes zeigen, dass der gewählte Ansatz nicht zum Nachweis des Grundwasserschutzes vor chemotoxischen Stoffen für ein HAW-Endlager im Salz und Ton geeignet ist:

- 4 vorgegebene Wirtsgesteine („Salinar“, „Ton“, „unter Tonüberdeckung“ und „Kristallin“)
- 3 vorgegebene Resthohlraumvolumina (100.000 m³, 500.000 m³, 1 Mio. m³) entsprechend Tiefenwasservolumina, in denen die Auflösung der Inventarbestandteile stattfindet
- 3 vorgegebene Verdünnungsfaktoren (500, 5.000, 50.000)
- Lösungsszenarien für nicht-salinare Wirtsgesteine: „hypothetisch vollständige Lösung“ und „reale Löslichkeit in reinem Wasser“. Für Wirtsgestein „Salinar“ zusätzlich Lösungsszenario „reale Löslichkeit in gesättigter NaCl-Lösung“.

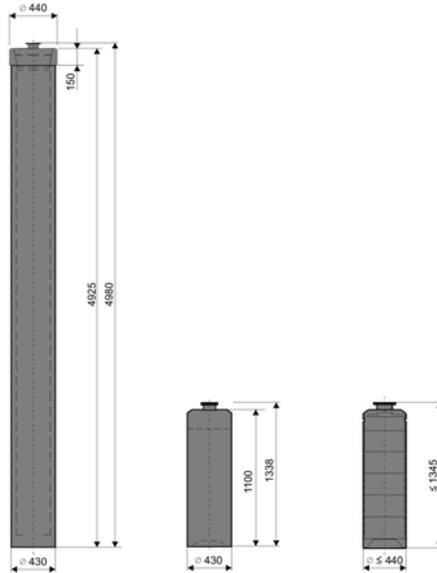


Abb. 1.1 Brennstabkokille (BSK), links, HAW-Kokille, Mitte, (CSD-V, entspricht auch CSD-B) und CSD-C, rechts

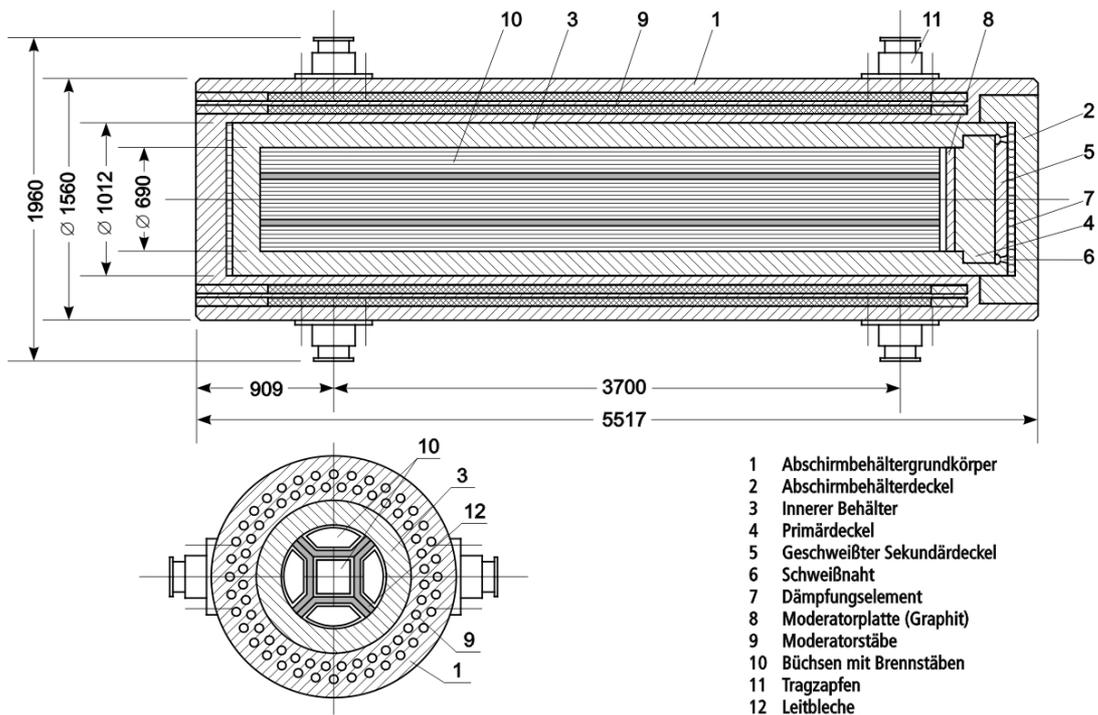


Abb. 1.2 POLLUX-Behälter (POLLUX-10, Endlagerung im Wirtsgestein Salz)

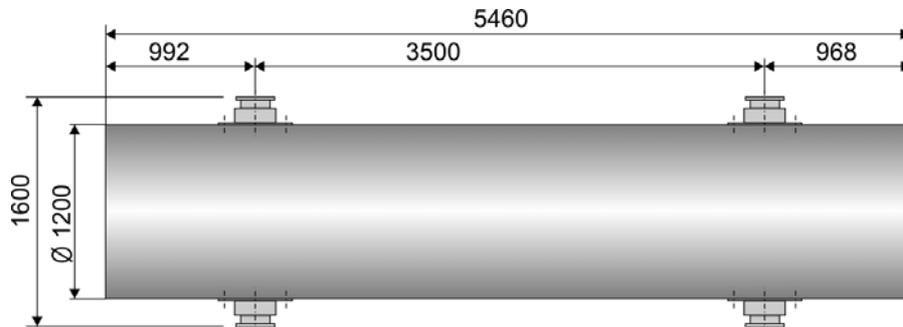


Abb. 1.3 POLLUX-Behälter (POLLUX-3, Endlagerung im Wirtsgestein Ton)

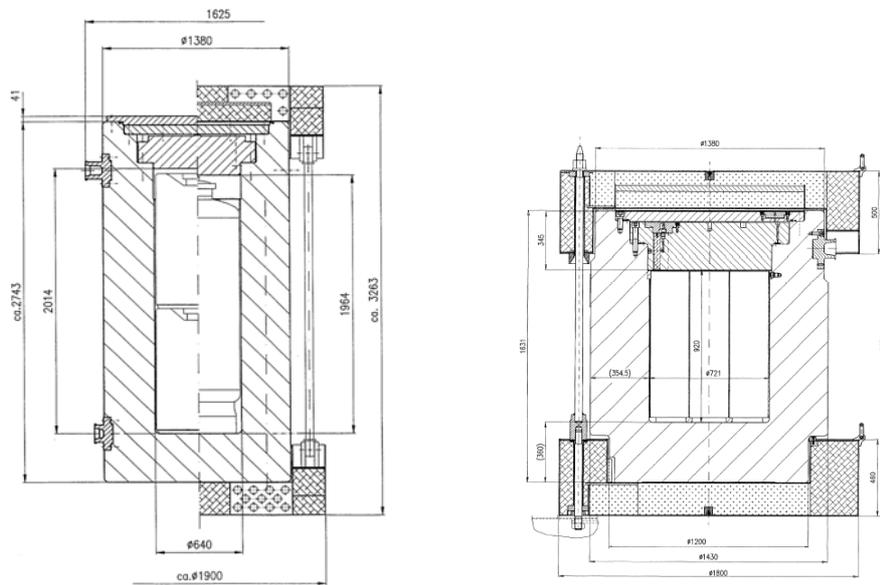


Abb. 1.4 CASTOR AVR/THTR, links, (entspricht im wesentlichen auch CASTOR KNK) und CASTOR MTR 2, rechts

2 Vorgaben aus wasserrechtlichen Vorschriften und Bewertungskriterien für Grundwasserverunreinigungen

Hinsichtlich der Vorgaben aus wasserrechtlichen Vorschriften und Bewertungskriterien für Grundwasserverunreinigungen werden in diesem Kapitel die europäischen und deutschen Vorschriften mit Konkretisierungen zu potentiell grundwassergefährdenden Stoffe beschrieben.

- **Richtlinie 80/68/EWG des Rates vom 17.12.1979 über den Schutz des Grundwassers gegen Verschmutzung durch bestimmte gefährliche Stoffe (EG-GrWRL)**

Die EG-Grundwasser-Richtlinie (EG-GrWRL) aus dem Jahr 1979 ist die Vorgänger-Richtlinie der Grundwasser-Richtlinie (GrWRL) aus dem Jahr 2006. Die EG-GrWRL hat noch Gültigkeit und wird erst zum 22.12.2013 aufgehoben. Ihr Regelungsgehalt ist von der GrWRL aus 2006 mit abgedeckt. Das in der EG-GrWRL vorgesehene Schutzniveau muss nach Abs. 13 der Präambel der GrWRL auch über ihren Aufhebungszeitpunkt hinaus durch die GrWRL weiterhin gewährleistet bleiben.

Ziel der EG-GrWRL ist es, die Verschmutzung des Grundwassers durch bestimmte gefährliche Stoffe zu verhüten und die Folgen seiner bisherigen Verschmutzung soweit wie möglich einzudämmen oder zu beheben. Dabei wird zwischen zwei Verschmutzungsgruppen unterschieden, Stoffe der Liste I und II.

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

Im Ergebnis führt die EG-GrWRL zu einer Konkretisierung grundwassergefährdender Stoffe, ohne jedoch Grenz- oder Richtwerte festzulegen.

- **Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23.10.2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik (WRRL)**

Die Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) enthält Vorgaben an die Mitgliedstaaten zum Schutz der Oberflächengewässer und des Grundwassers. Ein Schadstoff i. S. d. WRRL ist jeder Stoff, der zu einer Verschmutzung führen kann, insbesondere Stoffe des Anhangs VIII. Im Anhang VIII ist ein ‚nicht erschöpfendes Verzeichnis der wichtigsten Schadstoffe‘ aufgeführt. Hierzu zählen:

1. Organohalogene Verbindungen und Stoffe, die im Wasser derartige Verbindungen bilden können
2. Organische Phosphorverbindungen

3. Organische Zinnverbindungen
4. Stoffe und Zubereitungen oder deren Abbauprodukte, deren karzinogene oder mutagene Eigenschaften bzw. steroidogene, thyreoide, reproduktive oder andere Funktionen des endokrinen Systems beeinträchtigenden Eigenschaften im oder durch das Wasser erwiesen sind
5. Persistente Kohlenwasserstoffe sowie persistente und bioakkumulierende organische toxische Stoffe
6. Zyanide
7. Metalle und Metallverbindungen
8. Arsen und Arsenverbindungen
9. Biozide und Pflanzenschutzmittel
10. Schwebstoffe
11. Stoffe, die zur Eutrophierung beitragen (insbesondere Nitrate und Phosphate)
12. Stoffe mit nachhaltigem Einfluss auf die Sauerstoffbilanz (und die anhand von Parametern wie BSB, CSB usw. gemessen werden können).

In Art. 22 Abs. 5 WRRL ist festgelegt, dass diese Liste um die Stoffe zu ergänzen ist, die in der Liste der prioritären Stoffe (gem. Art. 16 i. V. m. Art. 4 Abs. 1 iv) WRRL für Oberflächengewässer festzusetzen) enthalten, aber noch nicht im Anhang VIII aufgeführt sind. Diese Liste wurde 2001 verabschiedet und als Anhang 10 in die WRRL aufgenommen. Zu den prioritären Stoffen zählen:

	Bezeichnung des prioritären Stoffes	Als prioritär gefährlicher Stoff identifiziert
(1)	Alachlor	
(2)	Anthracen	(X)***
(3)	Atrazin	(X)***
(4)	Benzol	
(5)	Bromierte Diphenylether**	(X)****
(6)	Cadmium und Cadmiumverbindungen	X
(7)	C 10-13 Chloralkane**	X
(8)	Chlorfenvinphos	
(9)	Chlorpyrifos	(X)***
(10)	1,2-Dichlorethan	
(11)	Dichlormethan	
(12)	Bis(2-ethylhexyl)phthalate (DEHP)	(X)***
(13)	Diuron	(X)***
(14)	Endosulfan	(X)***
	N.a. (alpha-Endosulfan)	
(15)	Fluoranthren*****	
(16)	Hexachlorbenzol	X
(17)	Hexachlorbutadien	X
(18)	Hexachlorcyclohexan (gamma-Isomer, Lindan)	X
(19)	Isoproturon	(X)***
(20)	Blei- und Bleiverbindungen	(X)***

	Bezeichnung des prioritären Stoffes	Als prioritär gefährlicher Stoff identifiziert
(21)	Quecksilber und Nickelverbindungen	X
(22)	Naphthalin	(X) ^{***}
(23)	Nickel und Nickelverbindungen	
(24)	Nonylphenole	X
	(p-Nonylphenol)	
(25)	Octylphenole	(X) ^{***}
	(para-tert-Octylphenol)	
(26)	Pentachlorbenzol	X
(27)	Pentachlorphenol	(X) ^{***}
(28)	Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe	X
	(Benzo(a)pyren)	
	(Benzo(b)fluoranthen)	
	(Benzo(ghi)perylen)	
	(Benzo(k)fluoranthen)	
	(Indeno[1,2,3-cd]pyren)	
(29)	Simazin	(X) ^{***}
(30)	Tributylzinnverbindungen	X
	(Tributylzinn-Kation)	
(31)	Trichlorbenzole	(X) ^{***}
	(1,2,4-Trichlorbenzol)	
(32)	Trichlormethan (Chloroform)	
(33)	Trifluralin	(X) ^{***}

** Diese Stoffgruppen umfassen in der Regel eine erhebliche Anzahl einzelner Verbindungen. Zum jetzigen Zeitpunkt können keine geeigneten Indikatorparameter angegeben werden.

*** Dieser prioritärer Stoff wird bezüglich seiner Identifizierung als möglicher, prioritärer gefährlicher Stoff überprüft.

**** Nur Diphenylether, Pentabromderivat

***** Fluoranthen ist auf der Liste als Indikator für andere gefährlichere polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe aufgeführt.

Insgesamt ist zu der WRRL festzustellen, dass sie zwar eine Konkretisierung möglicher grundwassergefährdender Stoffe beinhaltet, aber konkrete Vorgaben wie Richt- und Grenzwerte oder eine abschließende Liste der grundwassergefährdenden Stoffe in der WRRL nicht enthalten sind.

• **Richtlinie 2006/118/EG des europäischen Parlaments und des Rates vom 12.12.2006 zum Schutz des Grundwassers vor Verschmutzung und Verschlechterung (GrWRL)**

Auf der Grundlage des Art. 17 WRRL dient die Grundwasserrichtlinie (GrWRL) vom 12.12.2006 zur Konkretisierung der Maßnahmen zum Grundwasserschutz als sog. Tochterrichtlinie. Wie bereits erwähnt, löst diese Richtlinie die EG-GrWRL aus dem Jahr 1979 ab, jedoch erst ab 22.12.2013. Bis dahin gelten beide Richtlinien parallel mit zu berücksichtigenden Übergangsvorschriften in der GrWRL.

In Art. 6 GrWRL sind Maßnahmen zur Verhinderung oder Begrenzung des Eintrags von Schadstoffen in das Grundwasser geregelt. So sieht Art. 6 Abs. 1 a) für die Ermittlung der gefährlichen Stoffe vor, dass die Mitgliedstaaten folgende Stoffe be-

rücksichtigen, die gefährlichen Stoffe, die zu den in Anhang VIII Nr. 1 bis 6 der WRRL genannten Familien oder Gruppen von Schadstoffen gehören und Stoffe, die zu den in Anhang VIII Nr. 7 – 9 der WRRL genannten Familien oder Gruppen von Schadstoffen gehören, sofern diese als gefährlich erachtet werden:

1. Organohalogene Verbindungen und Stoffe, die im Wasser derartige Verbindungen bilden können
2. Organische Phosphorverbindungen
3. Organische Zinnverbindungen
4. Stoffe und Zubereitungen oder deren Abbauprodukte, deren karzinogene oder mutagene Eigenschaften bzw. steroidogene, thyreoide, redroductive oder andere Funktionen des endokrinen Systems beeinträchtigenden Eigenschaften im oder durch das Wasser erwiesen sind
5. Persistente Kohlenwasserstoffe sowie persistente und bioakkumulierende organische toxische Stoffe
6. Zyanide
7. Metalle und Metallverbindungen
8. Arsen und Arsenverbindungen
9. Biozide und Pflanzenschutzmittel

Im Ergebnis ist festzuhalten, dass die GrWRL keine abschließenden Vorgaben zu den zu berücksichtigenden gefährlichen Stoffe und nicht gefährliche Schadstoffen trifft.

- **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 (GrWV)**

Die Grundwasserverordnung (GrWV) hat die EG-GrWRL mit Übernahme sämtlicher Stoffe aus der Richtlinie umgesetzt. Die grundwassergefährdenden Stoffe werden entsprechend den Vorgaben aus der EG-GrWRL in zwei Verschmutzungsgruppen aufgeteilt, Stoffe der Liste I und II, und ihr Eintrag verboten bzw. begrenzt. Bezüglich der einzelnen Stoffe wird auf die EG-GrWRL verwiesen.

Im Ergebnis führen die Regelungen der GrWV zu einer Konkretisierung der mindestens zu berücksichtigenden grundwassergefährdenden Stoffe, jedoch enthalten sie keine Festlegung von Prüf-, Richt- oder Grenzwerten für diese Stoffe.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass als potentiell grundwassergefährdend bzw. chemotoxisch die Stoffe der Liste I und II der EG-GrWRL bzw. der GrWV und die Stoffe des Anhangs VIII und des Anhangs X der WRRL in Betracht kommen.

Bei der Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle werden insbesondere anorganische Stoffe in das Endlager eingebracht. Für die anorganischen potentiell

grundwassergefährdenden Stoffe der EG-GrWRL/GrWV und der WRRL besteht in weiten Teilen Stoffidentität.

Da organische Verbindungen eine untergeordnete Rolle spielen, wird im Folgenden auf die Betrachtung der organischen Stoffe verzichtet. Die Gesamtmasse der Endlagergebinde liegt bei der Einlagerungsvariante mit POLLUX-Behältern insgesamt bei ca. 153.990 Mg (Anteil organischer Bestandteile: ca. 2 Ma-%). Bei der Einlagerungsvariante mit Brennstabkokillen (BSK) liegt die Gesamtmasse der Endlagergebinde bei ca. 57.195 Mg (Anteil organischer Bestandteile: ca. 0,1 Ma-%). Die Massenangaben der organischen Bestandteile teilen sich wie folgt auf: Bei der Endlagerung von BSK ca. 50 Mg (entsprechend 0,1 % der Gesamtmasse der Endlagergebinde) für den Fall, dass für Neutronenmoderator im Deckelbereich der BSK Polyethylen zum Einsatz kommt. Bei der Endlagerung von POLLUX-Behältern ca. 3.150 Mg (entsprechend ca. 2 % der Gesamtmasse der Endlagergebinde), davon ca. 3.090 Mg für Polyethylenstäbe und ca. 60 Mg für Polyethylenplatte als Neutronenmoderator im Abschirmbehälter der POLLUX-Behälter. In den Behältermaterialien der Endlagergebinde mit WA-Abfällen kommen keine organischen Bestandteile zum Einsatz. Die Massen der organischen Bestandteile in den Behältermaterialien der CASTOR-Behälter werden mit < 0,5 Mg abgeschätzt. In den radioaktiven Abfällen der CSD-C wird der maximale Anteil an organischen Bestandteilen mit < 0,5 Mg abgeschätzt. In den Abfallmaterialien der übrigen Endlagergebinde befinden sich keine organischen Bestandteile. Das Inventar an organischen Materialien umfasst darüber hinaus auch die Massen der organischen Bestandteile von Einbauten in der Grube (z. B. Kunststoffummantelung/Kleber von Ankern und Kabeln). Dabei ist zu berücksichtigen, dass prinzipiell die Möglichkeit besteht, einen Teil der Einbauten rückzubauen und aus der Grube zu entfernen (z. B. Kabel). Des Weiteren umfasst das Inventar an organischen Materialien die Massen der organischen Bestandteile von Barrierematerialien (z. B. Bitumen und Asphalt). Im Versatz befinden sich keine organischen Bestandteile.

In diesem Bericht werden in die Betrachtungen zum Nachweis des Grundwasserschutzes vor chemotoxischen Stoffen im wesentlichen die potentiell grundwassergefährdenden anorganischen Stoffe der o. g. Richtlinien und Verordnungen einbezogen. Dort sind weiterhin Stofffamilien und Stoffgruppen aufgeführt, ohne jedoch Stoffe konkret zu benennen. Dazu zählen

- Stoffe, die im oder durch Wasser krebserregende, mutagene oder teratogene Wirkung haben (Liste I Nr. 4 EG-GrWRL/GrWV)
- 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 (Liste II Nr. 4 EG-GrWRL/GrWV)
- **LAWA Empfehlungen (Bund / Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser Ableitung von Geringfügigkeitsschwellenwerten für das Grundwasser)**

Für einen Großteil der in der Liste I und II der EG-GrWRL/GrWV enthaltenen Stoffe wurden von der Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) für die Bewertung von Änderungen der chemischen Beschaffenheit des Grundwassers Geringfügigkeitsschwellen (GFS) abgeleitet. 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.

Der Nachweis der Einhaltung der GFS-Werte erfolgt grundsätzlich durch Vergleich der ermittelten oder prognostizierten Stoffkonzentrationen mit den GFS-Werten, 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.

Die GFS-Werte wurden für anorganische und organische Stoffe/Substanzen sowie für Pflanzenschutzmittel und Biozidprodukte sowie sprengstofftypische Verbindungen abgeleitet. In der Tab. 2.1 sind die von der LAWA abgeleiteten GFS-Werte zur Beurteilung lokal begrenzter Grundwasserverunreinigungen mit anorganischen Stoffen / Substanzen aufgeführt. Da sich die Betrachtungen zum Nachweis des Grundwasserschutzes vor chemotoxischen Stoffen in diesem Vorhaben auf anorganische Stoffe / Parameter beschränken, wird auf die Darstellung der GFS-Werte für organischen Stoffen / Substanzen sowie für Pflanzenschutzmittel und Biozidprodukte sowie sprengstofftypische Verbindungen verzichtet.

Tab. 2.1 Geringfügigkeitsschwellenwerte der LAWA für anorganische Parameter

Substanzname	Geringfügigkeitsschwellenwert [µg/l]
Antimon (Sb)	5
Arsen (As)	10
Barium (Ba)	340
Blei (Pb)	7
Bor (B)	740
Cadmium (Cd)	0,5
Chrom (Cr III)	7
Kobalt (Co)	8
Kupfer (Cu)	14
Molybdän (Mo)	35
Nickel (Ni)	14
Quecksilber (Hg)	0,2
Selen (Se)	7
Thallium (Tl)	0,8
Vanadium (V) ¹⁾	4
Zink (Zn)	58
Chlorid (Cl ⁻)	250.000

Substanzname	Geringfügigkeitsschwellenwert [µg/l]
Cyanid (CN ⁻)	5 (50)
Fluorid (F ⁻)	750
Sulfat (SO ₄ ²⁻)	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 Wirkungen. Sie beruht jedoch auf einer unvollständigen und nur strittig zu bewertenden Datenbasis. Durch die Aussetzung soll insbesondere der Industrie die Gelegenheit gegeben werden, die experimentelle Datenbasis zur Human- und Ökotoxizität zu ergänzen. Es wird vermutet, dass auf verbesserter Datenbasis die GFS für Vanadium erhöht werden kann.

Für den Nachweis des Grundwasserschutzes vor chemotoxischen Stoffen werden im wesentlichen die in der Tab. 2.1 aufgeführten anorganischen Stoffe / Parameter herangezogen. Darüber hinaus wird Uran in die Betrachtungen mit einbezogen. Da bislang von der LAWA kein GFS-Wert für Uran abgeleitet wurde, wird der von der WHO abgeleitete Richtwert für Trinkwasser (15 µg/l) herangezogen.

Hinsichtlich der GFS-Werte ist generell anzumerken, dass es sich hierbei um Immissionswerte handelt, die die Konzentration eines Stoffes im Grundwasser betreffen.

3 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.

3.1 Chemische und chemotoxische Stoffe der wärmeentwickelnden radioaktiven 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 <DBE 2008a> entnommen. In Kapitel 3.1.1 erfolgt die Beschreibung der Werkstoffe bzw. Materialien. Die chemische Zusammensetzung der Werkstoffe und Materialien ist in Kapitel 3.1.2 beschrieben. In Kapitel 3.1.3 ist das Inventar der chemotoxischen Stoffe der wärmeentwickelnden radioaktiven Abfälle dargestellt. Insbesondere Tab. 3.15 und Tab. 3.16 geben einen Überblick über die identifizierten chemotoxischen Stoffe und deren Masse je Abfallgebinde getrennt nach den Anteilen der Behältermaterialien und der konditionierten Abfälle.

3.1.1 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. Tab. 3.1).

Tab. 3.1 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 Brennstabkockille

Der POLLUX-Behälter besteht aus einem Innen- und einem Außenbehälter. Der Innenbehälter besteht aus Feinkornstahl (15MnNi6.3), hat eine Wandstärke von 160 mm und wird durch einen geschraubten Primärdeckel und einen geschweißten Sekundärdeckel dicht verschlossen. 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 Primär- und Sekundärdeckel 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 Tab. 3.2 aufgeführt <GNB 1998a>.

Tab. 3.2 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 angespressten oder angeschweißten Boden. Der Behälterkörper besteht wie der Primär- und 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 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 Tab. 3.3 aufgeführt <GNB 1998b>.

Tab. 3.3 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). Im Innenraum kann entweder eine Stahlkanne für THTR-BE oder es können zwei Stahlkannen für die AVR-BE aufgenommen werden. Die für die Bauteile des CASTOR AVR/THTR zum Einsatz kommenden Werkstoffe sind in der Tab. 3.4 aufgeführt <BfS 2005a> <GNS 2004>.

Tab. 3.4 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		

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 Tab. 3.5 aufgeführt <BfS 2005b> <GNS 2004>.

Tab. 3.5 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		

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 Nuklearerperimenten (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 Tab. 3.6 aufgeführt. <BfS 2005a>.

Tab. 3.6 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 Brennstäben 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. Tab. 3.7). 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.

Tab. 3.7 Material und Massen der Abfallprodukte einer HAW-Kokille

Material	Masse	
	[kg]	[%]
Borsilikatglas	410	100

In der Tab. 3.12 ist die chemische Zusammensetzung des Borsilikatglases beschrieben. Ergänzend dazu werden die im Folgenden aufgeführten Angaben der ANDRA zu potentiell chemotoxischen Stoffen in den Abfallbestandteilen je HAW-Kokille berücksichtigt <ANDRA 2004>:

- 17.000 g Bor, 600 g Uran, 500 g Nickel, 300 g Chrom, 150 g Cadmium, 100 g Selen, 15 g Antimon

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 Tab. 3.8 sind Werkstoffe und Massen der Hülsen und Strukturteile eines beispielhaften DWR-BE dargestellt.

Tab. 3.8 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 Tab. 3.8 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.

Ergänzend dazu werden die im Folgenden aufgeführten Angaben der ANDRA <ANDRA 2004> zu potentiell chemotoxischen Stoffen in den Abfallbestandteilen je CSD-C berücksichtigt:

- 22.000 g Chrom, 15.000 g Nickel, 1.000 g Blei, 400 g Uran, Spuren von Bor und Antimon

POLLUX-Behälter und Brennstabkille

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 Tab. 3.9 sind Werkstoffe und Massen der Brennstäbe eines beispielhaften DWR-BE dargestellt.

Tab. 3.9 Werkstoffe und Massen der Brennstäbe eines DWR-BE

Werkstoff	Masse	
	[kg]	[%]
Zr-Alloy/Zry-4	157,74	20,09
1.4541	6,61	0,84
1.4568	4,48	0,57
Al_2O_3	0,71	0,09
UO_2	615,72	78,41
Summe	785,26	100,00

Die in der Tab. 3.9 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.

Ergänzend dazu werden die in der Tab. 3.10 dargestellten anorganischen Stoffe aus OREST-Abbrandrechnungen für ein Referenz-Brennelement aus DWR (Uran-BE, Anfangsanreicherungen: 4,0 Gew.-% Uran, Abbrand: 50 GWd/tSM) berücksichtigt.

Tab. 3.10 Anorganische Stoffe in der Brennstoffmatrix eines DWR-BE

Substanzname	Masse [g je tSM]
Antimon (Sb)	1,256 E+01
Arsen (As)	1,641 E-01
Barium (Ba)	4,341 E+03
Blei (Pb)	4,885 E+02
Bor (B)	4,013 E-05
Cadmium (Cd)	1,726 E+02
Chrom (Cr III)	-
Kobalt (Co)	-
Kupfer (Cu)	-
Molybdän (Mo)	5,013 E+03
Nickel (Ni)	-
Quecksilber (Hg)	1,100 E-16
Selen (Se)	7,086 E+01
Thallium (Tl)	2,309 E-10
Uran (U)	9,445 E+05
Vanadium (V)	-
Zink (Zn)	1,841 E-03

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. Tab. 3.11)

Tab. 3.11 Zusammensetzung einer BE-Kugel des THTR-300

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

Die in der Tab. 3.11 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. Tab. 3.12).

Tab. 3.12 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 Tab. 3.12 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. Tab. 3.13) <WTI 2006>.

Tab. 3.13 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

3.1.2 Chemische Zusammensetzung der Werkstoffe und Materialien der wärmeentwickelnden radioaktiven Abfälle

Behältermaterialien

HAW-Kokillen, CSD-B, CSD-C

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 ist die chemische Zusammensetzung der für die POLLUX-Behälter (s. Tab. 3.2), Brennstabkokillen (s. Tab. 3.3), CASTOR AVR/THTR (s. Tab. 3.4), CASTOR MTR 2 (s. Tab. 3.5) und CASTOR KNK (s. Tab. 3.6) eingesetzten Werkstoffe 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) <SPÄROGUSS 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 boriiert <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) <SALZGITTER 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) <SALZGITTER 2007>

Al: 99,5 % Fe: < 0,4 % Si: < 0,25 %

Grafit:

C: ca. 99,8 % Si: Ca. 0,2 % Si: < 0,25 %

Polyethylen (Hostalen und Lupolen: Hersteller-Markenbezeichnung für Polyethylen)
(C₂H₅)_n

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

Abfallmaterialien

HAW-Kokillen, CSD-B

In der Tab. 3.14 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 AREVA-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.

Tab. 3.14 Chemische Zusammensetzung des Borsilikatglases (HAW-Kokille, CSD-B)

	Masse	
	[kg]	[%]
SiO ₂	184,91	45,1
B ₂ O ₃	56,99	13,9
Al ₂ O ₃	20,09	4,9
Na ₂ O	40,18	9,8
CaO	16,40	4,0
Fe ₂ O ₃	11,89	2,9
NiO	1,64	0,4
Cr ₂ O ₃	2,05	0,5
P ₂ O ₅	1,23	0,3
Li ₂ O	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 ist die chemische Zusammensetzung der in der Tab. 3.8 dargestellten Werkstoffe der Hüllen 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-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 1.4568 <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 Brennstabkockillen

Im Folgenden ist die chemische Zusammensetzung der in der Tab. 3.9 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-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 1.4568 <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 %			

Al₂O₃

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

UO₂

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

CASTOR AVR/THTR

Bei den chemischen Bestandteilen der BE-Kugeln des THTR-300 handelt es sich um Graphit, Thorium und Uran. Die jeweiligen Massenanteile können Tab. 3.11 entnommen werden.

CASTOR MTR 2

Bei den chemischen Bestandteilen der Brennelemente des FRM II handelt es sich um U₃Si₂ und Aluminium. Die jeweiligen Massenanteile können Tab. 3.12 entnommen werden.

CASTOR KNK

Bei den chemischen Bestandteilen der Brennstäbe des KNK II handelt es sich u. a. um Uran und Plutonium. Im Folgenden ist die chemische Zusammensetzung der darüber hinaus in der Tab. 3.13 aufgeführten Werkstoffe der Brennstäbe der KNK II beschrieben.

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 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 %	

Al₂O₃

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

3.1.3 Inventar chemotoxischer Stoffe der wärmeentwickelnden radioaktiven Abfälle

Mit den in den Kapiteln 3.1.1 und 3.1.2 vorliegenden Angaben zu Werkstoffen und Materialien der wärmeentwickelnden radioaktiven Abfälle und der jeweiligen chemischen Zusammensetzung erfolgt die Abschätzung des Inventars der chemotoxischen Stoffe. Die Tab. 3.15 und Tab. 3.16 enthalten die ermittelten Massen chemotoxischer Stoffe je Abfallgebinde getrennt nach den Anteilen der Behältermaterialien und den Anteilen der konditionierten Abfälle. In die Betrachtungen wurden die anorganischen Stoffe / Substanzen einbezogen, für die von der LAWA GFS-Werte abgeleitet wurden (vgl. Tab. 2.1), sowie Uran.

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. Tab. 3.14). Von den dort aufgeführten Verbindungen werden Anteile von chemotoxischen Stoffen in den Verbindungen B₂O₃, NiO, Cr₂O₃ 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 (B₂O₃: 13,9 %, NiO: 0,4 %, Cr₂O₃: 0,5 % und ZnO: 2,5 %), der Massenanteile der chemotoxischen Stoffe an der Verbindung (B₂O₃: 31,06 % Bor, NiO: 78,58 % Nickel, Cr₂O₃: 68,42 % Chrom, ZnO: 80,34 % Zink) und der Masse des

Borsilikatglases (ca. 410 kg) errechnet. Ergänzend dazu werden die von der ANDRA vorliegenden Angaben zu potentiell chemotoxischen Stoffen in den Abfallbestandteilen je HAW-Kokille berücksichtigt.

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 Tab. 3.15 sind die ermittelten Massen chemotoxischer Stoffe für HAW-Kokillen, CSD-B und CSD-C, in der Tab. 3.16 die chemotoxischen Stoffe für 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 Tab. 3.2 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. Auf eine Abschätzung der chemotoxischen Stoffe für CASTOR MTR 2 und CASTOR KNK wird an dieser Stelle verzichtet, da die Angaben zu Behälter- und/oder Abfallmaterialien unvollständig sind.

Tab. 3.15 Massen chemotoxischer Stoffe je Abfallgebinde (HAW-Kokille, CSD-B und CSD-C) getrennt nach den Anteilen aus den Behältermaterialien und den Anteilen der konditionierten radioaktiven Abfälle

Anorganische Parameter	HAW-Kokillen		CSD-B		CSD-C		Gesamt [kg]	
	Behälter [kg]	Abfall [kg]	Behälter [kg]	Abfall [kg]	Behälter [kg]	Abfall [kg]		
Antimon (Sb)		0,015		0,015		0,015	0,000	0,000
Arsen (As)								
Barium (Ba)								
Blei (Pb)						1,000		1,000
Bor (B)		17,701		17,701			0,000	0,000
Cadmium (Cd)		0,150		0,150				
Chrom (Cr III)	19,200	1,403	19,200	1,403	19,200	20,628		39,828
Kobalt (Co)							0,119	0,119
Kupfer (Cu)							0,052	0,052
Molybdän (Mo)								
Nickel (Ni)	11,200	1,289	11,200	1,289	11,200	12,489	0,110	0,110
Quecksilber (Hg)							19,058	30,258
Selen (Se)		0,100		0,100		0,100		
Thallium (Tl)								
Uran (U)		0,600		0,600		0,600	0,400	0,400
Vanadium (V)								
Zink (Zn)		8,235		8,235		8,235		
Chlorid (Cl)								
Cyanid (CN)								
Fluorid (F)								
Sulfat (SO ₄ ²⁻)								
Σ chemotoxische Stoffe	30,400	28,627	30,400	28,627	30,400	59,027	41,367	71,767

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

Im Folgenden sind die Zusammensetzungen der nach heutigen Planungen vorgesehenen Versatz- und Barrierematerialien beschrieben. Die entsprechenden Daten werden – soweit nicht anders angegeben – dem Bericht <DBE 2008b> entnommen. Die Tab. 3.28 gibt einen Überblick über die Anteile der chemotoxischen Stoffe in den Versatz- und Barrierematerialien.

3.2.1 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 Tab. 3.17 die durchschnittliche Zusammensetzung des Staßfurt Hauptsalzes (z2HS) und in der Tab. 3.18 die des Steinsalzes in der unteren Leine-Folge (z3LS und z3OS) für den Standort Gorleben aufgeführt <MÜLLER-SCHMITZ 1985>.

Tab. 3.17 Zusammensetzung des Staßfurt Hauptsalzes (z2HS)

Mineralname	Verbindung	Masse [%]	Dichte [g/cm ³]
Halit	NaCl	95,0	2,164
Anhydrit	CaSO ₄	4,9	2,97
Polyhalit	Ca ₂ K ₂ Mg(SO ₄) ₄ ·2H ₂ O	0,1	2,78
wasserunlösliche Bestandteile (Tone, Quarz usw.)		0 – 1	-

Tab. 3.18 Zusammensetzung des Steinsalzes in der unteren Leine-Folge (z3LS und z3OS)

Mineralname	Verbindung	Masse [%]	Dichte [g/cm ³]
Halit	NaCl	94,4	2,164
Anhydrit	CaSO ₄	5,0	2,97
Polyhalit	Ca ₂ K ₂ Mg(SO ₄) ₄ ·2H ₂ O	0,5	2,78
Carnallit	KCl·MgCl ₂ ·6H ₂ O	< 0,1	1,602
wasserunlösliche Bestandteile (Tone, Quarz usw.)		0 – 1	-

In den betrachteten Versatzmaterialien wurden Chlorid (Cl⁻) und Sulfat (SO₄²⁻) als chemotoxische Stoffe identifiziert (Cl: ca. 60 Ma.-% der Verbindung NaCl; SO₄: ca. 70 Ma.-% der Verbindung CaSO₄). Die Chloridanteile des Carnallit und die Sulfatanteile des Polyhalit sind gegenüber den o. g. Massenanteilen des Halit bzw. des Anhydrit vernachlässigbar.

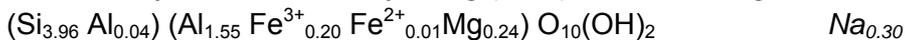
3.2.2 Chemische und chemotoxische Stoffe der Barrierematerialien

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.

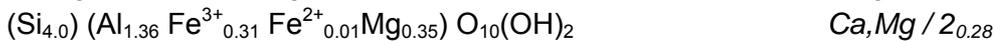
Bentonit

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>. Die Tab. 3.19 gibt einen Überblick über ihre mineralogische Zusammensetzung.

SPV Volclay, Na-Bentonit, Wyoming (USA), Dichte: 2,75 g/cm³



Calcigel (früher Montigel), Ca-Bentonit, Deutschland, Dichte: 2,84 g/cm³



Tab. 3.19 Zusammensetzung von Bentonit <MÜLLER-VONMOOS et al 1983>

Mineralname	Verbindung	SPV Volclay	Calcigel
		Masse [%]	Masse [%]
Montmorillonit	$(\text{Al, Mg})_2 [(\text{OH})_2 \text{Si}_4 \text{O}_{10}] (\text{Na, Ca})_x \cdot \text{H}_2\text{O}$	75	66
Quarz	SiO_2	15,2	8,3
Feldspat	Alkalifeldspäte und Plagioklase: $\text{X}[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$ 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: $\text{Ca}[\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8]$	5 - 8	2 - 4
Glimmer	$\text{XY}[(\text{OH})_2 \text{AlSi}_3\text{O}_{10}]$ 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	$(\text{Ca, Fe, Mg})\text{CO}_3$ und $\text{Ca}(\text{Mg, Fe})[\text{CO}_3]_2$	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 Tab. 3.20 dargestellt <SÜD CHEMIE>. Ergänzend dazu gibt die Tab. 3.21 einen Überblick über chemische Analysedaten verschiedener Bentonite der S&B Industriel Minerals GmbH.

Tab. 3.20 Zusammensetzung von Bentonit <SÜD CHEMIE>

Mineralname	Verbindung	Masse [%]
Montmorillonit	$(\text{Al}, \text{Mg})_2 [(\text{OH})_2 \text{Si}_4 \text{O}_{10}] (\text{Na}, \text{Ca})_x \cdot \text{H}_2\text{O}$	70 – 75
Quarz	SiO_2	6 – 9
Feldspat	Alkalifeldspäte und Plagioklase: $\text{X}[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$ 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: $\text{Ca}[\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8]$	1 – 2
Glimmer	$\text{XY}[(\text{OH})_2\text{AlSi}_3\text{O}_{10}]$ 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	$\text{Al}_2[(\text{OH})_4\text{Si}_2\text{O}_5]$	1 – 2
Sonstige Minerale		5 - 10

In den betrachteten Zusammensetzungen des Bentonits wurden keine chemotoxischen Stoffe identifiziert.

Tab. 3.21 Spurenelemente in Bentonit <S&B 2007>

Spurenelement	Bulgarischer Bentonit JsC Kardjali Bentonit FR-03-0763	Ungarischer Bentonit IBECO 5XG-NG FR-04-0709	Milos Bentonit S-80 FR-04-0941
	Masse [ppm]	Masse [ppm]	Masse [ppm]
Pb	48	< 10	17
Ba	727	651	912
Nb	< 20	59	< 10
Zr	282	228	159
Y	28	27	19
Sr	181	190	143
Cd*	-	-	-
Rb	126	56	42
As	< 20	< 10	< 10
Ga	< 20	21	17
Zn	50	100	83
Cu	< 20	34	25
Ni	< 20	142	19
Co	< 20	33	21

* Cd-Gehalte wurden nicht analysiert

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 Tab. 3.22 dargestellt.

Tab. 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 ₂ O ₃ 0,4 % Al ₂ O ₃ 31,5 % Glühverlust	11,3	2,86
Schiefermehl <VTS 2005>	58,1 % SiO ₂ 20,7 % Al ₂ O ₃ 7,4 % Fe ₂ O ₃ 0,95 % TiO ₂ 0,56 % CaO 1,43 % MgO 1,09 % Na ₂ O 3,16 % K ₂ O 0,11 % MnO 0,15 % P ₂ O ₅ 4,67 % Glühverlust 0,14 % S _{ges}	12,8	2,71
Steinsalzgrus	NaCl	45,2	2,17
Anmischlösung MgCl ₂ · xH ₂ O <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 (Cl⁻) und Sulfat (SO₄²⁻) als chemotoxische Stoffe identifiziert (Cl⁻: ca. 60 Ma.-% des NaCl (Steinsalzgrus) und ca. 75 Ma.-% des MgCl₂ der Anmischlösung; SO₄²⁻: ca 80 Ma.-% des MgSO₄ (Anmischlösung). Die übrigen Chlorid- und Sulfatanteile des Magnesiabinders sind gegenüber den o. g. Massenanteilen vernachlässigbar.

Salzbeton

Für die bergbauliche Gefahrenabwehrmaßnahme Zentralteil (bGZ) und die Stilllegung des ERAM wurden Salzbetonrezepturen untersucht, die in der Tab. 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. Ergänzend dazu gibt die Tab. 3.24 einen Überblick über die Mittelwerte von Spurenelementen in mehr als 400 Stichproben aus der Güteüberwachung deutscher Normzemente des Jahres 2001 <VDZ 2001>.

Tab. 3.23 Zusammensetzung von Salzbeton

Salzbeton	Verbindung	Dichte [g/cm³]	Masse [%]		
			M1	M2	M3
Hochofenzement <HOLCIM 2007>	SiO ₂ Al ₂ O ₃ Fe ₂ O ₃ CaO MgO SO ₃ Na ₂ O K ₂ O Na ₂ O (äquiv.) Chlorid unlös. Rückstände Glühverlust	3,05	22,4	16,4	9,9
Steinkohlenflugasche <BAUMINERAL 2003>	SiO ₂ Al ₂ O ₃ Fe ₂ O 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 ₂ O	1,0	32,0	13,4	12,6

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

Tab. 3.24 Spurenelemente in Zement

Spurenelement	Mittelwert [µg/g]
Arsen (As)	7,0
Beryllium (Be)	1,3
Cadmium (Cd)	0,4
Cobalt (Co)	8,7
Chrom (Cr)	41
Kupfer (Cu)	31

Spurenelement	Mittelwert [µg/g]
Quecksilber (Hg)	0,06
Mangan (Mn)	759
Nickel (Ni)	23
Blei (Pb)	17
Antimon (Sb)	2,9
Selen (Se)	n. b.*
Tellur (Te)	n. b.*
Thallium (Tl)	0,4
Vanadium (Va)	50
Zink (Zn)	192
Zinn (Sn)	3,6

* n. b.: nicht bestimmbar

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 Tab. 3.25 ist die (unveröffentlichte) Zusammensetzung der Referenzmischung dargestellt.

Tab. 3.25 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	2,80
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 (SO_4^{2-}) und Chlorid (Cl) als chemotoxische Stoffe identifiziert (SO_4 : ca 80 Ma.-% des $MgSO_4$, und ca. 70 Ma.-% des K_2SO_4 und $CaSO_4$; Chlor: ca. 60 Ma.-% des NaCl).

Steinsalz-Anhydrit-Baustoffe

Gips-/Anhydritbinder sind anorganisch-mineralische Bindemittelsysteme, die auf der Bildung von Hydratphasen des Systems $CaSO_4 \cdot H_2O$ basieren. Die Tab. 3.26 enthält die chemische Zusammensetzung der Rezeptur nach <LANGFELD 2005>. Die Masse der zuzugebenden Anmischlösung (gesättigte NaCl-Lösung) ist der Veröffentlichung nicht zu entnehmen.

Tab. 3.26: Zusammensetzung der Steinsalz-Anhydrit-Baustoffe

Mineralname	Verbindung	Masse [%]	Dichte [g/cm ³]
Calciumsulfat α-Halbhydrat	CaSO ₄ x 0,5 H ₂ O	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 ₂ O entsprechend 358 g NaCl in 1 l H ₂ O	Keine Angabe	1,20

In dem betrachteten Steinsalz-Anhydrit-Baustoff wurde Sulfat (SO₄²⁻) und Chlorid (Cl⁻) als chemotoxische Stoffe identifiziert (SO₄: ca 70 Ma.-% des CaSO₄; Chlor: ca. 60 Ma.-% des NaCl).

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 Tab. 3.27 ist die (unveröffentlichte) Zusammensetzung des Schotters dargestellt.

Tab. 3.27 Zusammensetzung des Diabas-Schotters

Mineralname/Verbindung	Masse [%]
SiO ₂	49,95
TiO ₂	2,33
Al ₂ O ₃	14,67
∑ Fe als Fe ₂ O ₃	12,31
MnO	0,15
MgO	5,95
CaO	6,7
Na ₂ O	4,21
K ₂ O	0,91
P ₂ O ₅	0,28
Zwischensumme	97,46
Minerale	
Plagioklas (NaAlSi ₃ O ₈ – CaAl ₂ Si ₂ O ₈)	45 – 55
Pyroxene (XY(Z ₂ O ₆)) Der Chemismus der Pyroxene kann durch die allgemeine Formel XY(Z ₂ O 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 ₃ O ₄)	5 – 10
Karbonat (CaCO ₃)	< 1
Chlorit (Fe,Mg,Al) ₆ (Si,Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₈ + Titanit (CaTiSiO ₅)	10 – 20
Phrenit (Ca ₂ Al [(OH) ₂ AlSi ₃ O ₁₀])	< 1

Mineralname/Verbindung	Masse [%]
+ Serizit ($KAl_2[(OH)_2AlSi_3O_{10}]$) + Apatit ($Ca_5[(F,Cl,OH)(PO_4)_3]$)	

Im Schotter wurden Fluorid (F^-) und Chlorid (Cl^-) (Bestandteile des Apatit) und Chrom (möglicher Bestandteil der Pyroxene) als chemotoxische Stoffe identifiziert.

Organische Baustoffe

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

Bitumen sind die höchst- und nicht-siedenden 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 Asphaltene), 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.

Teer wird durch Pyrolyse von Kohle hergestellt. Es ist ein flüssiges bis halbfestes, tiefschwarzes oder braunes Produkt, das bei der trockenen Destillation von Steinkohle, Braunkohle und anderer fossiler Brennstoffe entsteht und in erster Linie aus Kohlenwasserstoff-Gemischen besteht.

Im Rahmen dieses Vorhabens werden die anorganischen Stoffe / Substanzen in die Betrachtungen zum Schutz des Grundwassers vor chemotoxischen Stoffen einbezogen, für die von der LAWA GFS-Werte abgeleitet wurden (vgl. Tab. 2.1), sowie Uran. Daher wird vorgeschlagen, die organischen Baustoffe an dieser Stelle nicht weiter zu berücksichtigen.

Für darüber hinaus weitere in die Grube eingebrachte organische Materialien (z. B. Holz, Kunststoffe) besteht die Möglichkeit, diese vor Verschluss des Endlagers zurückzubauen. Daher werden diese organische Materialien nicht in die Betrachtungen zum Nachweis des Grundwassers vor chemotoxischen Stoffen einbezogen.

3.2.3 Inventar chemotoxischer Stoffe der Versatz- und Barrierematerialien

Mit den in den Kapiteln 3.2.1 und 3.2.2 vorliegenden Angaben zur chemischen Zusammensetzung der für den Verschluss des Endlagers nach heutigen Planungen vorgesehenen Versatz- und Barrierematerialien und der jeweiligen chemischen Zusammensetzung erfolgt die Abschätzung des Inventars der chemotoxischen Stoffe. Die Tab. 3.28 enthält den Anteil chemotoxischer Stoffe für das jeweilige Versatz- bzw. Barrierematerial. In die Betrachtungen wurden die anorganischen Stoffe / Substanzen einbezogen, für die von der LAWA GFS-Werte abgeleitet wurden (vgl. Tab. 2.1), sowie Uran.

Mit den vorliegenden Angaben zur chemischen Zusammensetzung der betrachteten Versatz- und Barrierematerialien wurden im Wesentlichen Chlorid (Cl^-) und Sulfat (SO_4^{2-}) als chemotoxische Stoffe identifiziert. An dieser Stelle wird darauf hingewiesen, dass es sich hierbei um Bestandteile des Salzstockes selbst handelt. Darüber hinaus wurden lediglich im Schotter die chemotoxischen Stoffe Fluorid (F^-) und Chrom (Cr) 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 Kali-bergbaus 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 $k \leq 10^{-18} \text{ m}^2$ eine hinreichende Langzeitstabilität /Dauerhaftigkeit der Abdichtungen für den erforderlichen Betrachtungszeitraum gegeben <GRS 2002>. 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...“.

Aus den vorgenannten Gründen wird vorgeschlagen, diese Materialien nicht in die Betrachtungen zum Nachweis des Grundwassers vor chemotoxischen Stoffen einzubeziehen. Die organischen Baustoffe werden an dieser Stelle nicht weiter berücksichtigt, da im Rahmen dieses Vorhabens lediglich die anorganischen Stoffe / Substanzen in die Betrachtungen zum Schutz des Grundwassers vor chemotoxischen Stoffen einbezogen werden.

Tab. 3.28 Anteile chemotoxischer Stoffe in Versatz- und Barrierematerialien in einem HAW-Endlager im Wirtsgestein Salz

Anorganische Parameter	Salzgrus (zZHS) [%]	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)							
Uran (U)							
Vanadium (V)							
Zink (Zn)							
Chlorid (Cl ⁻)	57%		33%	30%	4%	15%	< 0,01 %
Cyanid (CN ⁻)							< 0,01 %
Fluorid (F ⁻)							
Sulfat (SO ₄ ²⁻)	3%		0%		33%	53%	
Σ chemotoxische Stoffe	60%		33%	30%	37%	68%	< 0,01 %

3.3 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 in 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
- Teflungleitschicht
- St 52-3
- STE 460
- N-A-XTRA 70 (Werkstoff Nr. 1.8964)

3.3.1 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.

3.4 Auslegung des Grubengebäudes

Im Rahmen des Vorhabens ISIBEL wurde auf Basis einer bereits vorliegenden Endlagerkonzeption für den Standort Gorleben mit dem aktuellen Mengengerüst an Endlagergebinden eine Grubengebäudeauslegung für zwei Varianten durchgeführt. Es wurde die Einlagerung von POLLUX-Behältern in horizontalen Strecken und von HAW-Kokillen und CSD-C in 200 m tiefen vertikalen Bohrlöchern (s. Abb. 3.1) und alternativ dazu die Endlagerung von Brennstabkokillen sowie HAW-Kokillen und CSD-C in 200 m tiefen vertikalen Bohrlöchern (s. Abb. 3.2) betrachtet <DBE 2008a>.

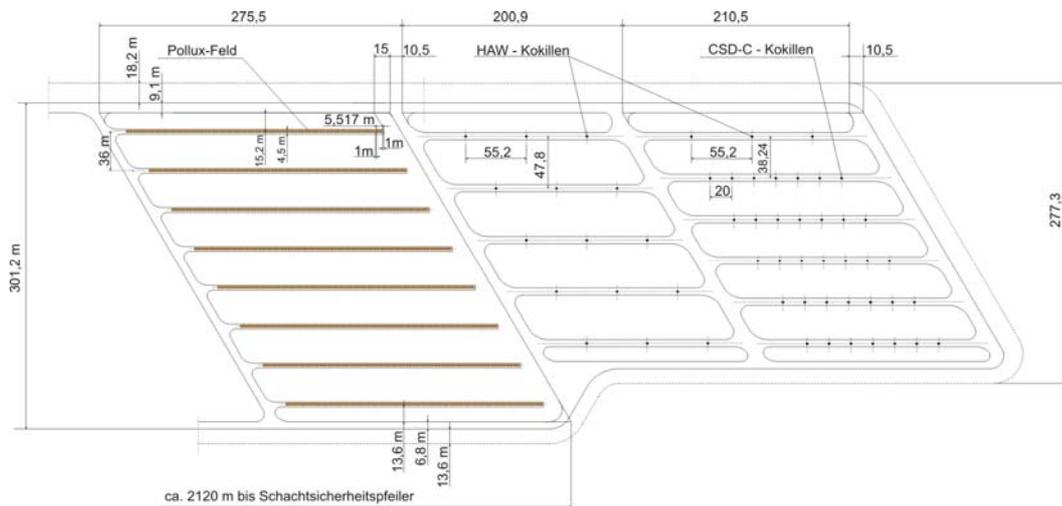


Abb. 3.1 Ausschnitt eines Grubengebäudes für die Streckenlagerung von POLLUX-Behältern (POLLUX-10) und die Bohrlochlagerung von HAW-Kokillen und CSD-C im Wirtsgestein Salz

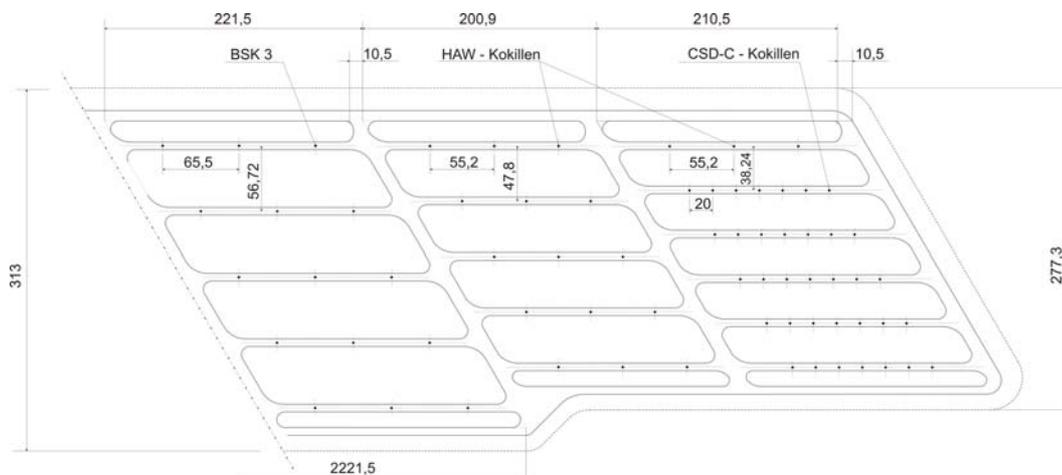


Abb. 3.2 Ausschnitt eines Grubengebäude für die Bohrlochlagerung von Brennstabkokillen (BSK 3), HAW-Kokillen und CSD-C im Wirtsgestein Salz

Im Folgenden wird die Streckenlagerung von POLLUX-Behältern und die Bohrlochlagerung von Brennstabkokillen und WA-Abfällen in generischen Einlagerungsfeldern beschrieben.

Streckenlagerung von POLLUX-Behältern

Für die Streckenlagerung der POLLUX-Behälter (POLLUX-10) werden Feldgrößen von ca. 277 m x 300 m betrachtet. Um die Gesamtanzahl von 2.045 POLLUX-Behältern einzulagern sind 8 Einlagerungsfelder erforderlich. Je Einlagerungsfeld sind 8 Einlagerungsstrecken mit jeweils 36 POLLUX-Behältern vorgesehen.

Bohrlochlagerung von Brennstabkokillen

Für die Bohrlochlagerung der Brennstabkokillen (BSK 3) werden Feldgrößen von ca. 221,5 m x 313 m betrachtet. Um die Gesamtanzahl von 6.917 Brennstabkokillen einzulagern sind 9,5 Einlagerungsfelder erforderlich. Je Einlagerungsfeld sind 5 Einlagerungsstrecken mit jeweils 3 Bohrlöchern und 48 Brennstabkokillen je Bohrloch vorgesehen.

Bohrlochlagerung von HAW-Kokillen

Für die Bohrlochlagerung der HAW-Kokillen werden Feldgrößen von ca. 200,9 m x 277,3 m betrachtet. Um die Gesamtanzahl der 3.767 HAW-Kokillen einzulagern ist 1 Einlagerungsfeld und zusätzlich 1 weitere Einlagerungsstrecke, beispielsweise im Einlagerungsfeld der CSD-C, erforderlich. In dem Einlagerungsfeld sind 5 Einlagerungsstrecken mit jeweils 3 Bohrlöchern und 215 HAW-Kokillen je Bohrloch vorgesehen.

Bohrlochlagerung von CSD-B

Die Bohrlochlagerung der insgesamt 560 CSD-B kann in 3 Bohrlöchern mit bis zu 215 CSD-B je Bohrloch, beispielsweise im Einlagerungsfeld der CSD-C, erfolgen.

Bohrlochlagerung von CSD-C

Für die Bohrlochlagerung der CSD-C werden Feldgrößen von ca. 210,5 m x 277,3 m betrachtet. Um die Gesamtanzahl von 6.902 CSD-C einzulagern ist 1 Einlagerungsfeld erforderlich. In dem Einlagerungsfeld sind 6 Einlagerungsstrecken mit jeweils 7 Bohrlöchern und 215 CSD-C je Bohrloch vorgesehen.

4 Inventar chemischer und chemotoxischer Stoffe eines HAW-Endlagers im Wirtsgestein Ton

4.1 Chemische und chemotoxische Stoffe der wärmeentwickelnden radioaktiven Abfälle

Bei „Untersuchungen zur sicherheitstechnischen Auslegung eines generischen Endlagers im Tonstein in Deutschland“ (GENESIS) <DBE 2007> wurden hinsichtlich einer möglichen Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen in Tonformationen für verschiedene Referenzmodellgebiete zwei Konzepte der Einlagerung betrachtet: zum einen die Bohrlochlagerung von HAW-Kokillen sowie von Brennstäben ausgedienter Brennelemente in Brennstabkokillen und alternativ dazu die Streckenlagerung von Brennstäben ausgedienter Brennelemente in POLLUX-Behältern.

In Kapitel 3 dieses Berichts ist das Inventar der chemischen und chemotoxischen Stoffe der Endlagergebinde mit wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen in einem HAW-Endlager im Salz beschrieben. Die Materialien und Massen der Abfallprodukte der Endlagergebinde und die daraus ermittelten Massen an chemotoxischen Stoffen sind für den Fall einer Endlagerung im Ton weitestgehend identisch.

Im Vorhaben GENESIS <DBE 2007> werden für die Endlagerung gezogener Brennstäbe ausgedienter Brennelemente modifizierte POLLUX-Behälter mit den Brennstäben von 3 DWR-BE anstelle von 10 DWR-BE betrachtet. Eine Auslegung der modifizierten POLLUX-Behälter ist bisher nicht erfolgt. Der Aufbau eines POLLUX-3 wird aber ähnlich dem des POLLUX-10 sein, sodass von den gleichen chemischen und chemotoxischen Stoffen in den Behältermaterialien ausgegangen werden kann.

Weiterhin werden bei der Bohrlochlagerung zwei verschiedene Einlagerungsvarianten unterschieden. Variante A geht von einer Ummantelung des Behälters mit 30 cm Bentonit aus. Variante B beinhaltet zusätzlich eine wärmeverteilende Schicht (z. B. Sand) von 20 cm Stärke. Bei der Streckenlagerung wird der POLLUX-Behälter von einer 20 cm mächtigen Sandschicht und einer 30 cm mächtigen Abdichtung aus Bentonit (z. B. Bentonit-Formsteine) allseitig umschlossen. In dieser Unterlage werden graphitisierter Bentonit und Sand als Versatz- und Barrierematerial betrachtet; auf die chemische Zusammensetzung wird in Kapitel 4.2 eingegangen.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die in Kapitel 3 dargestellten chemischen und chemotoxischen Stoffe der Endlagergebinde mit wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen auch für den Fall einer Endlagerung im Ton herangezogen werden können.

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

Bei den aus heutiger Sicht in Betracht kommenden Baustoffen für Versatz- und Barrierematerialien handelt es sich um Ausbruchmaterialien und artverwandte Gesteine, Schotter, hydraulisch abbindende Baustoffe, Bentonit, modifizierte Tone und organische Baustoffe <DBE 2004>. Ihre Zusammensetzung ist in den jeweiligen Unterkapiteln beschrieben. Die Tab. 4.10 gibt einen Überblick über die Anteile der chemotoxischen Stoffe in den unterschiedlichen Versatz- und Barrierematerialien.

4.2.1 Chemische und chemotoxische Stoffe der Versatzmaterialien

Ausbruchmaterial und artverwandte Gesteine

Zur Verfüllung untertägiger Hohlräume ist der Einsatz vom Ausbruchmaterial, dass bei der Bergwerksauffahrung gewonnen wurde, denkbar. Möglich ist ferner der Einsatz artverwandter Gesteine, wie Tone und Mergel, die an anderen Lokalisationen gewonnen werden. <DBE 2004> Die Tab. 4.1 enthält beispielhaft die durchschnittliche Zusammensetzung des anstehenden Gebirges (Tongestein: Alb, Barrême) im Bereich der Schachtanlage Konrad <ECKHARDT 1989>.

Tab. 4.1 Zusammensetzung von Ausbruchmaterial im Bereich der Schachtanlage Konrad

Mineralname/Verbindung	Alb	Barrême
	Masse [%]	Masse [%]
SiO ₂	56,8	50,7
TiO ₂	0,6	0,9
Al ₂ O ₃	11,2	17,7
ΣFe als Fe ₂ O ₃ ¹⁾	3,9	6,2
MnO	0,03	0,02
MgO	1,3	1,3
CaO	8,4	3,4
Na ₂ O	1,5	1,0
K ₂ O	2,0	2,7
P ₂ O ₅	0,06	0,07
SO ₃	0,3	0,3
Glühverlust	13,9	15,7

¹⁾ FeO x 1,11 + Fe₂O₃

In den betrachteten Zusammensetzungen des Tongesteins wurden keine chemotoxischen Stoffe identifiziert.

4.2.2 Chemische und chemotoxische Stoffe der Barriermaterialien

Schotter

Im Rahmen der Verfüllung von Schächten kommt auch Basalt- und/oder Diabasschotter zur Erstellung einer setzungsstabilen Füllsäule als Baustoff in Betracht. <DBE 2004> Die Tab. 3.27 (vgl. Kapitel 3.2.2) enthält beispielhaft die (unveröffentlichte) Zusammensetzung des Diabasschotters vom Steinbruch Huneberg (Mineralgemisch 32/80).

Hydraulisch abbindende Baustoffe

Die hydraulisch abbindenden Baustoffe können den Gruppen Beton, Mörtel sowie Spritzbeton zugeordnet werden. Betone und Mörtel unterscheiden sich im wesentlichen in der Korngröße des Zuschlages. Die Unterschiede eines Betons oder Mörtels zu einem Spritzbeton beruhen insbesondere auf der Modifizierung der Baustoffkomponenten in Bezug auf die Verarbeitbarkeit und Einbringung des Baustoffs. Hydraulisch abbindende Baustoffe (vgl. <DIN 2001>) bestehen aus den Komponenten

- Zement (im Hinblick auf den Arbeitsschutz dürfte ein chromatreduzierter Zement zum Einsatz kommen),
- ggf. Betonzusatzstoff des Typs I (nahezu inaktive Stoffe, wie Quarz- und Gesteinsmehle wie z. B. Kalkstein- und Tonmehl),
- ggf. Betonzusatzstoff des Typs II (puzzolanische oder latent-hydraulische Stoffe, die aktiv am Abbindeprozess des Baustoffs teilnehmen),
- Zuschlag (Sand, Kies, Kalkstein etc.),
- Wasser sowie
- ggf. Betonzusatzmitteln in organischer oder anorganischer Form (Stoffe, die die Eigenschaften des frischen oder festen, d. h. abgebundenen Baustoffs verändern, wie Fließmittel oder Luftporenbildner). <DBE 2004>

In der Tab. 4.2 ist die einzige im Zusammenhang mit der Endlagerung von hochradioaktiven und wärmentwickelnden Abfällen im Tongestein veröffentlichte Rezeptur für Beton aufgeführt. Diese Zusammensetzung bezieht sich auf Beton, der bei den derzeit in Belgien favorisierten Endlagergebänden, den Supercontainern für HAW-Kokillen und ausgedienten Brennelementen, zum Einsatz kommt <ONDRAF / NIRAS 2006>.

Tab. 4.2 Zusammensetzung des Betons für den belgischen Supercontainer

Mineralname/Verbindung		Masse
Calciumcarbonat CaCO ₃	Korngröße 8 bis 20 mm	800 kg/m ³
	Korngröße 4 bis 12 mm	400 kg/m ³
	Korngröße 0,5 bis 4 mm	750 kg/m ³
Portlandzement CEM I ¹⁾	Spezifische Oberfläche < 3000 g/cm ²	300 kg/m ³
Wasser		150 kg/m ³

¹⁾ Die Zusammensetzung des Portlandzements CEM I ist in der Tab. 4.3 dargestellt.

Aufgrund der hohen Hydratationswärme ist dieser Beton allerdings nicht als Versatz- und Barrierematerial für ein HAW-Endlager im Ton geeignet.

Zement

Nach DIN EN 197-1 werden fünf Zementarten unterschieden:

- CEM I Portlandzement,
- CEM II Portlandkompositezement,
- CEM III Hochofenzement,
- CEM IV Puzzolanzement und
- CEM V Kompositezement.

Davon ist CEM I Portlandzement mit einem Anteil von über 75 % die bei weitem wichtigste Zementart. Die Rohstoffe für die Herstellung von Portlandzement sind in erster Linie Kalk und Ton oder ihre „natürlichen Gemische“ Kalkmergel bzw. Mergelkalk. Portlandzement wird hergestellt durch die Vermahlung von Klinker und Gips bzw. Anhydrit. In der Tab. 4.3 ist die Zusammensetzung von CEM I Portlandzement nach EN 197/ DIN 1164 <BENEDIX 2003> aufgeführt.

Tab. 4.3 Zusammensetzung von CEM I Portlandzement

Mineralname/Verbindung	Masse [%]
CaO	61 – 69
SiO ₂	18 – 24
Al ₂ O ₃	4 – 8
Fe ₂ O ₃ (FeO)	1 – 4
MgO	0,5 – 4
SO ₃	2 – 3,5
Mn ₂ O ₃ (MnO)	0 – 0,5

Die Hauptzementarten CEM II bis CEM V werden hinsichtlich der Zusammensetzung ihrer wichtigsten Bestandteile, z. B. Portlandzementklinker und Hüttsand, unterteilt. Der CEM III Hochofenzement eignet sich aufgrund seiner niedrigen Hydratationswärme hervorragend zur Herstellung von Massenbetonen. Die Tab. 4.4 zeigt die Bandbreiten der Bestandteile verschiedener CEM III Hochofenzemente.

Die Kurzzeichen A, B und C weisen auf die (von A nach C) steigende Menge des Zusatzstoffes Hüttensand hin.

Tab. 4.4 Bandbreiten der Bestandteile verschiedener CEM III Hochofenzemente

Bestandteile	CEM III/A	CEM III/B	CEM III/C
	Masse [%]	Masse [%]	Masse [%]
Portlandzementklinker	35 – 64	20 – 34	5 - 19
Hüttensand	36 – 65	66 – 80	81 - 95

Hinsichtlich der Zusammensetzung von Portlandzementklinker wird auf die Tab. 4.3 verwiesen. Bei Hüttensand handelt es sich um granulierten, amorphe Hochofenschlacke, die latent hydraulische Eigenschaften besitzt. Als Hüttensand sind nur basische Schlacken einsetzbar. In der Tab. 4.5 ist die Zusammensetzung von basischer Hochofenschlacke nach <BENEDIX 2003> aufgeführt.

Tab. 4.5 Zusammensetzung von Hüttensand (als Bestandteil von CEM III Hochofenzement)

Mineralname/Verbindung	Masse [%]
CaO	40 – 50
SiO ₂	28 – 40
Al ₂ O ₃	10 – 15
MgO	1 - 10

In den betrachteten Zusammensetzungen des CEM I Portlandzement und CEM III Hochofenzement wurden keine chemotoxischen Stoffe identifiziert.

Betonzusatzstoff des Typs I

Die Betonzusatzstoffe des Typs I sind inerte Stoffe (wie Quarz- und Gesteinsmehle, z. B. Kalkstein- und Tonmehl), die nicht oder nur im geringen Maße an den Hydratationsreaktionen teilnehmen. Sie dienen der Erhöhung des Mehlkornanteils im Beton und damit einer Verbesserung der rheologischen Eigenschaften.

Quarzmehle bestehen aus SiO₂. Bei Kalksteinmehl liegt der Anteil an CaCO₃ über 90 % <BENEDIX 2003>. Die Zusammensetzung von Tonmehl entspricht der von Bentonit und ist in Tab. 3.19 und Tab. 3.20 dargestellt (vgl. Kapitel 3.2.2).

In den betrachteten Zusammensetzungen der Betonzusatzstoffe Quarzmehl, Kalksteinmehl und Tonmehl wurden keine chemotoxischen Stoffe identifiziert.

Betonzusatzstoff des Typs II

Betonzusatzstoffe des Typs II sind puzzolanische oder latent-hydraulische Stoffe, die aktiv am Abbindeprozess des Baustoffs teilnehmen. Sie leisten einen Beitrag zum Erzielen der Festbetoneigenschaften und dienen darüber hinaus zur Einstellung rheologischer Materialeigenschaften. Jedoch ist bei der Auswahl der Betonzusatzstoffe die Begrenzung der Wärmeentwicklung beim Abbindeprozess zu beach-

ten. Zu den genormten Betonzusatzstoff des Typs II gehören nach DIN EN 206-01 Silikastaub (DIN EN 13263), z. B. das Produkt Mikrosilika, und puzzolanische Stoffe, z. B. siliciumreiche Steinkohlenflugasche (DIN EN 450).

Puzzolane sind kieselsäurehaltige Stoffe, die weder unmittelbar mit Wasser hydraulisch erhärten können noch über ein latentes Erhärungsvermögen verfügen. Dazu fehlt ihnen insbesondere der für die Hydratationsprozesse notwendige Kalk. Sie besitzen jedoch die Fähigkeit, mit $\text{Ca}(\text{OH})_2$ in wässriger Lösung unter Bildung hydraulischer Erhärungsprodukte zu reagieren. Es wird unterschieden zwischen natürlichen und künstlichen Puzzolanen.

Zu den natürlichen Puzzolanen zählen u. a. vulkanische Tuffe mit hohem Gehalt an reaktiver Kieselsäure. Eine besondere Bedeutung besitzt der Traß, ein feingemahlener, saurer vulkanischer Tuff. In der Tab. 4.6 ist die allgemeine Zusammensetzung von Traß nach <BENEDIX 2003> aufgeführt.

Tab. 4.6 Zusammensetzung von Traß

Mineralname/Verbindung	Masse [%]
SiO_2	50 - 67
Al_2O_3	14 - 20
Fe_2O_3	2 - 5
CaO, MgO	< 10
Alkalien ¹⁾	3 - 8
Wasser	5 - 8

¹⁾ Alkalien sind Substanzen, deren wässrige Lösung alkalisch reagiert. Zu den Alkalien zählen vor allem die Hydroxide der Alkalimetalle. Alkalimetalle sind Lithium (Li), Natrium (Na), Kalium (K), Rubidium (Rb), Cäsium (Cs) und Francium (F).

Zu den als Zusatzstoffen eingesetzten künstlichen Puzzolanen gehören in erster Linie Flugaschen und Silicastaub. Flugaschen fallen bei der Verbrennung von Kohle in Wärmekraftwerken an. In der Tab. 4.7 ist die allgemeine Zusammensetzung von Steinkohlenflugasche (SFA) nach <BENEDIX 2003> aufgeführt. Ergänzend dazu sind die Hauptkomponenten von Steinkohlenflugasche nach <HERBERT et al 2000> in der Tab. 4.8 aufgeführt. Silikastaub, auch Mikrosilica oder Silica, fällt bei der Gewinnung von Silicium und Siliciumlegierungen an. Der Anteil an SiO_2 liegt zwischen 80 und 99 % <BENEDIX 2003>.

Tab. 4.7 Zusammensetzung von Steinkohlenflugasche <BENEDIX 2003>

Mineralname/Verbindung	Masse [%]
SiO_2	45 – 55
Al_2O_3	25 – 35
Fe_2O_3	5 – 15
CaO, MgO	Keine Angabe
Na_2O , K_2O	Keine Angabe

Tab. 4.8 Hauptbestandteile von Steinkohlenflugasche <HERBERT et al 2000>

Mineralname/Verbindung	Masse [mg/kg]	Masse [%]
Al	81.012	17,59
Ca	151.214	32,84
Cl	40.340	8,76
K	22.553	4,90
Mg	9.473	2,06
S	29.099	6,32
Si	126.750	27,53

In der betrachteten Zusammensetzungen des Traß wurden keine chemotoxischen Stoffe identifiziert. In den betrachteten Zusammensetzungen der Steinkohlenflugasche wurde Chlor (Cl) identifiziert. Es ist nicht bekannt, ob es in Form von Chlorid (Cl^-) und damit als chemotoxischer Stoff vorliegt.

Zuschlag

Als Zuschlagstoffe kommen beispielsweise Sand und Kies (SiO_2) und Kalkstein (CaCO_3) in Betracht.

Es liegen keine Informationen vor, dass chemotoxische Stoffe Bestandteil der Zuschlagstoffe sind.

Betonzusatzmittel

Betonzusatzmittel sind Stoffe, die die Eigenschaften des frischen oder festen, d. h. abgebundenen Baustoffs verändern. Dazu zählen auch Fließmittel und Luftporenbildner. Zusatzmittel, häufig organisch, werden in der Stoffbilanz des Mehrstoffgemisches nicht berücksichtigt, d. h. der Mengenanteil ist nach DIN EN 206, Teil 1 kleiner als 50 g pro kg Bindemittel bzw. Zement.

Es liegen keine Informationen vor, dass chemotoxische Stoffe Bestandteil der Betonzusatzmittel sind.

Spritzbeton

Spritzbeton ist ein Beton, der in einer geschlossenen Rohr-/Schlauchleitung zur Einbaustelle gefördert, dort aus einer Spritzdüse pneumatisch aufgetragen und durch die Aufprallenergie verdichtet wird. Spritzbeton kann man als ein Fünf-Stoff-System betrachten, das aus folgenden Komponenten besteht:

- Bindemittel
- Zuschlagstoff
- Wasser
- Zusatzmittel (Abbindebeschleuniger)
- ggf. Zusatzstoffe (Flugasche und Silikastaub)

Bei der Zementauswahl müssen teilweise entgegenlaufende Forderungen nach hoher Festigkeit und insbesondere Frühfestigkeit (kurze Ausschalzeiten) einerseits und niedriger Abbinde-temperaturen zur Rissvermeidung andererseits optimiert werden. Als Bindemittel haben sich Portlandzemente CEM I und gelegentlich Hochofenzemente CEM III mit hoher Festigkeitsentwicklung bewährt. Gelegentlich werden 1 bis 1,5 % Gips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$) zur Steuerung des Erstarrungsbeginnes und zur Verarbeitbarkeit hinzugegeben.

In Bezug auf die Dauerhaftigkeit kommt der chemischen Beständigkeit der Zuschlagstoffe große Bedeutung zu. Aufgrund der zu erwartenden Porenlösungen in Tongesteinen werden Kalksplitte und Kalkbrechsande eingesetzt.

Als Zusatzmittel kommen Abbindebeschleuniger, häufig organisch, zum Einsatz. Diese werden in der Stoffbilanz des Mehrstoffgemisches nicht berücksichtigt, d. h. der Mengenanteil ist nach DIN EN 206, Teil 1 kleiner als 50 g pro kg Bindemittel bzw. Zement.

Die Zusammensetzungen der ggf. zum Einsatz kommender Zusatzstoffe (Flugasche und Silikastaub) sind bereits als „Betonzusatzstoff des Typs II“ beschrieben.

Die Zusammensetzung von Spritzbeton entspricht dem eines normalen, zementreichen Betons, in der Regel zwischen 340 kg/m^3 und 450 kg/m^3 Zement <TUM 2007> und Zuschlag z. B. in Form von Kalksplitte und Kalkbrechsande. Eine Rezeptur für das Trockenspritzverfahren, die sich bewährt hat, ist in der Tab. 4.9 aufgeführt; dabei ist zusätzlich die Zugabe von Wasser zu berücksichtigen (w/z -Wert $< 0,5$).

Tab. 4.9 Zusammensetzung von Spritzbeton

Mineralname/Verbindung	Masse [%]
Muschelkalksplit und -brechsand (Calciumcarbonat CaCO_3)	85
Portlandzement CEM I ¹⁾	15
Erstarrungsbeschleuniger	< 1

¹⁾ Die Zusammensetzung des Portlandzements CEM I ist in der Tab. 4.3 dargestellt.

In der betrachteten Zusammensetzung des Spritzbetons wurden keine chemotoxischen Stoffe identifiziert.

Bentonit

Die Zusammensetzung der beiden meist verwendeten Bentonite

- SPV Volclay, Na-Bentonit, USA
- Calcigel (früher Montigel), Ca-Bentonit, Deutschland

ist in der Tab. 3.19 (vgl. Kapitel 3.2.2) beschrieben.

Nach den vorliegenden Konzepten zur Endlagerung hochradioaktiver Abfälle im Ton ist die Verwendung von Bentonit in unterschiedlichen Arten vorgesehen, z. B.

- Graphitisierter Bentonit,
- Bentonit-Quarzsand-Mischungen,
- Bentonit-Gesteinsmehl-Mischungen,
- Bentonit-Abraum-Mischungen,
- DYWIDAG-Mineralgemisch (Mischung aus Kies, Sand und Bentonitmehl) <DBE 2004>.

Es liegen keine Informationen vor, dass chemotoxische Stoffe Bestandteil dieser modifizierten Bentonite sind.

Modifizierte Tone

Bei Tongesteinen ist im Hinblick auf die Rückhaltung von Radionukliden neben der Gesteinsdurchlässigkeit die Sorption gelöster Schadstoffe zu berücksichtigen. Bei Tonmineralen und demnach ebenso bei Bentoniten ist jedoch die Anionenadsorption eingeschränkt. Forschungsarbeiten belegen, dass die Anionenadsorption von Smektit oder Vermiculit ansteigt, wenn die anorganischen gegen organische Zwischenschicht-Kationen ausgetauscht werden wodurch jedoch die Kationenaustauschkapazität sinkt. <DBE 2004>

Für das Anwendungsgebiet der Grundwassersanierung werden Barrieren mit Sorptions- und Molekularsiebwirkungen untersucht. Ein Konzept mit einer solchen reaktiven Barriere aus einer Sand-Bentonit-Zeolith-Mischung wurde in <CZURDA et al 1998> vorgestellt. Die Zeolithe werden aus Steinkohlenflugasche durch einen hydrothermalen Prozess gewonnen. In Abhängigkeit von der Molarität der NaOH-Laugen (Natriumhydroxid), der Temperatur, der Reaktionszeit und der Zusammensetzung der Flugaschen entstehen unterschiedliche Zeolith-Phasen.

Auch im Rahmen der Endlagerung radioaktiver Abfälle wäre der Einsatz solcher Materialien denkbar. Es liegen keine Informationen vor, dass chemotoxische Stoffe Bestandteil der modifizierten Tone sind.

Organische Baustoffe

Für Kurzzeitdichtungen werden die organischen Materialien Bitumen, Asphalt und Teer betrachtet. Bezüglich der chemischen Zusammensetzung wird auf Kapitel 3.2.2 verwiesen.

Tab. 4.10 Anteile chemotoxischer Stoffe in Versatz- und Barrierematerialien in einem HAW-Endlager im Wirtsgestein Ton

Anorganische Parameter	Ausbruchmaterial [%]	Schotter [%]	Hydraulisch abbindende Baustoffe										Bentonit Ca-Bentonit Bentonit- Mischungen [%]					
			PLZ CEM I HOZ CEM III [%]	Quarzmehl Kalksteinmehl Tonmehl [%]	Traß [%]	Steinkohlen- flugasche /BENEDIX [%]	Steinkohlen- flugasche /HERBERT [%]	Silika- staub [%]	Sand Kies Kalkstein [%]	Betonzusatz- mittel [%]	Spritz- beton [%]							
Antimon (Sb)																		
Arsen (As)																		
Barium (Ba)																		
Blei (Pb)																		
Bor (B)																		
Cadmium (Cd)																		
Chrom (Cr III)																		
Kobalt (Co)																		
Kupfer (Cu)																		
Molybdän (Mo)																		
Nickel (Ni)																		
Quecksilber (Hg)																		
Selen (Se)																		
Thallium (Tl)																		
Uran (U)																		
Vanadium (V)																		
Zink (Zn)																		
Chlorid (Cl ⁻)																		
Cyanid (CN ⁻)																		
Fluorid (F ⁻)																		
Sulfat (SO ₄ ²⁻)																		
Σ chemotoxische Stoffe																		

Mengenanteil ist nach DIN EN 206, Teil 1 < 50 g/kg
Bindeanteil bzw. Zement und wird in der Stoffbilanz nicht
berücksichtigt.

4.3 Chemische und chemotoxische Stoffe der Materialien für den Schachtausbau

Schachtausbaumaterialien

Bezüglich der Beschreibung der Schachtausbaumaterialien wird auf Kapitel 3.3 verwiesen.

Streckenausbaumaterialien

Zum Ausbau von Strecken ist ggf. der Einsatz von Spritzbeton vorgesehen. Hinsichtlich der Zusammensetzung wird auf Tab. 4.9 (vgl. Kapitel 4.2.2) verwiesen.

4.4 Auslegung des Grubengebäudes

Im Rahmen des Vorhabens ERATO erfolgt eine Auslegung des Grubengebäudes im Wirtsgestein Ton für die Streckenlagerung von POLLUX-Behältern und für die Bohrlochlagerung von Brennstabkokillen sowie HAW-Kokillen, CSD-B und CSD-C in 50 m tiefen Bohrlöchern <ERATO 2008>. Dieses Vorhaben ist derzeit in Bearbeitung; die in diesem Bericht vorgestellten Teilergebnisse/Daten sind daher als vorläufig anzusehen.

Streckenlagerung von POLLUX-Behältern

Für die Streckenlagerung der POLLUX-Behälter (POLLUX-3) sind insgesamt 401 Einlagerungsstrecken mit jeweils 17 POLLUX-Behältern erforderlich. Die Anzahl der Einlagerungsstrecken pro Einlagerungsfeld variiert zwischen 9 und 10. Jeweils 7 Einlagerungsfelder sind zu Einlagerungsabteilungen zusammengefasst. Die Abb. 4.1 zeigt beispielhaft eine Variante des Grubengebäudezuschnitts für die Streckenlagerung von POLLUX-Behältern.

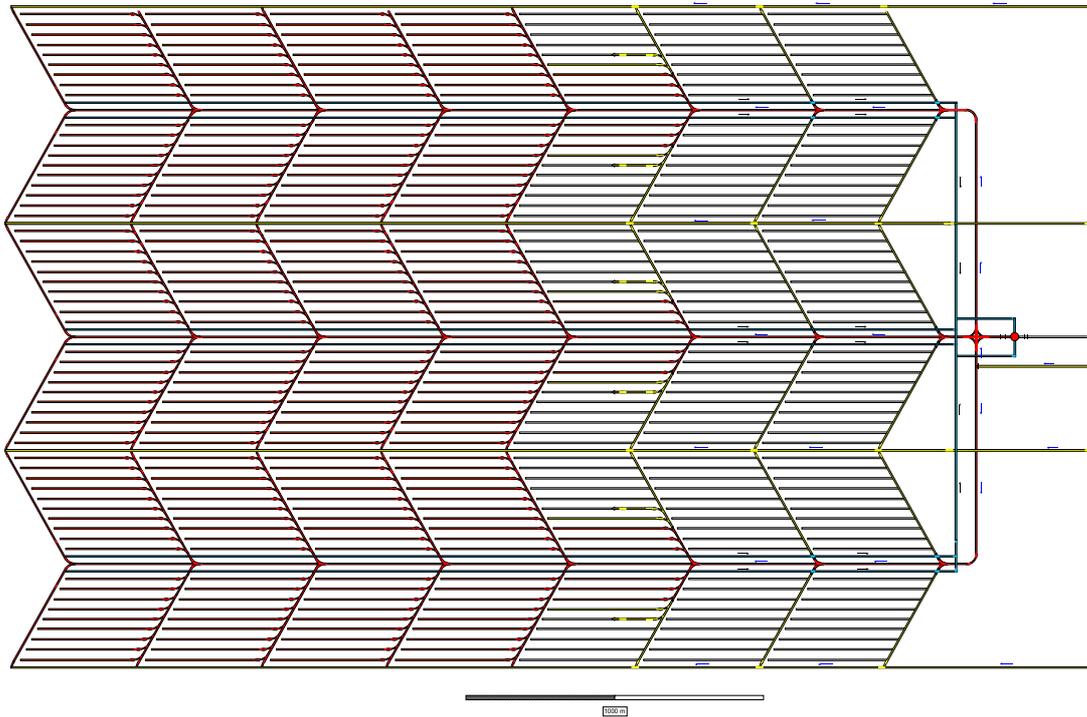


Abb. 4.1 Grubengebäudezuschnitt für die Streckenlagerung von POLLUX-Behältern (POLLUX-3) im Wirtsgestein Ton

Bohrlochlagerung von Brennstabkokillen

Für die Bohrlochlagerung der Brennstabkokillen (BSK 3) sind insgesamt 171 Einlagerungsstrecken mit jeweils 8 Bohrlöchern und 5 Brennstabkokillen je Bohrloch erforderlich. Die Anzahl der Einlagerungsstrecken pro Einlagerungsfeld liegt bei 9. Jeweils 5 Einlagerungsfelder sind zu Einlagerungsabteilungen zusammengefasst. Die Abb. 4.2 zeigt beispielhaft eine Variante des Grubengebäudezuschnitts für die Bohrlochlagerung von Brennstabkokillen.

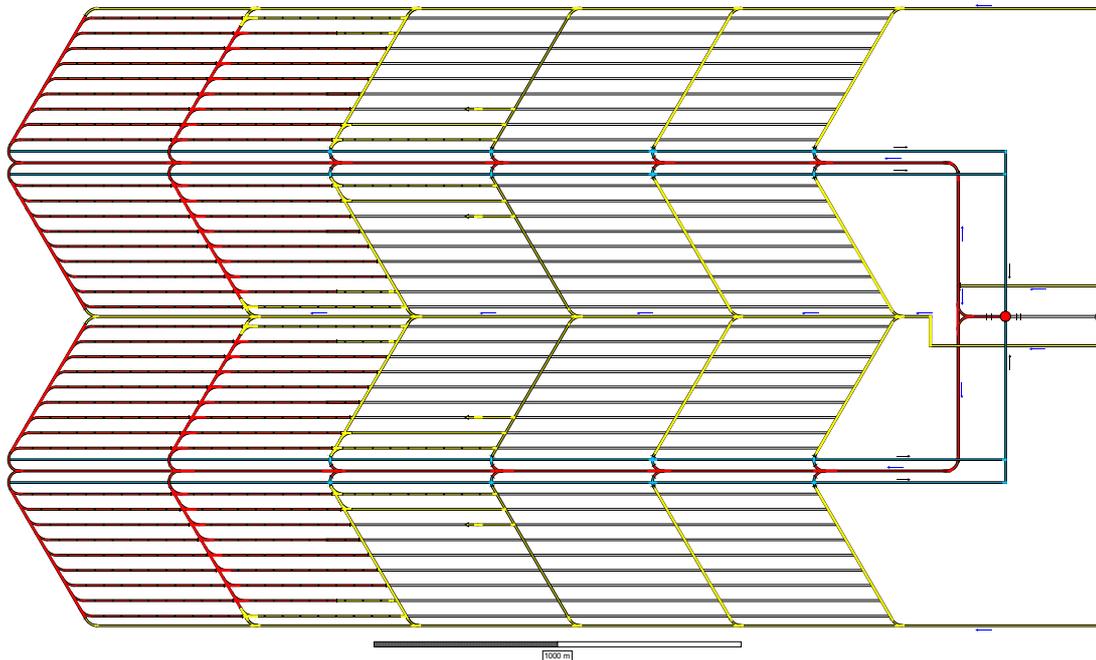


Abb. 4.2 Grubengebäudezuschnitt für die Bohrlochlagerung von Brennstabkokillen (BSK 3) im Wirtsgestein Ton

Die Planungen des Gebäudezuschnitts für die Bohrlochlagerung von HAW-Kokillen, CSD-B und CSD-C sind derzeit in Bearbeitung.

Literaturverzeichnis

- ANDRA 2004 ANDRA, Catalogue descriptif des familles de déchets radioactifs, édition 2004
- BAUMINERAL 2003 BauMineral GmbH, vorläufiges Sicherheitsdatenblatt, Steinkohlenflugasche, Produktname: MICROSIT, 03.03.2003
- BENEDIX 2003 Benedix, R.: Bauchemie, Einführung in die Chemie für Bauingenieure, 2. Auflage, B. G. Teubner Verlag, Wiesbaden, 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
- BMU 2003 Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Projektgruppe Nationaler Entsorgungsplan, RS III 2-13200/1, Arbeitsgrundlage Nationaler Entsorgungsplan für radioaktive Reststoffe, November 2003
- BOSSARD 2003 Bossard: Rost- und säurebeständige Verbindungselemente; 2003
- BUCHHEIM 2005 Buchheim Engineering, Ermittlung von Art und Menge chemotoxischer Stoffe in allen Arten radioaktiver Abfälle und Bewertung ihrer Freisetzung im Hinblick auf das Schutzziel des wasserhaushaltsgesetztes, Abschlußbericht, 28. Juni 2005, Rev. 0.4
- CZURDA et al 1998 Czurda, K. & Weiß, T.: Flugasche-Zeolithe als Sorptionsmedium in reaktiven Ton-Barrieren. Ber. DTTG e.V., Band 6 „Tone in der Geotechnik und Baupraxis“, S. 74–87, 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 2004 DBE TECHNOLOGY GmbH, Gegenüberstellung von Endlagerkonzepten in Salz und Tongestein (FKZ 02 E 9511), Sicherheit in der Nachbetriebsphase, Geochemie (A6), Dezember 2004 (Entwurf)
- 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
- DBE 2007 DBE TECHNOLOGY GmbH, Untersuchungen zur sicherheitstechnischen Auslegung eines generischen Endlagers im Tonstein in Deutschland - GENESIS -, Abschlussbericht, März 2007
- DBE 2008a DBE TECHNOLOGY GmbH, Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine sicherheitliche Bewertung von Endlagern für HAW – ISIBEL, AP 1.2 Konzeptionelle Endlagerplanung und Zusammenstellung des endzulagernden Inventars, Peine, April 2008

- DBE 2008b 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, Peine, April 2008
- DEUSA 2004 Deusa International GmbH, Sicherheitsdatenblatt Magnesiumchloridlösung 30 %, 02/2004
- DIN 2001 DIN Fachbericht 100: Beton – Zusammenstellung von DIN EN 206-1 Beton – Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität und DIN 1045-2 Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 2: Beton; Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität. 1. Auflage, 2001
- DOLDER 2006 <http://www.dolder-ing.ch/wissen/Werkstoffe/Werkstoffe-Staehle.htm>, Stand: März 2007
- ECKHARDT 1989 ECKHARDT, F.J.; RÖSCH, H. & BESANG, C. (1989), Mineralogische und geochemische Untersuchungen an Gesteinsproben der Bhg. Konrad 101. Laborbericht zu B 4-40445. BGR Hannover, Tgb.-Nr. B 4-10138/89-100-Ec/gu.
- ERATO 2008 DBE TECHNOLOGY GmbH, Abschlussbericht für das Vorhaben „Referenzkonzept für ein Endlager für radioaktive Abfälle in Tongestein“ ERATO – in Bearbeitung
- 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
- GNB 1998b Gesellschaft für Nuklear-Behälter, Beschreibung der Brennstabkockille BSK 3, GNB B 043/98, September 1998, Revision 0
- GNS 2004 Gesellschaft für Nuklear-Service, CASTOR MTR 2-Behälter, <http://www.gns-nuklearservice.de/generator.aspx/templated=renderPrint/doc=17470/lang=de/id=10650.html>, 16.02.2004
- GRS 2002 GRS, Endlager Morsleben – Zementkorrosion, Abschlussbericht von GRS und IBMB, Projekt Morsleben PSP-Element 9M 232200-11/12, GRS-A-3034, April 2002
- GRS 2007 Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Radionuclide transport modeling, Performance assessment of repositories in clays, GRS-228, Dezember 2007
- GRS 2008 GRS Braunschweig, Untersuchungen zur Ermittlung und Bewertung von Freisetzungsszenarien, Bericht GRS-233, April 2008
- HERBERT et al 2000 Herbert, H.-J., Meyer, Th.: The long-term behavior of cement based backfill materials in salt formations, veröffentlicht in Salt 2000, 8th World Salt Symposium, Volume 2, 2000, S. 871

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
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 Innenausbau 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. & Skrzypek, J.; On Backfill Materials for an Underground Repository. Proc. DisTec2000, Sept. 4-6, 2000, section 7, pp. 640-645
KRAUKE et al 1999	Krauke, W., Klimpke, A. & Laske, D.: Verfüllen von Abbauhohlräumen im Kalilager mit Magnesiabinder. Abschlussbericht zum Projekt-Nr. 9 M 664120-31, Kali Umwelttechnik GmbH Sondershausen, 1999
KRAUKE 2004	Krauke, W.: Eigenschaften und Anwendungsgebiete basischer Magnesiumsalze als Dichtelemente im Strömungsbarrieren- 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
KTA 1988	KTA 3401.1: Reaktorsicherheitsbehälter aus Stahl, Teil 1: Werkstoffe und Erzeugnisformen; Fassung September 1988, BAnz Nr. 37a vom 22. Februar 1989
LANGFELD 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 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: <u>Werkstof-Gegevensblad</u> : G-AlMg3Si
METALLOGRAF H 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
ONDRAF / NIRAS 2006	Exchange meeting EIG Euridice-SCK/CEN-ONDRAF/NIRAS – June 6, 2006 (www.euridice.be/downloads/SCconcretemodelexchange6062006.ppt)
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
S&B 2007	Chemische Analysedaten S&B Bentonite, Info von Herrn Dr. Dietrich Koch, 05.12.2007
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
SÜD CHEMIE	Auszug Produktinformation Tixoton TE
THERMAX 2002	ThyssenKrupp Nirosta GmbH: Hitzebeständige Stähle THERMAX, Ausgabe 2, Stand 07/2002
TUM 2007	(http://www.bsi.bv.tum.de/skripten/Vertif/Skriptum%20Spritzbeton.pdf)
VDZ 2001	Verein deutscher Zementwerke e.V., Spurenelemente in deutschen Normzementen 2001
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
WTI 2006	Wissenschaftlich Technische Ingenieurberatung, CASTOR KNK, Zusammenfassende Darstellung der Behälterinventare, WTI/98/05, Revision 1, Januar 2006
WÜLFRATHER 1996	Wülfrather, Harzer Dolomitwerke GmbH, Produktdatenblatt Halbbranntdolomit, Ausgabe 04/96