

Auftraggeber: Bundesamt für Strahlenschutz (BfS),
Salzgitter

PSP-Nr.: WS 1004

Auftragnehmer: Buchheim Engineering, Fällanden/Schweiz

Titel des Projektes: Sicherheitstechnische Einzelfragen

Titel des Auftrages: Ermittlung von Art und Menge
chemotoxischer Stoffe in allen Arten
radioaktiver Abfälle und Bewertung ihrer
Freisetzung im Hinblick auf das Schutzziel
des Wasserhaushaltsgesetzes

Verfasser: B. Buchheim, H. von Fellenberg, D. Rohr
Fällanden, den 28. Juni 2005

Abschlussbericht

Buchheim Engineering, Fällanden/Schweiz

**Ermittlung von Art und Menge chemotoxischer
Stoffe in allen Arten radioaktiver Abfälle und
Bewertung ihrer Freisetzung im Hinblick auf das
Schutzziel des Wasserhaushaltsgesetzes**

Abschlussbericht

28. Juni 2005

Rev. 0.4

**B. Buchheim
Buchheim Engineering**

H. von Fellenberg, D. Rohr

Dieser Bericht wurde im Auftrag des Bundesamtes für Strahlenschutz (BfS) erstellt. Das BfS behält sich alle Rechte vor. Insbesondere darf dieser Bericht nur mit Zustimmung des BfS zitiert, ganz oder teilweise vervielfältigt bzw. Dritten zugänglich gemacht werden. Dieser Bericht gibt die Meinung und Auffassung des Auftragnehmers wider und muss nicht in jedem Fall mit der Meinung des BfS übereinstimmen.

Inhaltsverzeichnis

<u>Inhaltsverzeichnis</u>	I
<u>Verzeichnis der Tabellen</u>	III
<u>Verzeichnis der Abbildungen</u>	V
0 <u>„Executive Summary“</u>	1
1 <u>Einleitung</u>	8
2 <u>Herkunft und Rahmenbedingungen der einzulagernden Stoffe</u>	9
3 <u>Grundlagen zur Ermittlung grundwassergefährdender und chemotoxischer Stoffe</u>	11
3.1 <u>Grundwassergefährdende Stoffe</u>	11
3.1.1 <u>Liste I der Stofffamilien und Stoffgruppen</u>	11
3.1.2 <u>Liste II der Stofffamilien und Stoffgruppen</u>	12
3.2 <u>Chemotoxische Stoffe</u>	12
3.2.1 <u>Organisch chemotoxische Stoffe</u>	12
3.2.2 <u>Anorganisch chemotoxische Stoffe</u>	13
3.2.3 <u>Grundlagen zur Erstellung der Liste von chemotoxischen Stoffen</u>	13
4 <u>Materialien, Komponenten und Elemente im Gesamtinventar</u>	15
4.1 <u>Systematik der Erfassung und Datenauswertung</u>	15
4.1.1 <u>Datenbasis für die Erfassung des chemischen Inventars</u>	15
4.1.2 <u>Nomenklatur</u>	17
4.1.3 <u>Datenbasis für die Erfassung des Aktivitätsinventars</u>	18
5 <u>Ergebnisse der Erfassung des Masseninventars im salinaren bzw. nicht-salinaren Wirtsgestein</u>	19
5.1 <u>Masseninventar von Abfall und Versatzmaterial zum Gesamtinventar</u>	20
5.2 <u>Massenbeiträge der Versatzmaterialien für verschiedene Wirtsgesteine</u>	20
5.3 <u>Massen der Materialien</u>	20
5.4 <u>Massen von anorganischen und organischen Stoffen</u>	23
5.4.1 <u>Massen der anorganischen und organischen Stoffe pro Inventarszenario</u>	23
5.4.2 <u>Massenprozent der anorganischen und organischen Stoffe pro Inventarszenario</u>	24
5.4.3 <u>Massen der anorganischen und organischen chemotoxischen Stoffe (Auswahl)</u>	24
6 <u>Ergebnisse der Erfassung des Aktivitätsinventars inkl. Massenanteile Schwermetall kumulativ</u>	26
6.1 <u>Modellierung des gesamten Aktivitätsinventars an BE + W vs. Zeit, reale Akkumulation und Massenanteile Schwermetall in MTIHM</u>	26
6.2 <u>Modellierung des gesamten Aktivitätsinventars aller Abfälle vs. Zeit bei realer Akkumulation</u>	28
7 <u>Modellbetrachtungen zur Ermittlung von Konzentrationen für alle wasser-rechtlich relevanten Wasserinhaltsstoffe des Gesamtinventars im salinaren bzw. nicht-salinaren Wirtsgestein</u>	30
7.1 <u>Grundlagen für die Ermittlung der Konzentrationen</u>	30
7.2 <u>Vorgehensweise bei der Ermittlung der Konzentrationen wasserrechtlich relevanter Wasserinhaltsstoffe</u>	30
7.2.1 <u>Hypothetische vollständige Lösung aller wasserrechtlich relevanten Wasserinhaltsstoffe</u>	30
7.2.2 <u>Reale Löslichkeit von wasserrechtlich relevanten Wasserinhaltsstoffen in reinem Wasser</u>	30
7.2.3 <u>Reale Löslichkeit von wasserrechtlich relevanten Wasserinhaltsstoffen im Wasseranteil der gesättigten NaCl-Lösung</u>	30

7.3	<i>Konzentrationsänderungen bei abbaubaren organischen chemotoxischen Stoffen</i>	31
7.4	<i>Konzentrationseinstellung am Beispiel der anorganischen chemotoxischen Stoffe Kupfer und Blei in Wasser bzw. in salinaren Lösungen</i>	31
7.5	<i>Einfluss auf den pH-Wert infolge Wechselwirkung zutretender Wässer (Grundwasser) mit dem Versatzmaterial im Wirtsgestein</i>	32
8	<u>Ergebnisse der Prüfung auf Einhaltung der wasserrechtlichen Schutzziele im oberflächennahen Grundwasser unter Verwendung von unterstellten Resthohlraumvolumina und Verdünnungsfaktoren</u>	34
9	<u>Vergleich und Bewertung dieser modellmässig abgeleiteten Konzentrationen mit den Begrenzungen bzw. Grenzwerten aus den einschlägigen Verordnungen, Regelwerken oder Empfehlungen zum Grundwasserschutz</u>	47
10	<u>Bewertung der Überschreitungen sowie Empfehlung und Bewertung von Abhilfemassnahmen bei Überschreitungen von Grenzkonzentrationen bzw. Prüferten gelöster Wasserinhaltsstoffe</u>	49
10.1	<i>Bewertung der Überschreitungen bei einzelnen Kombinationen Basisinventar/ohne bzw. mit Versatzmaterial/Wirtsgestein/Resthohlraumvolumina</i>	49
10.2	<i>Empfehlung und Bewertung von Abhilfemassnahmen bei Überschreitungen von Grenzkonzentrationen bzw. Prüferten von gelösten Wasserinhaltsstoffen aus Basisinventar ohne bzw. mit Versatzmaterial pro Wirtsgestein und jeweiligen Resthohlraumvolumina</i>	50
11	<u>Wirtsgesteine im Vergleich und minimal notwendige Verdünnungswasservolumina</u>	52
11.1	<i>Die Verdünnungswasservolumina dominierender Wasserinhaltsstoffe</i>	56
11.2	<i>Zusammenfassende Bewertung</i>	57
12	<u>Literaturverzeichnis / Referenzen</u>	64
13	<u>Verzeichnis der Abkürzungen</u>	67
ANHANG A	<u>Detaillierte Ergebnisstabellen zum Masseninventar: Material-, Komponenten- und Elementinventar</u>	A1
ANHANG B	<u>Detaillierte Ergebnistabellen zur wasserrechtlichen Bewertung</u>	B1
ANHANG C	<u>Reale Akkumulation der radioaktiven Abfälle aller Herkunftskategorien</u>	C1
ANHANG D	<u>Ergebnisstabellen zum Aktivitätsinventar und Mengengerüst von BE + WA in MTIHM</u>	D1
ANHANG E	<u>Strahlenchemischer Abbau oder Aufbau chemotoxischer organischer Stoffe in radioaktiven Abfällen</u>	E1
ANHANG F	<u>Chemischer Abbau oder Aufbau chemotoxischer organischer Stoffe in radioaktiven Abfällen</u>	F1

Verzeichnis der Tabellen

- Tabelle 2-1: Liste der Herkunftskategorien
- Tabelle 5-1: Massenbeiträge der Herkunftskategorien zum Basisinventar
- Tabelle 5-2: Basisinventar (ohne Versatzmaterial) geordnet nach Abfall, Abfallbehälter, Fixierungsmittel und Verfüllmaterial in Mg und Ma-%
- Tabelle 5-3: Massen Basisinventar und Versatzmaterialien für verschiedene Wirtsgesteine
- Tabelle 5-4: Mengengerüst der Versatzmaterialien für die Wirtsgesteine
- Tabelle 5-5: Wichtigste Massenbeiträge der Materialien im Basisinventar (Inventar ohne Versatzmaterial)
- Tabelle 5-6: Massen der anorganischen und organischen Stoffe pro Inventarszenario in Mg
- Tabelle 5-7: Massenprozent der anorganischen und organischen Stoffe pro Inventarszenario in Ma.-%
- Tabelle 5-8: Mengengerüst für ausgewählte Wasserinhaltsstoffe im Basisinventar mit und ohne Versatzmaterialien
- Tabelle 6-1: Gesamtmasse Schwermetall [MTIHM] und Aktivität [Bq] der BE, welche der direkten Endlagerung zugeführt werden, bezogen auf den Referenzzeitpunkt 01.01.2030
- Tabelle 6-2: Gesamtmasse Schwermetall [MTIHM] und Aktivität [Bq] der aus der Wiederaufarbeitung zurückkommenden Abfälle, bezogen auf den Referenzzeitpunkt 01.01.2030
- Tabelle 6-3: Gesamtmasse Schwermetall [MTIHM] und Aktivität [Bq] des gesamten der Endlagerung zugeführten Inventars von BE und W, bezogen auf den Referenzzeitpunkt 01.01.2030
- Tabelle 6-4: Aktivität [Bq] des gesamten der Endlagerung zugeführten Inventars der o.g. Herkunftskategorien, bezogen auf den Referenzzeitpunkt 01.01.2030 und unterteilt in die acht Kategorien direkte Endlagerung (BE), Forschungseinrichtungen (F), Kerntechnische Industrie (I), Betriebsabfälle KKW (K), Landessammelstellen (L), Stilllegungsabfälle (S), sonstige Ablieferungspflichtige (U) sowie Wiederaufarbeitung (W)
- Tabelle 8-1: Anzahl Überschreitungen (ÜBS) der PW/GK im Grundwasser/Trinkwasser sowie betreffende Wasserinhaltsstoffe bei vorgegebenem **VF 500** und für drei Resthohlraumvolumina (s. Abb. 1, Tab. 8-6 und Anhang B, Abs. A.1.1)
- Tabelle 8-2: Anzahl Überschreitungen (ÜBS) der PW/GK im Grundwasser/Trinkwasser sowie betreffende Wasserinhaltsstoffe bei vorgegebenem **VF 5.000** und für drei Resthohlraumvolumina (s. Abb. 2, Tab. 8-6 und Anhang B, Abs. A.1.1)
- Tabelle 8-3: Anzahl Überschreitungen (ÜBS) der PW/GK im Grundwasser/Trinkwasser sowie betreffende Wasserinhaltsstoffe bei vorgegebenem **VF 50.000** und für drei Resthohlraumvolumina (s. Abb. 3, Tab. 8-6 und Anhang B, Abs. A.1.1)
- Tabelle 8-4: Minimal notwendiger Verdünnungsfaktor (VF) zur Einhaltung aller PW/GK im Grundwasser/Trinkwasser und Angabe desjenigen Wasserinhaltsstoffes mit dem **höchsten** Verdünnungsfaktor beim jeweiligen Resthohlraumvolumen (s. Abb. 4 und Anhang B, Abs. A.1.1)
- Tabelle 8-5: Minimal notwendiger Verdünnungsfaktor (VF) zur Einhaltung aller Prüfwerte im oberflächennahen Grundwasser bzw. Grenzkonzentrationen im Trinkwasser bei vorgegebenem Resthohlraumvolumen von 500.000 m³ ersichtlich (hier nur Wasserinhaltsstoffe, die mit Verdünnungsfaktor 5.000 noch Prüfwerte/Grenzkonzentrationen überschreiten); (s. Anhang B, Abs. A.1.1)

- Tabelle 8-6: Gesamtübersicht der **Anzahl Überschreitungen** der Prüfwerte (PW) im oberflächennahen Grundwasser bzw. der Grenzkonzentrationen (GK) im Trinkwasser und minimaler notwendiger Verdünnungsfaktor zur Einhaltung aller 120 untersuchten Prüfwerte bzw. Grenzkonzentrationen von Wasserinhaltsstoffen für verschiedene Wirtsgesteine/Versatzmaterialien, Löslichkeitsszenarien, Resthohlraumvolumina und Verdünnungsfaktoren für pH 8 (s. Anhang B, Abs. A.1.1.)
- Tabelle 8-7: Minimal notwendige **Verdünnungswasservolumina in Mia. m³** sowie Angabe des betreffenden Wasserinhaltsstoffes im Grundwasser/Trinkwasser zur Einhaltung aller Prüfwerte/Grenzkonzentrationen für drei Resthohlraumvolumina und Anwendung der realen Löslichkeiten (s. Abb. 5 + 7)
- Tabelle 8-8: Ausgewählte anorganische und organische Wasserinhaltsstoffe und deren X-fache Prüfwerte (PW) im oberflächennahen Grundwasser bzw. der Grenzkonzentrationen (GK) im Trinkwasser bei gleichem Verdünnungswasservolumen von **500 Mio. m³** bzw. **5 Mia. m³** an den Beispielen A.) „Inventar ohne Versatzmaterial, reale Löslichkeiten in reinem Wasser“ und B.) für das Wirtsgestein „Salinar“ mit „Reale Löslichkeiten in gesättigter NaCl-Lösung im Wasseranteil der ges. NaCl-Lösung“ für Resthohlraumvolumina von 100.000 m³ mit Verdünnungsfaktoren von 5.000 (= 500 Mio. m³) bzw. 50.000 (= 5 Mia. m³) vs. Resthohlraumvolumina von 1 Mio. m³ mit Verdünnungsfaktoren von 500 (=500 Mio. m³) bzw. 5.000 (= 5 Mia. m³) bei pH 8 (s. 6 S. alle Wirtsgesteine/Versatzmaterialien im Anhang B, Abs. A.1.2.)
- Tabelle 11-1: Minimal notwendige **Verdünnungswasservolumina in Mia. m³** im Grundwasser/Trinkwasser zur Einhaltung der Prüfwerte/Grenzkonzentrationen von Wasserinhaltsstoffen mit hohen Verdünnungswasservolumina bei mindestens einem Wirtsgestein (ausgehend von **100.000 m³** Resthohlraumvolumen; Wasserinhaltsstoffe mit $\geq 0,5$ **Mia. m³** Verdünnungswasservolumen pro Wirtsgestein bzw. ohne Versatzmaterial fett markiert)
- Tabelle 11-2: Minimal notwendige **Verdünnungswasservolumina in Mia. m³** im Grundwasser/Trinkwasser zur Einhaltung der Prüfwerte/Grenzkonzentrationen von Wasserinhaltsstoffen mit hohen Verdünnungswasservolumina bei mindestens einem Wirtsgestein (ausgehend von **500.000 m³** Resthohlraumvolumen; Wasserinhaltsstoffe mit $\geq 0,5$ **Mia. m³** Verdünnungswasservolumen pro Wirtsgestein bzw. ohne Versatzmaterial fett markiert)
- Tabelle 11-3: Minimal notwendige **Verdünnungswasservolumina in Mia. m³** im Grundwasser/Trinkwasser zur Einhaltung der Prüfwerte/Grenzkonzentrationen von Wasserinhaltsstoffen mit hohen Verdünnungswasservolumina bei mindestens einem Wirtsgestein (ausgehend von **1 Mio. m³** Resthohlraumvolumen; Wasserinhaltsstoffe mit $\geq 0,5$ **Mia. m³** Verdünnungswasservolumen pro Wirtsgestein bzw. ohne Versatzmaterial fett markiert)

Verzeichnis der Abbildungen

- Abb. 1: Anorganische und organische Wasserinhaltsstoffe (Parameter) von 120: Anzahl Überschreitungen der Prüfwerte (PW) im oberflächennahen Grundwasser bzw. Grenzkonzentrationen (GK) im Trinkwasser bei pH 8 und vorgegebener **500**-facher Verdünnung sowie unterstellten Hohlraumvolumina von 100.000 m³, 500.000 m³ bzw. 1 Mio. m³ in reinem Wasser (bei „nicht-salinaren“ Wirtsgesteinen) bzw. im Wasseranteil der gesättigten NaCl-Lösung (bei Wirtsgestein „Salinar“) bei realer Löslichkeit und für verschiedene Wirtsgesteine/ Versatzmaterialien verglichen mit dem Basisinventar
- Abb. 2: Anorganische und organische Wasserinhaltsstoffe (Parameter) von 120: Anzahl Überschreitungen der Prüfwerte (PW) im oberflächennahen Grundwasser bzw. Grenzkonzentrationen (GK) im Trinkwasser bei pH 8 und vorgegebener **5.000**-facher Verdünnung sowie unterstellten Hohlraumvolumina von 100.000 m³, 500.000 m³ bzw. 1 Mio. m³ in reinem Wasser (bei „nicht-salinaren“ Wirtsgesteinen) bzw. im Wasseranteil der gesättigten NaCl-Lösung (bei Wirtsgestein „Salinar“) bei realer Löslichkeit und für verschiedene Wirtsgesteine/ Versatzmaterialien verglichen mit dem Basisinventar
- Abb. 3: Anorganische und organische Wasserinhaltsstoffe (Parameter) von 120: Anzahl Überschreitungen der Prüfwerte (PW) im oberflächennahen Grundwasser bzw. Grenzkonzentrationen (GK) im Trinkwasser bei pH 8 und vorgegebener **50.000**-facher Verdünnung sowie unterstellten Hohlraumvolumina von 100.000 m³, 500.000 m³ bzw. 1 Mio. m³ in reinem Wasser (bei „nicht-salinaren“ Wirtsgesteinen) bzw. im Wasseranteil der gesättigten NaCl-Lösung (bei Wirtsgestein „Salinar“) bei realer Löslichkeit und für verschiedene Wirtsgesteine/ Versatzmaterialien verglichen mit dem Basisinventar
- Abb. 4: Anorganische und organische Wasserinhaltsstoffe (Parameter): Minimaler notwendiger Verdünnungsfaktor zur Einhaltung aller Prüfwerte (PW) im oberflächennahen Grundwasser bzw. Grenzkonzentrationen (GK) im Trinkwasser bei pH 8 bei unterstellten Hohlraumvolumina von 100.000 m³, 500.000 m³ bzw. 1 Mio. m³ in reinem Wasser (bei „nicht-salinaren“ Wirtsgesteinen) bzw. im Wasseranteil der gesättigten NaCl-Lösung (bei Wirtsgestein „Salinar“) und für verschiedene Wirtsgesteine/ Versatzmaterialien verglichen mit dem Basisinventar
- Abb. 5: Anorganische und organische Wasserinhaltsstoffe (Parameter): Minimal notwendiges Wasservolumen zur Einhaltung aller Prüfwerte (PW) im oberflächennahen Grundwasser bzw. Grenzkonzentrationen (GK) im Trinkwasser bei pH 8 bei unterstellten Hohlraumvolumina von **100.000 m³, 500.000 m³** bzw. **1 Mio. m³** in reinem Wasser (bei „nicht-salinaren“ Wirtsgesteinen) bzw. im Wasseranteil der gesättigten NaCl-Lösung (bei Wirtsgestein „Salinar“) bei realer Löslichkeit und für verschiedene Wirtsgesteine/ Versatzmaterialien verglichen mit dem Basisinventar
- Abb. 6: Anorganische und organische Wasserinhaltsstoffe (Parameter): Mehrfachgrafik der Abb. 1 – 3
- Abb. 7: Anorganische und organische Wasserinhaltsstoffe (Parameter): Mehrfachgrafik der Abb. 4 + 5
- Abb. 8: Verdünnungswasservolumina in **Mia. m³** für anorganische und organische Wasserinhaltsstoffe (Parameter) für das Wirtsgestein Salinar mit Resthohlraumvolumen **1 Mio. m³** und Anwendung der realen Löslichkeit in ges. NaCl-Lösung im Wasseranteil der ges. NaCl-Lösung bei pH 8: minimal notwendige Verdünnungswasservolumina zur Einhaltung aller Prüfwerte/Grenzkonzentrationen nach Anorganika und Organika getrennt dargestellt
- Abb. 9: Verdünnungswasservolumina in **Mia. m³** für anorganische und organische Wasserinhaltsstoffe (Parameter) für das Wirtsgestein Kristallin mit Resthohlraumvolumen **1 Mio. m³** und Anwendung der realen Löslichkeit in reinem Wasser bei pH 8: minimal notwendige Verdünnungswasservolumina zur Einhaltung aller Prüfwerte/Grenzkonzentrationen nach Anorganika und Organika getrennt dargestellt
- Abb. 10: Verdünnungswasservolumina in **Mia. m³** für anorganische und organische Wasserinhaltsstoffe (Parameter) für das Wirtsgestein Ton mit Resthohlraumvolumen **1 Mio. m³** und Anwendung der realen Löslichkeit in reinem Wasser bei pH 8: minimal notwendige Verdünnungswasservolumina zur Einhaltung aller Prüfwerte/Grenzkonzentrationen nach Anorganika und Organika getrennt dargestellt
- Abb. 11: Verdünnungswasservolumina in **Mia. m³** für anorganische und organische Wasserinhaltsstoffe (Parameter) für das Wirtsgestein Unter Tonüberdeckung mit Resthohlraumvolumen **1 Mio. m³** und Anwendung der realen Löslichkeit in reinem Wasser bei pH 8: minimal notwendige Verdünnungs-

wasservolumina zur Einhaltung aller Prüfwerte/Grenzkonzentrationen nach Anorganika und Organika getrennt dargestellt

Abb. 12: Verdünnungswasservolumina in **Mia. m³** für anorganische und organische Wasserinhaltsstoffe (Parameter) für das Basisinventar (ohne Versatzmaterial) mit Resthohlraumvolumen **1 Mio. m³** und Anwendung der realen Löslichkeit in reinem Wasser bei pH 8: minimal notwendige Verdünnungswasservolumina zur Einhaltung aller Prüfwerte/Grenzkonzentrationen nach Anorganika und Organika getrennt dargestellt

0 „Executive Summary“

In der „Vereinbarung zwischen der Bundesregierung und den Energieversorgungsunternehmen (EVU) vom 14. Juni 2000“, die am 11. Juni 2001 unterzeichnet wurde, ist u.a. festgelegt, dass die Erkundung des Salzstocks Gorleben „bis zur Klärung konzeptioneller und sicherheitstechnischer Fragen für mindestens 3, längstens jedoch 10 Jahre unterbrochen wird“ (Gorleben-Moratorium). Da die das Moratorium begründenden Zweifelsfragen mehrheitlich grundsätzlicher Natur sind, hat deren Klärung Einfluss auf jedes für die Endlagerung radioaktiver Abfälle geeignete Wirtsgestein und auf jeden potenziellen Endlagerstandort. Als Wirtsgesteine für das Endlager kommen Salz, Ton/Tonstein, sonstige Gesteine unter Tonabdeckung und Kristallin (Granit) in Frage. In diesem Zusammenhang sind verschiedene grundsätzliche endlagerrelevante Fragestellungen zu untersuchen, so auch die Frage, welche Art und Menge chemotoxischer Stoffe in allen Arten radioaktiver Abfälle enthalten sind, deren Endlagerung in tiefen geologischen Formationen vorgesehen und zu untersuchen ist, und wie demzufolge bei einer möglichen Freisetzung dieser nichtradioaktiven chemotoxischen Stoffe die Einhaltung des Schutzzieles des Wasserhaushaltsgesetzes, WHG zu bewerten ist.

Der Schutz von Mensch und Umwelt ist oberster Grundsatz bei der Entsorgung und Einlagerung radioaktiver Abfälle. Dieser Grundsatz spiegelt sich in den Genehmigungsvoraussetzungen für ein Endlager wider. Im Hinblick auf die Sicherheit der Lagerung radiologischer Abfälle in geologischen Formationen müssen insbesondere in der Nachbetriebsphase – ausgehend vom Gesamtinventar – eventuell mögliche Freisetzungen auf dem Wasserpfad in die Biosphäre untersucht und bewertet werden. Damit wird insbesondere dem Besorgnisgrundsatz des § 34 „Reinhaltung“ des Gesetzes zur Ordnung des Wasserhaushalts (Wasserhaushaltsgesetz, WHG) Rechnung getragen. Nach § 34 Abs. 2 WHG dürfen Stoffe nur so gelagert oder abgelagert werden, dass eine schädliche Verunreinigung des Grundwassers oder eine sonstige nachteilige Veränderung seiner Eigenschaften nicht zu besorgen ist [1]. Konkretisiert wird dieser Besorgnisgrundsatz durch die Verordnung zur Umsetzung der Richtlinie 80/86/EWG des Rates vom 17.12.1979 über den Schutz des Grundwassers gegen Verschmutzung durch bestimmte gefährliche Stoffe (Grundwasserverordnung) vom 18.03.1997.

Das o.g. Gesamtinventar eines Endlagers in den verschiedenen Wirtsgesteinen besteht aus dem Basisinventar und dem Inventar der Versatzmaterialien. Das Gesamtinventar eines Endlagers für alle Arten radioaktiver Abfälle setzt sich aus einer Vielzahl von organischen und anorganischen nichtradioaktiven Stoffen zusammen, welche in den Abfällen, in den Abfallbehältern, in den Fixierungsmitteln, im Verfüllmaterial und - last but not least - im Versatzmaterial (inkl. gesättigter Salzlösungen) vorkommen. Darunter befinden sich auch eine Reihe von chemotoxischen anorganischen und organischen Stoffen. Die organischen und anorganischen chemotoxischen Stoffe werden qualitativ identifiziert und ihre quantitativen Anteile am Gesamtinventar bestimmt.

Um die Auswirkungen des eingelagerten Gesamtinventars sowohl auf die Entwicklung des geochemischen Milieus im Grubengebäude als auch auf eine eventuelle schädliche Verunreinigung des Grundwassers oder eine sonstige nachteilige Veränderung seiner Eigenschaften durch bestimmte Schadstoffe untersuchen zu können, muss die stoffliche Zusammensetzung des Lagergutes bekannt sein. Während bei den geochemischen Milieubetrachtungen in der Regel Angaben über die Mengen der stofflichen Hauptbestandteile, wie z.B. Zement, Zellulose, Eisen- und Nichteisenmetalle genügen, ist bei einer wasserrechtlichen Prüfung eine weitere Differenzierung der Materialien über deren jeweilige Komponenten bis hin zu den einzelnen chemischen Elementen erforderlich.

Um die wasserrechtlichen Bestimmungen auf deren Einhaltung prüfen zu können, werden die in der Anlage zur Grundwasserverordnung (GWVO) aus dem Jahre 1997 in der Liste I und II genannten Stoffe herangezogen. Darüber hinaus werden auch weitere Stoffe in die Erfassung chemischer und chemotoxischer anorganischer und organischer Stoffe im Gesamtinventar einbezogen, für die in den einschlägigen nationalen Verordnungen (Trinkwasserverordnung), Regelwerken (DVGW) und Empfehlungen (LAWA) eine Grenzkonzentration bzw. ein Prüfwert genannt wird. Ergänzend werden auch internationale Empfehlungen (WHO) und Regelwerke herangezogen inkl. Angaben zur Chemotoxizität chemischer Elemente im Trinkwasser.

Basierend auf dem Gesamtinventar der eingelagerten radioaktiven Abfälle inkl. Versatzmaterial (Salzgrus/Salzbeton/ges. NaCl-Lösung bzw. Bentonit/Zementmörtel) wird in diesem Bericht ein Quellterm für chemische und chemotoxische Stoffe ermittelt und auf Einhaltung der wasserrechtlichen Bestimmungen für die wasserrechtlich relevanten Wasserinhaltsstoffe im oberflächennahen Grundwasser bzw. im Trinkwasser durch die im Tiefenwasser-/Lösungsvolumen und Verdünnungswasser mitgeführten Wasserinhaltsstoffe auf dem Weg des Wassers bzw. wässriger Lösungen (z.B. Salzsole) als Transportmittel von den Einlagerungsbereichen des Endlagers durch die Geosphäre in die Biosphäre, d.h. eine evtl. mögliche Freisetzung von anorganischen und organischen Schadstoffen auf dem Wasserpfad in die Biosphäre modellhaft geprüft und bewertet. Die

Ausbreitung chemischer und chemotoxischer Stoffe aus einem Endlager in geologischen Formationen kann nur über Wasser bzw. salzhaltige Lösungen als Transportmittel stattfinden. Nach dem Eintritt in die Biosphäre erfolgt eine Inkorporation von Schadstoffen durch den Menschen und die Umwelt primär über den Ingestionspfad, und zwar speziell über das Trinkwasser. In diesem Zusammenhang ist die Prüfung und Bewertung einer möglichen Veränderung des Grundwassers bzw. Trinkwassers konservativ (d.h. anhand von weit auf der sicheren Seite liegenden) Modellbetrachtungen vorgenommen worden. Diese Modellbetrachtungen basieren letztlich auf einem Konzentrationsvergleich. Dabei werden die Konzentrationen der anorganischen und organischen Stoffe nach Auflösung im jeweiligen Tiefenwasser und einsetzender Verdünnung durch Dispersion und Diffusion während des Transportes durch die Geosphäre in die Biosphäre verglichen mit den Konzentrationsbegrenzungen für chemische Elemente und anorganische bzw. organische Wasserinhaltsstoffe im oberflächennahen Grundwasser bzw. im Trinkwasser, und zwar einmal die sich einstellende Konzentration absolut in mg/L bzw. relativ als Konzentrationsvergleich in mg/L berechnet : mg/L zulässig mit dem Resultat eines Quotienten, s.u. Von einer Herabsetzung der Konzentration der betrachteten Wasserinhaltsstoffe infolge Sorption an Feststoffoberflächen (Basisinventar, Versatzmaterial, Wirtsgestein) bzw. biochemischem Abbau wird hier bei keinem der Wasserinhaltsstoffe Kredit genommen.

Bei den als Teil des Gesamtinventars aus dem Basisinventar und den Versatzmaterialien betrachteten schwach-, mittel- und hochradioaktiven Abfällen handelt es sich um endlagerfähige konditionierte radioaktive Abfälle aus den folgenden 8 Verursacher-/Ablieferergruppen/Herkunftskategorien: „BE“ für abgebrannte bzw. ausgediente Brennelemente, „F“ z.B. für die Grossforschungsanlagen Karlsruhe und Jülich, „I“ für die kerntechnische Industrie, „K“ für Betrieb der Kernkraftwerke (DWR, SWR, AVR, THTR), „L“ für Landessammelstellen (hier als repräsentatives Beispiel Bayern), „S“ für Stilllegung von Kernkraftwerken, Prototyp- und Forschungsreaktoren, „U“ für sonstige Ablieferungspflichtige (z.B. Bundeswehr, Urananlage Ellweiler), „W“ für Wiederaufarbeitung ausgedienter Brennelemente (COGEMA, BNFL, WAK, UKAEA Dounreay). Zusätzlich wurde für die Versatzmaterialien die Herkunftskategorie „V“ eingeführt und berücksichtigt.

Zu dem hier stets gleichen Basisinventar zählen: die eigentlichen radioaktiven Abfälle, die Abfallbehälter, die Fixierungsmittel und die Verfüllmaterialien soweit verwendet. Zum wechselnden Mengengerüst der Versatzmaterialien zählen Salzgrus/Salzbeton/gesättigte NaCl-Lösung beim Wirtsgestein „Salinar“ bzw. Bentonit/Zementmörtel bei allen nicht-salinaren Wirtsgesteinen („Ton“, „Unter Tonüberdeckung“, „Kristallin“).

Im Gegensatz zu den infolge der Kernenergienutzung technisch erzeugten radioaktiven Abfällen aller übrigen o.g. Verursacher/Ablieferergruppen/Herkunftskategorie enthält die hier separat eingeführte Herkunftskategorie Versatzmaterial (V) nur natürlich vorkommende Radionuklide („NORM“). Das Versatzmaterial dient als umhüllende Barriere zwischen dem Basisinventar und dem jeweiligen Wirtsgestein, folglich zwischen dem Basisinventar und dem Wirtsgestein kein direkter Kontakt besteht. Mengenmässig übertrifft das Versatzmaterial das Basisinventar beim Wirtsgestein, und zwar beim Wirtsgestein „Salinar“ um 205 – 280 Ma.-% je nach Masse gesättigter NaCl-Lösung als Verfüllung der unterstellten, unterschiedlich grossen Resthohlräume von 100.000 m³, 500.000 m³ bzw. 1 Mio. m³, beim Wirtsgestein „Ton“ um 218 Ma.-%, beim Wirtsgestein „Unter Tonüberdeckung“ um 224 Ma.-% und beim Wirtsgestein „Kristallin“ um 585 Ma.-%.

Zum Basisinventar (ohne Versatzmaterial) tragen zur Zeit massgeblich die Betriebs- (K) und Stilllegungsabfälle (S) der Kernkraftwerke bei, gefolgt von den endlagerfähig konditionierten Brennelementen (BE) aus Leistungsreaktoren, Versuchs- und Prototypreaktoren sowie Forschungsreaktoren. Die restlichen Abfallgebundmassen entfallen auf alle übrigen Ablieferer (F, I, L, U, W).

Für die nachstehend genannten 8 Herkunftskategorien wurden die Massenbeiträge und deren Ma.-% zum Basisinventar von zur Zeit 1.433.768 Mg erfasst, das sich nach dem „Zwiebelschalenprinzip“ aus dem eigentlichen Abfall, den Abfallbehältern, den Fixierungsmitteln sowie den Verfüllmaterialien ergibt. Darüber hinaus ist bei der Erfassung des Gesamtinventars der Beitrag an Versatzmaterialien pro Wirtsgestein zu bilanzieren. Dabei ergeben sich für das Wirtsgestein „Salinar“ insgesamt 3 verschiedene Massen an Versatzmaterialien (und Gesamtinventar) bei ansonsten immer gleichem Basisinventar für alle Wirtsgesteine aufgrund der 3 unterstellten Resthohlraumvolumina von 100.000 m³, 500.000 m³ und 1 Mio. m³, die sich mit gesättigter NaCl-Lösung auffüllen.

Das o.g. Basisinventar von 1,433 Mio. Mg wird sich noch um die Differenz der Massen aus den abgetrennten Spaltstoffen (WAU + Pu) aus der Wiederaufarbeitung abgebrannter BE und deren Rezyklierung in Form von WAU-BE, MOX-BE und überschüssigem, abgereichertem WAU („Tails“) verglichen mit dem bereits bilanzierten Bedarf an U-BE der Leistungsreaktoren in der Zukunft ändern. Die Summe der Massen des Basisinventars von ca. 1,44 Mio. Mg und der Massen der jeweiligen Versatzmaterialien für verschiedene Wirtsgesteine reichen von 4,37 Mio. Mg für „Salinar“ mit minimal 100.000 m³ ges. NaCl-Lösung, über 4,56 Mio. Mg für „Ton“ bzw. 4,65 Mio. Mg für „Unter Tonüberdeckung“ bis hin zu 9,83 Mio. Mg für „Kristallin“.

Der Zeithorizont der Erfassung der anfallenden Abfälle orientierte sich an der Abfallerhebung BfS für das Jahr 2000. Aufgrund der „Vereinbarung zwischen der Bundesregierung und den Energieversorgungsunternehmen vom 14. Juni 2000“, die am 11. Juni 2001 unterzeichnet wurde, ergab sich als Referenzzeitpunkt der Zeithorizont 01.01.2030 für den Anfall wärmeentwickelnder Abfälle der Herkunftskategorien BE und W. Für die vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfälle der Herkunftskategorien F, I, L, U wurde mit einem Zuwachs an prognostiziertem Abfallgebinder Volumen bis zum Zeithorizont 2080 gerechnet, für die Herkunftskategorie K und S wurde der Zuwachs an Abfallgebinder Volumen aus den o.g. Gründen auf den Zeithorizont 2040 begrenzt.

Der Zeitpunkt 01.01.2030 dient auch als Referenzzeitpunkt für die erstmalige Erfassung des real akkumulierten Aktivitätsinventars der Abfälle aller Herkunftskategorien, gefolgt von den Zeithorizonten 30, 50, 100, 300, 1.000, 3.000, 10.000, 30.000, 100.000, 300.000 und 1 Mio. Jahre danach. Zum Referenzzeitpunkt 01.01.2030 umfasst das BE-Inventar für die direkte Endlagerung ca. 11.027 Mg Schwermetall (MTIHM) mit einem Aktivitätsinventar von $1,13E+20$ Bq, die Masse Brennstoff zur Wiederaufarbeitung „W“ ca. 6.981 MTIHM mit $4,37E+19$ Bq in den Wiederaufbereitungsabfällen. Die Summe beider Beiträge BE+W ergibt sich zu ca. 18.008 MTIHM mit einem Aktivitätsinventar von $1,57E+20$ Bq, an dem auch die Aktivitätsbeiträge der übrigen Herkunftskategorien F, I, K, L, S, U mit kumulativ 0,15% vom Total praktisch nichts mehr ändern.

Die Aktivitätsinventare der Radionuklide in den Abfallgebinder bzw. der Abfallsorten für die Herkunftskategorien und die Dauer ihrer Entstehung von Jahr zu Jahr wurden real akkumuliert, d.h. gemäß „Zwiebelschalenprinzip“ pro Herkunftskategorie über die Aktivität und Zeit bis hin zum Gesamtaktivitätsinventar akkumuliert. Unterschieden wurde dabei zwischen: Gesamtaktivität, Alpha-Aktivität, Beta-/Gamma-Aktivität, Aktivität der Aktiniden und Aktivität der Aktivierungs- und Spaltprodukte, jeweils in Bq vs. Zeit. Erstellt wurden die Ergebnistabellen zum gesamten Aktivitätsinventar (Bq) aller Herkunftskategorien vs. Zeit (Jahre) bei realer Akkumulation inkl. der Massenanteile Schwermetall in MTIHM und dem Aktivitätsinventar von BE + W als Aktivität (Becquerel) vs. Zeit (Jahre). Besondere Beachtung ist den radioaktiven Elementen auch deshalb zu widmen, weil diese sowohl beim Masseninventar als auch beim Aktivitätsinventar einen Beitrag zum betreffenden Inventar leisten. Dies betrifft z.B. Spurenelementverunreinigungen (z.B. U, Th) in ansonsten inaktiven Materialien wie z.B. U und Th in zementhaltigen Materialien. Es betrifft aber auch radioaktive Elemente (und deren chemische Verbindungen) aus dem Aktivitätsinventar (z.B. U_3O_8 , ThO_2 , PuO_2 und andere radioaktive Elemente), die einen nicht zu vernachlässigenden Beitrag zum Masseninventar von U, Th, Pu etc. leisten können. Uran ist das einzige radioaktive Element, dessen Chemotoxizität höher ist als seine Radiotoxizität, so dass von der WHO ein „guideline value“ für Uran im Trinkwasser festgelegt wurde.

Für die Prüfung auf Einhaltung der wasserrechtlichen Schutzziele wurden die nachstehenden Randbedingungen berücksichtigt:

- 4 vorgegebene Wirtsgesteine (1 Wirtsgestein "Salinar" und 3 Wirtsgesteine nicht-salinar, und zwar "Ton", "Unter Tonüberdeckung", "Kristallin") d.h. Basisinventar mit Versatzmaterial für jedes Wirtsgestein, als Zusatzvariante das Basisinventar ohne Versatzmaterial (und ohne Wirtsgesteinsangabe)
- 3 unterstellte Resthohlraumvolumina RHV (100.000 m^3 , 500.000 m^3 , 1 Mio. m^3) entsprechend Tiefenwasservolumina, in denen die Auflösung der Inventarbestandteile bis zur Sättigung stattfindet
- 3 unterstellte Verdünnungsfaktoren VF (VF 500, VF 5.000, VF 50.000)
- 2 Lösungsszenarien für nicht-salinare Wirtsgesteine: "hypothetisch vollständige Lösung" und "reale Löslichkeit in reinem Wasser" sowie beim Wirtsgestein „Salinar“ ausserdem ein drittes Lösungsszenario: "reale Löslichkeit in gesättigter NaCl-Lösung" für jeweils 3 Resthohlraumvolumina und 3 Verdünnungsfaktoren
- 120 Wasserinhaltsstoffe (Parameter), davon 82 anorganische, 38 organische Wasserinhaltsstoffe.

Die Auswertung der wasserrechtlichen Bewertung umfasst 11 Szenarien (3 nicht-salinare Wirtsgesteine mit 2 Lösungsszenarien für Basisinventar/Versatzmaterial/Wirtsgestein, 1 salinares Wirtsgestein mit 3 Lösungsszenarien für das Basisinventar/Versatzmaterial/Wirtsgestein) und zum Vergleich die Variante „Basisinventar ohne Versatzmaterial und Wirtsgestein“ mit 2 Lösungsszenarien, um sowohl den Einfluss des Basisinventars als auch den Einfluss der Versatzmaterialien auf die wasserrechtliche Bewertung der jeweiligen Kombination aus Basisinventar + Versatzmaterial für die 4 Wirtsgesteine kennenzulernen und bewerten zu können. Die Ergebnisse sind in tabellarischer Form und in Abbildungen dargestellt.

Die Kombination aller o.g. Randbedingungen liefert 99 berechnete Varianten. Für alle Szenarien wird das jeweils vorgegebene Versatzmaterial (Salzgrus/Salzbeton/ges. NaCl-Lösung beim Wirtsgestein „Salinar“ bzw. Bentonit/Zementmörtel bei den nicht-salinaren Wirtsgesteinen) berücksichtigt. Als Lösungsmittel dient reines Wasser für alle Szenarien der Löslichkeit (hypothetisch und real), wobei für das saline Wirtsgestein ausserdem der reine Wasseranteil der gesättigten NaCl-Lösung für die löslichen Anteile der Inventarbestandteile berücksichtigt wird.

Für die wasserrechtliche Bewertung wurden 82 anorganische und 38 organische, d.h. insgesamt 120 Wasserinhaltsstoffe zugrundegelegt. Im Einzelnen für die Anorganika (in alphabetischer Reihenfolge):

Ag, Al, As, Au, B, Ba, Be, Bi, Br, BrO₃, Ca, Cd, Cl, CN, CN Gesamt, Co, Cr, Cr(VI), Cs, Ce, Cu, Dy, Er, F, Fe, Ga, Gd, Ge, Hf, Hg, Ho, I, In, Ir, K, La, Li, Lu, Mg, Mn, Mo, Na, Nb, Nd, NH₄, Ni, NO₂, NO₃, Os, Pb, Pd, Pm, PO₄, Pr, Pt, Rb, Re, Rh, Ru, Sb, Sc, Se, SiO₂, Sm, Sn, SO₄, Sr, Ta, Tb, Tc, Te, Ti, Tl, Tm, U, V, W, Y, Yb, Zn, Zr. Von den anorganischen Wasserinhaltsstoffen blieben aus dem Periodensystem der Elemente für die wasserrechtliche Bewertung unberücksichtigt: Ac, Ar, At, Fr, H, He, Kr, N, Ne, O, Pa, Po, Ra, Rn, Th, Xe und alle Transurane (Np, Pu, Am, Cm, Bk, Cf, Es, Fm, Md, No, Lr, Rf, Ha). Alle anderen anorganischen Elemente wurden berücksichtigt, z.T. in Form ihrer (wasserlöslichen) chemischen Verbindungen wie BrO₃, CN, NH₄, NO₂, NO₃, PO₄, SiO₂, SO₄. Einen Spezialfall stellt Cr(VI) bzw. CrO₄ dar.

Bei den organischen Wasserinhaltsstoffen galt es, nicht nur einzelne organische Stoffe (Acrylamid, EDTA, NTA), sondern auch Summenparameter (DOC G, SOS G) und Gruppenparameter (ANT, NIT, ANT+NIT, AOX, KW, PAK) zu erfassen und wasserrechtlich zu bewerten. Im Einzelnen wurden folgende Organika als Wasserinhaltsstoffe berücksichtigt (in alphabetischer Reihenfolge): Acrylamid, Aldrin, ANT, ANT+NIT, AOX, Benzo(a)pyren, Benzol, BTEX, Chloroformextrahierbare Substanzen, Chlorethen, Chlorierte Benzole, Chlorierte Naphthaline, Chlorierte Phenole, 1,2-Dichlorethan, Dieldrin, DOC, EDTA und -Salze, Epichlorhydrin, Heptachlor, Heptachlorepoxyd, leichtflüchtige halogenierte Kohlenwasserstoffe gesamt, leichtflüchtige halogenierte Kohlenwasserstoffe karzinogen, Mineralöl-Kohlenwasserstoffe, Naphthalin+Methylnaphthalin, Naphthalin, organische Chlorverbindungen, PAK, PCB (einzeln bzw. gesamt), PCDD+PCDF, wasserdampflichtige Phenole, PSMBP (Pflanzenschutzmittel/Biozidprodukte einzeln bzw. gesamt), SOS, TCDD, Tetrachlormethan, Tetrachlorethen+Trichlorethen, Trihalogenmethane.

Aus dem Anhang B können die Konzentrationen in mg/L aller wasserrechtlich relevanten Wasserinhaltsstoffe für 11 Inventar- und Löslichkeitsszenarien, 3 unterstellte Resthohlraumvolumina und 3 unterstellte Verdünnungsfaktoren, d.h. $11 \times 3 \times 3 = 99$ Varianten sowie die Vielfachen der Prüfwerte für Grundwasser bzw. Grenzkonzentrationen im Trinkwasser in mg/L entnommen werden. Dabei bedeuten die berechneten Quotienten (mg/L berechnet : mg/L zulässig) für die wasserrechtlich relevanten Wasserinhaltsstoffe:

- > 1,0 eine Überschreitung,
- < 1,0 eine Unterschreitung,
- 1,0 die (formale) Einhaltung des Prüfwertes im Grundwasser bzw. der Grenzkonzentration im Trinkwasser.

Die Konzentrationen der Wasserinhaltsstoffe, die zu einer formalen Überschreitung des Prüfwertes im Grundwasser bzw. der Grenzkonzentration im Trinkwasser führen würden, sind mit einem * gekennzeichnet.

Bei der Bewertung der Freisetzung chemischer und chemotoxischer Stoffe im Hinblick auf das Schutzziel des Wasserhaushaltsgesetzes zeigt sich, dass je nach unterstellten Resthohlraumvolumina von 100.000 m³, 500.000 m³ und 1 Mio. m³ sowie unterstellten Verdünnungsfaktoren von 500, 5.000 und 50.000 zur Einhaltung der wasserrechtlichen Schutzziele für alle Wasserinhaltsstoffe unterschiedliche Verdünnungswasservolumina erforderlich sind. Diese minimal notwendigen Verdünnungswasservolumina ergeben sich als Produkt aus dem minimal notwendigen Verdünnungsfaktor zur Einhaltung aller 120 untersuchten Prüfwerte für Wasserinhaltsstoffe im oberflächennahen Grundwasser bzw. Grenzkonzentrationen im Trinkwasser sowie den jeweils o.g. unterstellten Resthohlraumvolumina zu Beginn der Verdünnung und als Funktion des Basisinventars mit Versatzmaterialien für die 4 betrachteten Wirtsgesteine bzw. des Basisinventars ohne Versatzmaterial zu Vergleichszwecken, siehe dazu die Abbildungen mit den charakteristischen Verdünnungswasservolumina („Verdünnungswasserprofil“) für alle 120 untersuchten Wasserinhaltsstoffe (Anorganika + Organika).

Bei näherem Hinsehen zeigt sich, dass das minimal erforderliche Verdünnungswasservolumen (das minimal erforderliche Verdünnungspotenzial) sich aus dem Beitrag der löslichen und gelösten Anteile des Basisinventars und der Versatzmaterialien im oberflächennahen Grundwasser bzw. im Trinkwasser ergibt, verglichen mit den neuesten jeweils restriktivsten Konzentrationen der Wasserinhaltsstoffe, während das Wirtsgestein selbst keinen direkten Einfluss auf die Einhaltung der wasserrechtlichen Schutzziele hat. Das ist verständlich, da das Wirtsgestein

gestein zwar die Wahl des Versatzmaterials in Bezug auf Masse und chemische Zusammensetzung beeinflusst, jedoch keinen Beitrag zur Massenbilanz leistet und auch keinen direkten Kontakt zum Basisinventar hat, von dem es durch das Versatzmaterial zudem räumlich getrennt ist. Je nach Wirtsgestein (salinar bzw. nicht-salinar) unterscheiden sich die Massen und die chemische Zusammensetzung des Versatzmaterials in signifikanter Weise, während Masse und chemische Zusammensetzung des Basisinventars stets gleich bleiben. Während für das salinare Wirtsgestein ein Versatzmaterial aus Salzgrus/Salzbeton/ges. NaCl-Lösung unterstellt wird, fiel die Wahl für die nicht-salinen Wirtsgesteine auf ein Versatzmaterial aus Bentonit/PZ-Mörtel.

Tabellarisch werden 30 von insgesamt 120 Wasserinhaltsstoffen genannt, die bei mindestens einem Wirtsgestein/Versatzmaterial bzw. bereits beim Basisinventar (ohne Versatzmaterial) zu einem hohen Verdünnungswasservolumen führen, jeweils bezogen auf die unterstellten Resthohlraumvolumina von 100.000 m³, 500.000 m³ bzw. 1 Mio. m³ und Anwendung der realen Löslichkeit in reinem Wasser bei pH 8 für nicht-salinare Wirtsgesteine bzw. im Wasseranteil der gesättigten NaCl-Lösung im Wirtsgestein Salinar. Dominierende Wasserinhaltsstoffe und dazugehörige Verdünnungswasservolumina $\geq 0,5$ Mia. m³ sind dabei tabellarisch fett gedruckt hervorgehoben. Dabei handelt es sich bei den jeweiligen Wasserinhaltsstoffen um die minimal notwendigen Verdünnungswasservolumina in Mia. m³, um für die Wasserinhaltsstoffe deren neueste, restriktivste Prüfwerte im Grundwasser bzw. Grenzkonzentrationen im Trinkwasser formal einhalten zu können. Diese die minimal notwendigen Verdünnungswasservolumina dominierenden (anorganischen + organischen) Wasserinhaltsstoffe sind, um hier jeweils nur die 10 wichtigsten pro Basisinventar/Versatzmaterial/Wirtsgestein bzw. Basisinventar (ohne Versatzmaterial und ohne Wirtsgestein) für das Lösungsszenario 1 Mio. m³ Resthohlraumvolumen (anfängliches Porenvolumen) in der Reihenfolge abnehmender Verdünnungswasservolumina zu nennen:

- **beim Wirtsgestein/Versatzmaterial „Salinar“: Cd, Y, K, Tl, As, Pb, Cr, Cl, Na, Al, PAK G, Öl-KW**
- **beim Wirtsgestein/Versatzmaterial „Kristallin“: K, Y, Rb, Li, As, Cd, Öl-KW, Te, U, B, Hg, NIT**
- **beim Wirtsgestein/Versatzmaterial „Ton“: Y, As, K, Cd, Rb, Öl-KW, Te, U, B, NIT, Li, Sb**
- **beim Wirtsgestein/Versatzmaterial „Unter Tonüberdeckung“: Y, K, As, Cd, Rb, Öl-KW, Te, U, B, Li, NIT, Sb**
- **beim Basisinventar (ohne Versatzmaterial): Y, As, Cd, Öl-KW, Te, U, B, NIT, Sb, ANT + NIT, V, Pb.**

Für die o.g. 20 wichtigsten Wasserinhaltsstoffe aller 4 Wirtsgesteine/Versatzmaterialien/Basisinventare bzw. des Basisinventars allein lassen sich die neuesten jeweils restriktivsten Prüfwerte im Grundwasser bzw. Grenzkonzentrationen im Trinkwasser ableiten aus den folgenden Verordnungen, Regelwerken, Empfehlungen:

- Novellierung der Trinkwasserverordnung 2001: Pb, PAK G, Sb
- Neufassung der Trinkwasserverordnung 1990: K, Mineralöl-KW
- LAWA 1998: Tl, V
- DVGW 1996: As, B, Cd, Cr, Cl, Na, NIT, ANT+NIT
- NLÖ 1998: Li, Rb
- WHO 1998: U
- Sittig 2002: Te
- U.S. Department of Health, Education and Welfare Toxic Substances List 1972: Y.

Bemerkenswert ist, dass Y bereits beim Basisinventar (d.h. ohne Versatzmaterial) das Verdünnungswasservolumen mit $\geq 1,6$ Mia. m³ bei einem Resthohlraumvolumen ≥ 200.000 m³ dominiert, weil die Masse Y aus dem Spaltproduktpaar Sr+Y von abgebrannten BE und hochaktivem Glas bereits grösser ist als zur Sättigung in reinem Wasser bei pH 8 oder in gesättigter NaCl-Lösung mit gelösten Y-Verbindungen notwendig wäre.

Wie das Beispiel Yttrium zeigt, überträgt sich der Einfluss der Wasserinhaltsstoffe aus dem Basisinventar auf die Ergebnisse für die Kombination Basisinventar/Versatzmaterial für die 4 Wirtsgesteine, wie auch aus den Abbildungen und Tabellen für As, B, Cd, (Pb), Sb, Te, U, Y, ANT+NIT, Mineralöl-KW, NIT ersichtlich. Bemerkenswert ist, dass aus dem Versatzmaterial selbst bedeutende Beiträge der Massen von leichtlöslichen Wasserinhaltsstoffen K, Na, Li, Rb, Tl, Cl stammen, die dazu führen, dass zur Einhaltung der entsprechenden Prüfwerte im oberflächennahen Grundwasser und Grenzkonzentrationen im Trinkwasser bedeutende Verdünnungswasservolumina notwendig werden, die aus dem Basisinventar (ohne Versatzmaterial) nicht notwendig wären.

Die dominierende Rolle des Cd beim Wirtsgestein Salinar und Resthohlraumvolumina 500.000 m³ bzw. 1 Mio. m³ ist auf die in stark chloridhaltigen Lösungen (hier gesättigte NaCl-Lösung) markant erhöhte Löslichkeit von Cd als Chlorokomplex zurückzuführen, mit dem die Verdünnung beginnt. Eine solche Löslichkeitserhöhung zeigt sich auch bei chromhaltigen Stoffen, wenn auch ohne Bildung starker Chromchlorokomplexe.

Vorteilhaft ist in jedem Falle ein minimales Resthohlraumvolumen (Porenvolumen des Versatzmaterials) für jede Kombination Wirtsgestein/Versatzmaterial, sofern das entsprechende Porenvolumen nicht im Widerspruch zum zulässigen Druckaufbau infolge Gasentwicklung und der fortwährenden Integrität der technischen und geologischen Barrieren steht. Die Bandbreite des Porenvolumens bei den Wirtsgesteinen reicht gemäss modellhafter Endlagerauslegung BfS nach heutigem Kenntnisstand von ca. 200.000 m³ bei Ton, ca. 223.00 m³ unter Tonüberdeckung, über ca. 671.0000 m³ bei Kristallin bis hin zu ca. 1 Mio. m³ bei Salinar. Die unterstellten Resthohlraumvolumina von minimal 100.000 m³, 500.000 m³ bzw. 1 Mio. m³ decken diese o.g. Porenvolumina ungefähr ab und erlauben eine Eingrenzung der minimal notwendigen Verdünnungswasservolumina für die dominierenden Wasserinhaltsstoffe bei den verschiedenen Kombinationen Basisinventar/Versatzmaterial/Wirtsgestein. Allerdings wird erst die Berücksichtigung der o.g. Porenvolumina aus den Planungsdaten für die einzelnen Basisinventare/Versatzmaterialien/Wirtsgesteine massgeschneiderte Ergebnisse liefern.

Zur konservativen Bewertung der wasserrechtlich relevanten Wasserinhaltsstoffe und der Einhaltung/Nichteinhaltung ihrer Schutzziele gehört auch, dass von einer möglichen Sorption der betrachteten 120 Wasserinhaltsstoffe im Basisinventar, am Versatzmaterial und/oder Wirtsgestein bei der wasserrechtlichen Bewertung kein Kredit genommen wird, obwohl mit dem Phänomen der Sorption an Feststoffoberflächen bei dem einen oder anderen Wasserinhaltsstoff auf dem Transportweg vom Endlager in die Biosphäre zu rechnen sein wird. Ebenso wenig wird der im Laufe der Zeit unvermeidliche biochemische Abbau der Organika (u.a. BTEX, Tenside, Mineralöl-KW) bei der Einhaltung der wasserrechtlichen Schutzziele berücksichtigt, sondern konservativ unterstellt, dass die Organika abbauresistent seien, was bekanntermassen nicht der Fall ist. Der biochemische, hydrolytische und/oder durch metallisches Eisen katalysierte Abbau der chemotoxischen organischen Stoffe garantiert deren Einhaltung der wasserrechtlichen Schutzziele. Der radiolytische Abbau der Organika ist in der Regel gering verglichen mit dem hydrolytischen Abbau.

In bezug auf organische chemotoxische Stoffe ist auf die Anwesenheit des Komplexbildners EDTA besonderes Augenmerk zu legen. Hier empfiehlt sich eine Mineralisierung (Veraschung) aller mit EDTA behafteten Abfallbestandteile, wenigstens ein weitgehender thermischer/katalytischer Abbau oder mindestens eine rigorose Kontrolle der EDTA-Mengen, die ohnehin von Seiten der Behörden vorgeschrieben ist, und zwar schon vor der geplanten Verwendung des starken Chelatbildners, siehe dazu auch die EDTA-spezifische Abfallbestimmungs-Verordnung. Nach der Verordnung zur Bestimmung von Abfällen (Abfallbestimmungs-Verordnung - AbfBestV vom 03.04.1990) nach § 2 Abs. 2 des Gesetzes zur Vermeidung und Entsorgung von Abfällen (Abfallgesetz - AbfG vom 27.08.1986) sind bestimmte Abfälle aufgrund ihres Gehaltes an EDTA und ihrer Na-Salze als schädlichkeitsbestimmende Komponente für den Erzeuger gegenüber der örtlich zuständigen Behörde bundesweit meldepflichtig (Sonderabfall nach § 11 Abs. 3 AbfG).

Generell gilt: Organika gehören nicht in ein Endlager, sondern sind im Abfallinventar zu vermeiden oder vorgängig zu mineralisieren.

Zu den Massnahmen für eine mengenmässige Begrenzung der Problemstoffe gehört auch, dass ökotoxische anorganische Stoffe wie z.B. Kupfer und Blei vom unvermeidbaren Abfallinventar ferngehalten werden, d.h. rezykliert oder restriktiv verwendet werden. Dies ist technisch möglich wenn Kupferkabel „geschreddert“ und der Kupferkern rezykliert wird. Das Gleiche gilt auch für Blei, das häufig zur temporären Abschirmung gegen harte Gammastrahler (Co-60) eingesetzt wird und nach weitgehendem Abklingen der Dosisleistung entbehrlich wird. Blei könnte in vielen Fällen durch Eisen bzw. Bismut ersetzt werden, ohne später das Endlagerinventar zu belasten. Da Bor ebenfalls zu den anorganischen ökotoxischen Stoffen gehört, empfiehlt sich eine Rezyklierung der in Druckwasserreaktoren zur Reaktivitätsregelung verwendeten Borsäure, wie dies einige Zeit für DWR's praktiziert wurde (siehe auch die diesbezügliche Nutzung der Patente und die Patentsituation), damit die Anwesenheit von Problemstoffen im Endlager vermieden werden kann, die vermeidbar oder wenigstens weitgehend vermeidbar sind. Borsäure und andere Borverbindungen werden beim Kontakt mit Gesteinsschichten praktisch nicht sorbiert. Da Bor ökotoxisch ist, wurde 1983 die in der BR Deutschland bis dahin in der Heilkunde übliche Anwendung von Borsalbe und Borwasser (z.B. in der Augenheilkunde) verboten.

Die charakteristischen Unterschiede der minimal notwendigen Verdünnungswasservolumina zur Einhaltung aller Prüfwerte im oberflächennahen Grundwasser bzw. Grenzkonzentrationen im Trinkwasser zeigen sich in den Abb. 8-12 auf anschauliche Weise ("Verdünnungswasservolumenprofil") mit Nennung der dominierenden Wasserinhaltsstoffe und sind direkt unter den verschiedenen Kombinationen Basisinventar/Versatzmaterial/Wirtsgestein und mit dem Basisinventar (ohne Versatzmaterial und ohne Wirtsgestein) vergleichbar.

Obwohl die hier durchgeführte Parameterstudie mit den 3 unterstellten Resthohlraumvolumina (Anfangsporenvolumen) von 100.000 m³, 500.000 m³ und 1 Mio. m³, die sich mit gesättigter NaCl-Lösung bei salinarem Wirtsgestein bzw. bzw. mit zutretendem Wasser bei den nicht-salinaren Wirtsgesteinen auffüllen, die

Anfangsporenvolumina der Versatzmaterialien mit den 4 Wirtsgesteinen abdecken, wird erst die Berücksichtigung der erwarteten Porenvolumina aus den Planungsdaten BfS für die einzelnen Basisinventare/ Versatzmaterialien/Wirtsgesteine massgeschneiderte Ergebnisse der minimal notwendigen Verdünnungswasservolumina zur Einhaltung aller Prüfwerte im oberflächennahen Grundwasser bzw. Grenzkonzentrationen im Trinkwasser liefern. Einige generell gültige Feststellungen lassen sich jedoch treffen.

Letzten Endes entscheidet die Hydrogeologie des künftigen Endlagerstandortes über die Einhaltung/Nichteinhaltung der wasserrechtlichen Schutzziele. Für ein fiktives standortungebundenes Endlager ist die Hydrogeologie (das Verdünnungspotenzial) allerdings nicht bekannt. Eine verbindliche Reihenfolge der Endlagereignung gemäss den 4 vorgegebenen Wirtsgesteinformationen lässt sich deshalb nicht aufstellen. Ersichtlich ist jedoch eine Reihenfolge der Einflussgrössen auf die Einhaltung der wasserrechtlichen Schutzziele, wie aus den Abbildungen der Verdünnungswasservolumina und den dazugehörigen Tabellen ersichtlich. Die charakteristischen Unterschiede der minimal notwendigen Verdünnungswasservolumina zur Einhaltung aller Prüfwerte im oberflächennahen Grundwasser bzw. Grenzkonzentrationen im Trinkwasser zeigen sich für die verschiedenen Wasserinhaltsstoffe in den Abbildungen auf anschauliche Weise ("Verdünnungswasservolumenprofil") und direkt mit den Wirtsgesteinen untereinander und dem Basisinventar (ohne Versatzmaterial und Wirtsgestein) vergleichbar.

Entscheidenden Einfluss auf die Einhaltung der Schutzziele haben in der Reihenfolge ihrer Bedeutung:

- a) **das notwendige Verdünnungswasservolumen (die Hydrogeologie des Standortes!),**
- b) **das Resthohlraumvolumen (Anfangsporenvolumen) im Endlagerwirtsgestein/Versatzmaterial,**
- c) **das Versatzmaterial, das für die betreffende Wirtsgesteinformation vorgegeben wird,**
- d) **das Basisinventar.**

1 Einleitung

In der „Vereinbarung zwischen der Bundesregierung und den Energieversorgungsunternehmen (EVU) vom 14. Juni 2000“, die am 11. Juni 2001 unterzeichnet wurde, ist u.a. festgelegt, dass die Erkundung des Salzstocks Gorleben „bis zur Klärung konzeptioneller und sicherheitstechnischer Fragen für mindestens 3, längstens jedoch 10 Jahre unterbrochen wird“ (Gorleben-Moratorium). Da die das Moratorium begründenden Zweifelsfragen mehrheitlich grundsätzlicher Natur sind, hat deren Klärung Einfluss auf jedes für die Endlagerung radioaktiver Abfälle geeignete Wirtsgestein und auf jeden potenziellen Endlagerstandort. Als Wirtsgesteine für das Endlager kommen Salz, Ton/Tonstein, sonstige Gesteine unter Tonabdeckung und Kristallin (Granit) in Frage. In diesem Zusammenhang sind verschiedene grundsätzliche endlagerrelevante Fragestellungen zu untersuchen, so auch die Frage, welche Art und Menge chemotoxischer Stoffe in allen Arten radioaktiver Abfälle enthalten sind, deren Endlagerung in tiefen geologischen Formationen vorgesehen und zu untersuchen ist, und wie demzufolge bei einer möglichen Freisetzung dieser nichtradioaktiven chemotoxischen Stoffe die Einhaltung des Schutzzieles des Wasserhaushaltsgesetzes, WHG zu bewerten ist. Nach § 34 Abs. 2 WHG dürfen Stoffe nur so gelagert oder abgelagert werden, dass eine schädliche Verunreinigung des Grundwassers oder eine sonstige nachteilige Veränderung seiner Eigenschaften nicht zu besorgen ist [1].

Um die wasserrechtlichen Bestimmungen auf Einhaltung prüfen zu können, werden die in der Anlage zur Grundwasserverordnung aus dem Jahre 1997 in der Liste I und II genannten Stoffe herangezogen [2]. Darüber hinaus werden auch weitere Stoffe in die Erfassung chemischer und chemotoxischer anorganischer und organischer Stoffe im Gesamtinventar einbezogen, für die in den einschlägigen nationalen Verordnungen (Trinkwasserverordnung), Regelwerken (DVGW) und Empfehlungen (LAWA) eine Grenzkonzentration bzw. ein Prüfwert genannt wird. Ergänzend werden auch internationale Empfehlungen (WHO) und Regelwerke herangezogen inkl. Angaben zur Chemotoxizität chemischer Elemente im Trinkwasser.

Das o.g. Gesamtinventar eines Endlagers in den verschiedenen Wirtsgesteinen besteht aus dem Basisinventar und dem Inventar der Versatzmaterialien. Das Gesamtinventar setzt sich aus einer Vielzahl von organischen und anorganischen nichtradioaktiven Stoffen zusammen. Darunter befinden sich auch eine Reihe von chemotoxischen anorganischen und organischen Stoffen.

Die organischen und anorganischen chemotoxischen Stoffe werden qualitativ identifiziert und ihre quantitativen Anteile am Gesamtinventar bestimmt. Die in diesem Bericht vorgestellten Inventarmassen können nach entsprechender Lösung im Wasser und anschließender Verdünnung als Datenbasis für die Prüfung auf Einhaltung der wasserrechtlichen Bestimmungen im oberflächennahen Grundwasser bzw. Trinkwasser verwendet werden.

Basierend auf dem Gesamtinventar der eingelagerten radioaktiven Abfälle inkl. Versatzmaterial (Salzgrus/Salzbeton/ges. NaCl-Lösung bzw. Bentonit/Zementmörtel) wird in diesem Bericht ein Quellterm für chemische und chemotoxische Stoffe ermittelt und auf Einhaltung der wasserrechtlichen Bestimmungen für die wasserrechtlich relevanten Wasserinhaltsstoffe im oberflächennahen Grundwasser bzw. im Trinkwasser durch die im Tiefenwasser-/Lösungsvolumen und Verdünnungswasser mitgeführten Wasserinhaltsstoffe auf dem Weg des Wassers bzw. wässriger Lösungen (z.B. Salzsole) als Transportmittel von den Einlagerungsbereichen des Endlagers durch die Geosphäre in die Biosphäre, d.h. eine evtl. mögliche Freisetzung von anorganischen und organischen Schadstoffen auf dem Wasserpfad in die Biosphäre modellhaft geprüft und bewertet.

2 Herkunft und Rahmenbedingungen der einzulagernden Stoffe

Bei den als Teil des Gesamtinventars aus dem Basisinventar und den Versatzmaterialien (V) betrachteten schwach-, mittel- und hochradioaktiven Abfällen handelt es sich um endlagerfähige konditionierte radioaktive Abfälle aus den folgenden 8 Verursacher-/Ablieferergruppen/Herkunftskategorien, zusätzlich wurde für die Versatzmaterialien die Herkunftskategorie „V“ eingeführt und berücksichtigt:

Tabelle 2-1: Liste der Verursacher-/Ablieferergruppen/Herkunftskategorien

Beschreibung der Verursacher-/Ablieferergruppen/Herkunftskategorien	Abkürzung
Direkte Entsorgung von abgebrannten Brennelementen: ausgediente Brennelemente aus Leistungs-, Prototyp-, Versuchs-, Materialtest- und Forschungsreaktoren	BE (B)
Forschungs-/Entwicklungseinrichtungen, z. B. Forschungszentrum Karlsruhe und Jülich	F
Kerntechnische Industrie, z. B. ALKEM, ANF, NUKEM, RBU, SIEMENS	I
Betrieb der Kernkraftwerke (Druck-DWR und Siedewasserreaktoren SWR, AVR, THTR)	K
Landessammelstellen	L
Stilllegung von Kernkraftwerken, Prototypreaktoren und Forschungsreaktoren (DWR, SWR, AVR, THTR, SUR, TRIGA etc.)	S
Sonstige Ablieferungspflichtige, z. B. Bundeswehr, Urananlage Ellweiler (UAE)	U
Versatzmaterial	V
Wiederaufarbeitung ausgedienter BE bei COGEMA, BNFL, WAK, UKAEA Dounreay	W

Zu dem hier stets gleichen Basisinventar zählen: die eigentlichen radioaktiven Abfälle, die Abfallbehälter, die Fixierungsmittel und die Verfüllmaterialien soweit verwendet. Zum wechselnden Mengengerüst der Versatzmaterialien zählen Salzgrus/Salzbeton/gesättigte NaCl-Lösung beim Wirtsgestein „Salinar“ bzw. Bentonit/Zementmörtel bei allen nicht-salinaren Wirtsgesteinen („Ton“, „Unter Tonüberdeckung“, „Kristallin“).

Im Gegensatz zu den infolge der Kernenergienutzung technisch erzeugten radioaktiven Abfällen aller übrigen o.g. Verursacher/Ablieferergruppen/Herkunftskategorie enthält die hier separat eingeführte Herkunftskategorie Versatzmaterial (V) nur natürlich vorkommende Radionuklide („NORM“). Das Versatzmaterial dient als umhüllende Barriere zwischen dem Basisinventar und dem jeweiligen Wirtsgestein, folglich zwischen dem Basisinventar und dem Wirtsgestein kein direkter Kontakt besteht. Mengenmässig übertrifft das Versatzmaterial das Basisinventar beim Wirtsgestein, und zwar beim Wirtsgestein „Salinar“ um 205 – 280 Ma.-% je nach Masse gesättigter NaCl-Lösung als Verfüllung der unterstellten, unterschiedlich grossen Resthohlräume von 100.000 m³, 500.000 m³ bzw. 1 Mio. m³, beim Wirtsgestein „Ton“ um 218 Ma.-%, beim Wirtsgestein „Unter Tonüberdeckung“ um 224 Ma.-% und beim Wirtsgestein „Kristallin“ um 585 Ma.-%.

Zum Basisinventar (ohne Versatzmaterial) tragen zur Zeit massgeblich die Betriebs- (K) und Stilllegungsabfälle (S) der Kernkraftwerke bei, gefolgt von den endlagerfähig konditionierten Brennelementen (BE) aus Leistungsreaktoren, Versuchs- und Prototypreaktoren sowie Forschungsreaktoren. Die restlichen Abfallgebundmassen entfallen auf alle übrigen Ablieferer (F, I, L, U, W).

Eingelagert werden u.a. bei den Betriebsabfällen aus kerntechnischen Anlagen mit Zement verfestigte wasserhaltige bzw. in Bitumen eingebundene getrocknete Abfälle wie z.B. borathaltige (aus DWR) und sulfathaltige (aus SWR) Verdampferkonzentrate (VDK), nitrathaltige VDK aus der Wiederaufarbeitung von ausgedienten Kernbrennstoffen im Forschungszentrum Karlsruhe sowie VDK (aus Wasch- und Dekontaminationsabwässern) sonstiger Ablieferer. Filterrückstände und Filterhilfsmittel (FHM) stammen hauptsächlich aus Kernkraftwerken und sind im Wesentlichen aus Ionenaustauschharzen bzw. Kieselgur

zusammengesetzt. Ebenfalls als Filterhilfsmittel wurde Zellulose (als Inertmaterial) verwendet, die in der Abwasseraufbereitung zusammen mit gelösten oder suspendierten Feststoffen und Salzlösungen aus der chemischen Fällung als Fällschlamm anfallen. Ionenaustauscherharze (IAH) werden in Form von Kugelharzen meist in DWR und als Pulverharze in SWR zur Kondensat- und Reaktorwasserreinigung sowie auch zur Dekontamination salzreicher radioaktiver Abfalllösungen eingesetzt. Öle und Lösungsmittel wurden früher z.B. an Kieselgur sorbiert und dann mit dem Fixierungsmittel Zement und Anmachwasser vermischt und als Zementstein verfestigt, während Öle und Lösungsmittel heutzutage verbrannt und die Ascherückstände verpresst bzw. mit Zement und Wasser fixiert werden.

Zu den festen Abfällen aus dem Betrieb und der Stilllegung kerntechnischer Anlagen gehören u.a. Aktivkohle, Asche, Kugelharze/Pulverharze, Bauschutt (Normalbeton, Erde, Sand, Kies, Steine, Asbest, Mineralwolle, Fe-Metalle, NE-Metalle, Gummi, Kunststoffe, Holz, Glas etc.), Labor- und Mischabfälle wechselnder Zusammensetzung mit den o.g. Materialien, Filter, Filterelemente und Filterkerzen sowie zellulosehaltige Materialien (Papier, Holz, Baumwolle, Zellstoff, Zellulose, pflanzliche Abfälle) und Behälter für umschlossene Strahlenquellen.

Das Inventar chemischer und chemotoxischer anorganischer und organischer Stoffe von schwach-, mittel- und hochradioaktiven Abfällen wurde für den vorliegenden Bericht wie folgt erfasst:

- Qualitative Identifikation von organischen chemotoxischen Stoffen geordnet nach Verbindungsklassen und deren typischen Vertretern
- Qualitative Identifikation von anorganischen chemotoxischen Stoffen
- Quantitative Erfassung stofflicher Bestandteile in den Abfällen, Abfallbehältern, Fixierungsmitteln und Verfüllmaterialien nach Masse, Materialien und Komponenten
- Charakterisierung der erfassten Materialien nach anorganischen und organischen Komponenten und Elementen (qualitativ und quantitativ).

Auf die gleiche Weise werden die jeweiligen Versatzmaterialien für die 4 Wirtsgesteine charakterisiert und bilanziert. Anorganische und organische Stoffe und deren Massen aus den darüber und darunter liegenden Schichten des Einlagerungshorizontes werden nicht erfasst, d.h. das Wirtsgestein ist kein Bestandteil der Massenbilanz des Endlagerinventars und wird deshalb auch nicht in der wasserrechtlichen Bewertung berücksichtigt.

3 Grundlagen zur Ermittlung grundwassergefährdender und chemotoxischer Stoffe

Das Gesamtinventar eines Endlagers (Basisinventar und Versatzmaterialien) setzt sich aus einer Vielzahl von organischen und anorganischen Stoffen zusammen. Darunter befinden sich auch grundwassergefährdende Stoffe sowie darüber hinaus weitere anorganische und organische chemotoxische Stoffe. Um den Schutzgedanken aus den einschlägigen Regelwerken zu berücksichtigen, wurden nicht nur die in der Anlage zur Grundwasserverordnung aus dem Jahre 1997 in der Liste I und II genannten Stoffe herangezogen, sondern darüber hinaus auch weitere Stoffe in die Erfassung chemischer und chemotoxischer anorganischer und organischer Stoffe einbezogen, für die in den einschlägigen Verordnungen, Regelwerken und Empfehlungen eine Grenzkonzentration bzw. ein Prüfwert genannt wird.

Welche Stoffe bei der Prüfung des Gesamtinventars auf Einhaltung der wasserrechtlichen Bestimmungen zu berücksichtigen sind, ist aus einschlägigen Verordnungen, Regelwerken und Empfehlungen qualitativ und quantitativ bekannt. Dazu zählen:

- die Anlage zur Grundwasserverordnung (1997), Listen I und II [2]
- die Neufassung der Trinkwasserverordnung von 1990 und deren Novellierung Mai 2001 [4,5]
- die Empfehlungen der Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) [8] einschließlich der im Entwurf vorliegenden aktualisierten Prüfwerte [9] und der Geringfügigkeitsschwellen [10]
- das Regelwerk des Deutschen Vereins des Gas- und Wasserfaches e.V. [11, 12]

Ergänzend werden auch internationale Empfehlungen und Regelwerke [13-16] für Wasserinhaltsstoffe herangezogen, für die Grenzkonzentrationen, Prüfwerte bzw. Richtwerte vorliegen. Als Grundlage zur Erstellung der Liste chemotoxischer Bestandteile wurden zudem die im Abs. 3.2.3 genannten Unterlagen verwendet.

Ferner sind stoffspezifische Regelungen zu berücksichtigen, z.B. für den Komplexbildner EDTA: Nach der Verordnung zur Bestimmung von Abfällen (Abfallbestimmungs-Verordnung - AbfBestV vom 03.04.1990) nach § 2 Abs. 2 des Gesetzes zur Vermeidung und Entsorgung von Abfällen (Abfallgesetz - AbfG vom 27.08.1986) sind bestimmte Abfälle aufgrund ihres Gehaltes an EDTA und ihrer Na-Salze als schädlichkeitsbestimmende Komponente für den Erzeuger gegenüber der örtlich zuständigen Behörde bundesweit meldepflichtig (Sonderabfall nach § 11 Abs. 3 AbfG).

3.1 Grundwassergefährdende Stoffe

Im Hinblick auf den Schutz des Grundwassers gegen Verschmutzung durch bestimmte gefährliche Stoffe wurden diese Stoffe den Listen I und II der Grundwasserverordnung [2*] zugeordnet. Im Einzelnen:

3.1.1 Liste I der Stofffamilien und Stoffgruppen

Die Liste I umfasst die einzelnen Stoffe der nachstehend 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.

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 der Liste II, soweit sie diese Wirkungen haben
5. Quecksilber und Quecksilberverbindungen
6. Cadmium und Cadmiumverbindungen
7. Mineralöle und Kohlenwasserstoffe
8. Cyanid

3.1.2 Liste II der Stofffamilien und Stoffgruppen

Die Liste II umfasst die einzelnen Stoffe und die Stoffkategorien aus den nachstehend aufgeführten Stofffamilien und Stoffgruppen, die eine schädliche Wirkung auf das Grundwasser haben können.

1. Folgende Metalloide und 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

[*] „Verordnung zur Umsetzung der Richtlinie 80/68/EWG des Rates vom 17. Dezember 1979 über den Schutz des Grundwassers gegen Verschmutzung durch bestimmte gefährliche Stoffe (Grundwasserverordnung) vom 18. März 1997“ Bundesgesetzblatt, Jahrgang 1997, Teil I, Nr. 18, S.542-544

3.2 Chemotoxische Stoffe

Neben den in der Liste I und II der Grundwasserverordnung genannten Stofffamilien und Stoffgruppen werden aus den in Abs. 3.2.3 genannten Unterlagen eine Liste der organisch chemotoxischen Stoffe und der anorganischen chemotoxischen Stoffe erstellt.

3.2.1 Organisch chemotoxische Stoffe

Aufgenommen in die Liste organischer chemotoxischer Stoffe wurden solche Stoffe, welche:

- persistent (d.h. beständig bzw. schwer abbaubar unter Umweltbedingungen) und hochtoxisch für den Menschen oder für andere lebende Organismen
- kanzerogen (d.h. krebserzeugend) bzw.
- teratogen (d.h. Missbildungen verursachend) bzw.
- mutagen (d.h. Mutationen verursachend) sind

und für die aufgrund dieser Eigenschaften in der Vergangenheit bereits einschlägige Vorschriften erlassen worden sind.

Die chemotoxischen organischen Stoffe wurden in die nachstehend genannten neun Verbindungsklassen unterteilt. Eine Auswahl typischer Vertreter der jeweiligen Klasse ist (in Klammern) ergänzt:

1. Alicyclische und aliphatische Verbindungen (Lindan, Aldrin)
2. Halogenierte Benzole und Phenylderivate (Hexachlorbenzol, PCB's)
3. Halogenierte Derivate von Diphenylmethan (DDT)
4. Anellierte Aromaten (Halogenierte Naphthaline, PAK's)
5. Halogenierte Phenole und Phenoxyverbindungen (Trichlorphenol, Diphenylether)
6. Heterocyclische Verbindungen (PCDD, PCDF)
7. Chelatbildner (EDTA, NTA) und Komplexbildner (Citronensäure, Weinsäure, Oxalsäure),
8. Tenside (Alkylsulfonate, Fettalkoholethoxilate, quaternäre Ammoniumverbindungen),
9. Halogenierte Triazine (Atrazin, Simazin).

Die Zuordnung zu den jeweiligen Verbindungsklassen erfolgte aufgrund von Ähnlichkeiten der Stoffe bezüglich Struktur und Eigenschaften.

3.2.2 Anorganisch chemotoxische Stoffe

Neben den chemotoxischen organischen Stoffen gibt es auch anorganische Stoffe und Verbindungen, die chemotoxisch sind und ebenfalls berücksichtigt wurden.

Die Liste der anorganischen chemotoxischen Stoffe umfasst die im Folgenden aufgeführten Metalle, Nichtmetalle und deren Verbindungen: Antimon, Arsen, Barium, Beryllium, Blei, Bor, Cadmium, Chrom, Cyanide, Kobalt, Kupfer, Molybdän, Nickel, Quecksilber, Selen, Silber, Tellur, Thallium, Titan, Uran, Vanadium, Wismut, Zink und Zinn.

3.2.3 Grundlagen zur Erstellung der Liste von chemotoxischen Stoffen

Aufgenommen in die Liste chemotoxischer Stoffe wurden solche Stoffe, welche:

- persistent und hochtoxisch für den Menschen oder für andere lebende Organismen
- kanzerogen, mutagen bzw. teratogen sind,

und für die aufgrund dieser Eigenschaften in der Vergangenheit bereits Vorschriften erlassen worden sind.

Als Grundlage zur Erstellung der Liste dienten folgende Unterlagen:

- Liste des "International Register of Potentially Toxic Chemicals" (IRPTC) über „Products whose consumption and/ or sale have been banned, withdrawn, severely restricted or not approved by governments“
- Arbeitsliste des "International Program on Chemical Safety" (IPCS)
- Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) „Empfehlungen für die Erkundung, Bewertung und Behandlung von Grundwasserschäden“ Stand: Oktober 1993“
- LAWA-Arbeitsgruppe 'Grundwasserschutz bei Abfallverwertung und Produkteinsatz' „Aktualisierte Prüfwerte der LAWA-Empfehlungen für die Erkundung, Bewertung und Behandlung von Grundwasserschäden“ Stand: 02. Dezember 1996“
- Eignung von Oberflächenwasser als Rohstoff für die Trinkwasserversorgung DVGW-Regelwerk, Arbeitsblatt W 151, Juli 1975
- Eignung von Fließgewässern für die Trinkwasserversorgung DVGW-Regelwerk, Technische Mitteilung, Merkblatt W 251, Stand August 1996
- Übereinkommen über die Verhütung der Meeresverschmutzung durch das Versenken von Abfällen und anderen Stoffen
- Klärschlammverordnung vom 25. Juni 1982, Bundesgesetzblatt, Jahrgang 1982, Teil I, S. 734-736
- Liste der kanzerogenen Stoffe der "International Agency for Research on Cancer" (IARC)
- Erklärung der Minister der dritten internationalen Nordseeschutz-Konferenz, Den Haag, 8. März 1990

- Bekanntmachung der Neufassung der Trinkwasserverordnung vom 5. Dezember 1990, Bundesgesetzblatt, Jahrgang 1990, Teil 1 und der Novellierung der Trinkwasserverordnung vom 21. Mai 2001
- World Health Organization „Guidelines for Drinking-Water Quality, Vol. 1: Recommendations“ WHO-Publications, Geneva (1984 + 1993/1998)
- Abfallbestimmungs-Verordnung – AbfBestV vom 03.04.1990
- Abfallgesetz – AbfG vom 27.08.1986 (Gesetz zur Vermeidung und Entsorgung von Abfällen)
- Einschlägige Literatur zur Ökologie

Ferner sind stoffspezifische Regelungen zu berücksichtigen, z.B. für den Komplexbildner EDTA:

In bezug auf organische chemotoxische Stoffe ist auf die Anwesenheit des Komplexbildners EDTA besonderes Augenmerk zu legen. Hier empfiehlt sich eine Mineralisierung (Veraschung) aller mit EDTA behafteten Abfallbestandteile, wenigstens ein weitgehender thermischer/katalytischer Abbau oder mindestens eine rigorose Kontrolle der EDTA-Mengen, die ohnehin von Seiten der Behörden vorgeschrieben ist, und zwar schon vor der geplanten Verwendung des starken Chelatbildners, siehe dazu auch die EDTA-spezifische Abfallbestimmungs-Verordnung. Nach der Verordnung zur Bestimmung von Abfällen (Abfallbestimmungs-Verordnung - AbfBestV vom 03.04.1990) nach § 2 Abs. 2 des Gesetzes zur Vermeidung und Entsorgung von Abfällen (Abfallgesetz - AbfG vom 27.08.1986) sind bestimmte Abfälle aufgrund ihres Gehaltes an EDTA und ihrer Na-Salze als schädlichkeitsbestimmende Komponente für den Erzeuger gegenüber der örtlich zuständigen Behörde bundesweit meldepflichtig (Sonderabfall nach § 11 Abs. 3 AbfG). Generell gilt: Organika gehören nicht in ein Endlager, sondern sind im Abfallinventar zu vermeiden oder vorgängig zu mineralisieren.

Zu den Massnahmen für eine mengenmässige Begrenzung der Problemstoffe gehört auch, dass ökotoxische anorganische Stoffe wie z.B. Kupfer und Blei vom unvermeidbaren Abfallinventar ferngehalten werden, d.h. rezykliert oder restriktiv verwendet werden. Dies ist technisch möglich wenn Kupferkabel „geschreddert“ und der Kupferkern rezykliert wird. Das Gleiche gilt auch für Blei, das häufig zur temporären Abschirmung gegen harte Gammastrahler (Co-60) eingesetzt wird und nach weitgehendem Abklingen der Dosisleistung entbehrlich wird. Blei könnte in vielen Fällen durch Eisen bzw. Bismut ersetzt werden, ohne später das Endlagerinventar zu belasten. Da Bor ebenfalls zu den anorganischen ökotoxischen Stoffen gehört, empfiehlt sich eine Rezyklierung der in Druckwasserreaktoren zur Reaktivitätsregelung verwendeten Borsäure, wie dies einige Zeit für DWR's praktiziert wurde (siehe auch die diesbezügliche Nutzung der Patente und die Patentsituation), damit die Anwesenheit von Problemstoffen im Endlager vermieden werden kann, die vermeidbar oder wenigstens weitgehend vermeidbar sind. Borsäure und andere Borverbindungen werden beim Kontakt mit Gesteinsschichten praktisch nicht sorbiert. Da Bor ökotoxisch ist, wurde 1983 die in der BR Deutschland bis dahin in der Heilkunde übliche Anwendung von Borsalbe und Borwasser (z.B. in der Augenheilkunde) verboten.

4 Materialien, Komponenten und Elemente im Gesamtinventar

4.1 Systematik der Erfassung und Datenauswertung

4.1.1 Datenbasis für die Erfassung des chemischen Inventars

Für die Herkunftskategorien F, I, K (Betriebsabfälle), U konnte eine zusammenfassende Darstellung des Abfallmengengerüsts der einzulagernden Gebinde mit radioaktiven Abfällen aus der Berichterstattung für das geplante Endlager Konrad entnommen werden. Auf dieser Grundlage wurden die Abfallvolumina aus dem Stand Konrad 1989 gemäss Abfallerhebung BfS für das Jahr 2000 auf den Kenntnisstand des Jahres 2000 angepasst [36]. Für Stilllegungsabfälle der Leistungsreaktoren, Versuchsreaktoren (AVR), Prototypreaktoren (VAK, HDR, THTR) und Forschungsreaktoren (TRIGA) wurde ein vollständig revidiertes Abfallmengengerüst erstellt. Das Gleiche gilt für das Basisinventar der Abfälle aus den Landessammelstellen, bei denen die Zusammensetzung der Abfälle der Landessammelstelle Bayern (Mitterteich) als weitgehend repräsentativ für die Zusammensetzung der Abfälle anderer Landessammelstellen verwendet wurde. Für die (konditionierten) Stilllegungsabfälle aus der Urananlage Ellweiler [52] wurden die Massenangaben aus den Angaben des zuständigen Generalunternehmers entnommen und in der Herkunftskategorie U berücksichtigt. Diese Basisdaten wurden zum Basisinventar (Abfall, Abfallbehälter, Fixierungsmittel und Verfüllmaterial) aufbereitet und in einem weiteren Schritt mit den für jedes Wirtsgestein vorgegebenen Versatzmaterialien und der jeweiligen chemischen Zusammensetzung der betreffenden Materialien und Komponenten verknüpft, um das chemische und chemotoxische Gesamtinventar erfassen zu können (siehe dazu Anhang A.).

Für die Modellierung des Brennelementkollektivs (BE) der Leistungs-, Versuchs-, Prototyp-, Forschungs- und Unterrichtsreaktoren (DWR, SWR, AVR, THTR, RAKE, RFR, RRR, SUR) zur Erfassung des Mengengerüsts von BE in MTIHM (und des real akkumulierten Aktivitätsinventars, siehe dazu Anhang C + D) wurde die Energiestatistik für die Leichtwasserreaktoren DWR und SWR bis und mit Reststromvereinbarung für die KKW berücksichtigt sowie die bekannten BE-Inventare von AVR und THTR aus der Fachliteratur [u.a. 53] erfasst. Die Strukturteile und der Kernbrennstoff der verschiedenen BE wurde mitsamt erreichtem bzw. geplantem Entladeabbrand sowie den Materialien, Komponenten und Elementen (z.B. Spurenverunreinigungen) sowie dem Mengengerüst der BE in MTIHM und in Mg Material erfasst. Von dieser Mengenbilanz abgezogen wurden alle BE, die von den Kunden vertraglich zur kommerziellen Wiederaufarbeitung bei COGEMA, BNFL, WAK vereinbart wurden. Die Kunden haben sich verpflichtet, die entstehenden spezifizierten hoch-, mittel- und schwachaktiven Wiederaufarbeitungsabfälle (W) zurückzunehmen oder auf der Basis eines ITP (Integrated Toxic Potential) nicht-spezifizierte gegen spezifizierte Wiederaufarbeitungsabfälle abzutauschen. Die nach heutigem Kenntnisstand zurückzunehmenden Abfälle aus der Wiederaufarbeitung wurden abfallsortenspezifisch und mengenmässig charakterisiert und bilanziert. Nach Abzug der BE für die Wiederaufarbeitung bleiben die BE für die direkte Endlagerung übrig (siehe dazu den separaten Anhang D.). Die mittelaktiven Abfälle, die aus der Wiederaufarbeitung von BE aus deutschen Materialtestreaktoren (MTR) in der Wiederaufarbeitungsanlage der UKAEA in Dounreay anfallen, sind gemäss heutigem Kenntnisstand ebenfalls berücksichtigt. Ungewiss ist derzeit, wieviele Abfallgebände aus Dounreay tatsächlich an die deutschen Kunden geliefert werden. Erwartet werden ca. 150 Abfallgebände [49], nach Schätzungen könnten es auch doppelt so viele sein. Dies ist insofern für das Inventar chemotoxischer Stoffe und die wasserrechtliche Bewertung von Bedeutung, weil $\text{Hg}(\text{NO}_3)_2$ als Katalysator für das Auflösen der Aluminium-Hüllrohre der MTR-Brennelemente in Dounreay eingesetzt wird und im zementierten mittelaktiven Abfall das Quecksilber verbleibt und damit an die deutschen Kunden übergeben wird.

Im Zusammenhang mit der Erfassung des Inventars erlaubte erst eine konsequente Anwendung von Begriffen, Begriffsbestimmungen (Nomenklatur) und anwendbaren DIN-Normen eine klare quantitative Zuordnung von Materialien, Komponenten und Elementen für das Gesamtinventar ohne Informationsverluste und Mehrfachzählungen.

Die in den Ausgangsdaten häufig verwendeten Begriffe für Materialien der Abfallbestandteile, Abfallbehälter, Fixierungsmittel, Verfüllmaterialien, Versatzmaterialien wie „Aktivkohle“, „FE-Metalle“, „Flugasche“, „Kunstharz“, „Harze“, „NE-Metalle“, „Zementstein“, „Zementmörtel“, „Beton“, „Schwerbeton“, „Sand“, „Kies“, „Steine“, „Erde“, „Mineralwolle“, „Bauschutt“, „Bitumen“, „Holz“, „Zellstoff“, „Textilien“, „Glas“, „Keramik“, „Kieselgur“, „Kunststoffe“, „Öl“, „Lösungsmittel“, „Gummi“, „Schrott“, „Schlämme“, „Stahl“, „VDK“, „PVC“ etc. mussten in die Komponenten und anschliessend in die chemischen Elemente aufgeschlüsselt werden, um für die Ermittlung des anorganischen und organischen Inventars im allgemeinen und für die Bilanzierung des chemotoxischen Inventars im speziellen verwendbar zu sein. Dabei ist zu berücksichtigen, dass es sich bei den betrachteten Materialien um technische Produkte handelt, die neben den

Hauptbestandteilen in der Regel z.B. Legierungsbestandteile (nichtrostende Stähle), Spurenelemente (Baustähle, nichtrostende Stähle und zementhaltige Materialien), Verunreinigungen und/oder Additive bzw. (inerte) Füllstoffe (Kunststoffe) bzw. Additive (waschaktive Substanzen - Tenside) enthalten, um ihren technischen Verwendungszweck bei einem wirtschaftlich attraktiven Preis erfüllen zu können.

Die Auswahl der zu untersuchenden Stoffe richtet sich u.a. nach Kriterien wie Persistenz (d.h. Widerstand gegen den Abbau dieser Stoffe unter Umweltbedingungen). Darüber hinaus wird der Kenntnisstand weiterer Unterlagen genutzt, die sich mit karzinogenen, mutagenen und teratogenen Wirkungen organischer und anorganischer Stoffe befassen, siehe dazu auch die Anlage Liste I und II der Grundwasserverordnung.

Die stofflichen Anteile

1. der **Abfälle**
2. der **Abfallbehälter**
3. der verwendeten **Fixierungsmittel**
4. der **Verfüllmaterialien** (zementhaltige Materialien, Quarzsand)
5. der **Versatzmaterialien** (Salzgrus/Salzbeton/ges. NaCl-Lösung bzw. Bentonit/Zementmörtel)

wurden qualitativ und quantitativ für die Erfassung des Gesamtinventars gemäß „**Zwiebelschalenprinzip**“ in drei Bearbeitungsschritten systematisch erfasst. Diese sind:

- a) das **Material**, z. B. „Bauschutt“ (anorganischer Abfall) bzw. „Kugelharze TS“ (organischer Abfall)
- b) die **Komponenten**, z. B. für das Material „Bauschutt“ (SiO_2 , CaO , Al_2O_3 , H_2O etc.) bzw. für das Material „Kugelharze“ (Polystyrol, Porenwasser etc.)
- c) die chemischen **Elemente** aus den Komponenten für das Material „Bauschutt“ (Si, Ca, Al, O, H etc.) bzw. für das Material „Kugelharze“ (C, H, O, N, S etc.)

In jedem einzelnen Material wurde nach der anorganischen bzw. organischen Natur der darin enthaltenen Komponenten und daraus abgeleitet der chemischen Elemente unterschieden, so dass beim Inventar eine Unterteilung in einen anorganischen bzw. organischen Anteil möglich ist.

Für generische Bezeichnungen von Materialien (z.B. „Anionische Tenside“) wurden die Auswertungen mit einem repräsentativen Vertreter durchgeführt, in diesem Fall „Dodecylbenzolsulfonat Na-Salz (DDBSA)“. Wie bereits erwähnt, wurde die chemische Form der Komponenten im Material generell unterschieden nach ihrer anorganischen bzw. organischen Natur, und wenn möglich nach zusätzlichen Angaben, wie z.B. Salz, Oxid, Legierung, Glas, mineralisch etc.

Darüber hinaus wurden die unterschiedlichen **Erscheinungsformen des Wassers** im Gesamtinventar qualitativ und quantitativ berücksichtigt. Es wurde zwischen „Kristallwasser“ bei Gips, Talkum, Glaubersalz, Salzgrus, Borax und Natriummetaborat, „Porenwasser“ bei Pulver- und Kugelharzen, PZ-Stein, PZ-Mörtel, Normal- und Hämatitbeton, Salzbeton, Schwerstbeton, „Adsorbiertes Wasser“ bei Sand, Kies, Steine, Kieselgur, Glas, Salzgrus und Schlacke unterschieden. „Gebundenes Wasser“ wurde bei PZ-Stein, PZ-Mörtel, Normal- und Hämatitbeton, Schwerstbeton, Salzbeton, Knochenleim, Kollagen, gesättigter NaCl-Lösung und VDK berücksichtigt. „Hydratwasser“ wurde für die zellulosehaltigen Materialien Holz, Papier, Baumwolle, Zellulose, Zellstoff und pflanzliche Abfälle berücksichtigt. Die Erscheinungsform, d.h. in welchem physikalisch-chemischen Bindungszustand das Wasser im Gesamtinventar vorkommt, ist für Untersuchungen wertvoll, z.B. in Bezug auf die Verfügbarkeit von Wasser für:

- die Bildung von Wasserstoff infolge Korrosion von Eisen (bzw. Aluminium, Zink in zementhaltigen Materialien mit stark alkalischem Porenwasser)
- Radiolyse des vorhandenen Wassers infolge ionisierender Strahlung (Alpha- und/oder Beta-/Gamma-Strah.)
- Quellungs- und Lösungsvorgänge (z.B. zellulosehaltige Materialien, lösliche Salze)
- die Entstehung galvanischer Zellen (Batterien) in Anwesenheit von Elektrolyten.

Wasser (H_2O) wird im Elementinventar nicht in die Elemente H und O zerlegt (Sonderfall), sondern als H_2O ausgewiesen. Dieses H_2O enthält die verschiedenen Erscheinungsformen des Wassers (Gebundenes Wasser,

Porenwasser, Adsorbiertes Wasser, Hydratwasser der zellulosehaltigen Materialien, Kristallwasser) als Summe.

Chrom wird im Elementinventar ebenfalls als Sonderfall behandelt. Die Massen von „Cr(VI)“, „Cr(III)“, und „Cr“ werden getrennt ausgewiesen, weil „Cr(VI)“ einen wasserrechtlich relevanten Parameter dargestellt. „Cr“ im Elementinventar enthält die Masse des Elements Chrom (z.B. Chrom in metallischer Form und als Legierungsbestandteil) ohne die „Cr(VI)“- und „Cr(III)“-Anteile, die im Elementinventar separat ausgewiesen werden. Im Gegensatz zum Elementinventar werden für die wasserrechtliche Bewertung beim Parameter „Cr“ alle Massenanteile von Chrom berücksichtigt, d.h. auch „Cr(VI)“, „Cr(III)“ sind im Parameter „Cr“ enthalten.

Um diese bis ins Detail gehende Charakterisierung zu ermöglichen, wurden umfangreiche Literaturrecherchen vorgenommen, Produkt- und Firmeninformationen verwendet, in- und ausländische Fachzeitschriften, Tagungsbände, Standardwerke der chemischen und physikalischen Fachliteratur, der Bau- und Werkstoffkunde sowie DIN-Vorschriften konsultiert und dieses Informationsangebot über einen weiten Zeithorizont ausgewertet. So wurden z.B. für die chemische Charakterisierung von PZ-Mörtel (Portlandzement-Mörtel), Normalbeton und Schwerbeton als Abfallbestandteil, als Fixierungsmittel für Abfälle, als Strukturmaterial für Abfallbehälter und für zementhaltige Verfüll- und Versatzmaterialien die folgenden **Elemente** berücksichtigt: Si, Ca, O, Fe, Al, Mg, S, K, C, Sr, Ti, Ba, Zn, Na, F, Mn, Zr, Co, Ni, Rb, V, Cu, Pb, Ce, Th, Li, La, Bi, Cl, Nd, Sn, Cr, Hf, Tm, Sc, Nb, Sm, Cs, U, Yb, Ho, Eu, Cd, Ag, Tl, Se, Te, Sb, As, Be, B, Hg sowie die Komponenten „Porenwasser“ und „Gebundenes Wasser“.

Bei der chemischen Zusammensetzung der Materialien und Komponenten wurden alle Inhaltsstoffe (Parameter), deren Messergebnis bei der Analyse als unterhalb der Bestimmungsgrenze eingestuft wurde, im Sinne einer konservativen (d.h. auf der sicheren Seite liegende) Betrachtungsweise als identisch mit der Bestimmungsgrenze berücksichtigt. Dies betrifft eine ganze Reihe wasserrechtlich relevanter Stoffe (u.a. chemotoxische Stoffe) anorganischer und organischer Natur, z.B. die Schadstoffgehalte in Flugasche als Bestandteil von Versatzmaterialien („Salzbeton“).

4.1.2 Nomenklatur

Um eine **einheitliche Nomenklatur** zu gewährleisten, werden in Übereinstimmung mit dem Norm-Entwurf DIN 25401 Teil 9 (Stand Februar 1986) und der Empfehlung des Ausschusses Endlagerung der Reaktor-Sicherheits-Kommission (RSK) vom 13. Juli 1984 dieselben Begriffsdefinitionen bei der Erfassung des Gesamtinventars verwendet, wie auch vom BfS u.a. für die Schachanlage KONRAD und das Endlager Morsleben (ERAM) angewendet, und zwar für:

- **Abfallbehälter:** Behälter zur Aufnahme eines Abfallproduktes (z.B. Blechtrommel, Rollsickenfass, Rollreifenfass, Betonbehälter, VBA, Pollux-BE-Behälter, Castor AVR- und THTR-BE-Behälter, Konrad-Container, Mosaik-Behälter, Edelstahl-Kokillen)
- **Abfallgebinde:** endzulagernde Einheit aus Abfallprodukt und Abfallbehälter
- **Abfallmatrix:** Ausgehärtetes Fixierungsmittel, in dem radioaktiver Abfall fixiert ist
- **Abfallprodukt:** verarbeiteter radioaktiver Abfall ohne Verpackung
- **Fixierungsmittel:** Material zur Fixierung von radioaktivem Abfall (z.B. PZ-Stein, PZ-Mörtel, Bitumen, Glasfritte, Hochofenschlacke-Zementstein, Polystyrol)
- **Verpackung (Endlagerung):** Gesamtheit der ein Abfallprodukt umschliessenden nicht wiederverwendbaren Behälter (z.B. inkl. VBA, Konrad-Container mit Fässern).

Weiter werden die Begriffe „Verfüllmaterial“ und „Versatzmaterial“ verwendet. Diese Begriffe wurden bereits früher, z.B. für die Schachanlage Konrad und für ERAM verwendet, sind aber in den dazugehörigen Unterlagen nicht exakt definiert worden. In diesem Bericht werden diese Begriffe wie folgt verwendet:

- **Verfüllmaterial:** Material zum Verfüllen des Zwischen- bzw. Ringraums bei ineinander gestellten Behältern, z.B. Quarzsand im Zwischenraum Einlagerungsbehälter/Kokillen, Zement im Zwischenraum Betonbehälter/Fass und vom Massenbeitrag her am wichtigsten Beton/Zement im Zwischenraum Container/Fässer
- **Versatzmaterial:** Wirtsgesteinfremde Materialien zum Verfüllen des Raumes zwischen dem Endlagergut (Abfallgebinde) und dem Wirtsgestein. Beispiele für Versatzmaterialien sind Salzgrus/Salzbeton/gesättigte NaCl-Lösung beim salinaren Wirtsgestein „Salinar“ und Bentonit/Zementmörtel bei den nicht-salinaren Wirtsgesteinen „Kristallin“, „Ton“, „Unter Tonüberdeckung“.

Darüber hinaus wird bei der Bezeichnung der zementhaltigen Materialien (PZ-Stein, PZ-Mörtel, Normalbeton, Hämatitbeton, Schwerbeton, armerter Beton) die in der Bundesrepublik Deutschland massgebende Zementnorm DIN 1164 (1978) zugrundegelegt. Das Gleiche gilt für die Bezeichnungen und verwendeten Kurzzeichen wichtiger Kunststoffe gemäss DIN 7728 Teil 1 (Jan. 1988).

4.1.3 Datenbasis für die Erfassung des Aktivitätsinventars

Für die Herkunftskategorien F, I, K (Betriebsabfälle), S (hier Forschungsreaktoren), U sowie aus der Herbeiführung des sicheren Einschlusses und der Entsorgung nach 20 Jahren Einschluss des AVR konnte eine zusammenfassende Darstellung des Aktivitätsinventars der einzulagernden Gebinde mit radioaktiven Abfällen aus dem Stand 1989 für das geplante Endlager Konrad entnommen werden. Auf dieser Grundlage wurden die Abfallvolumina aus dem Stand Konrad 1989 gemäss Abfallerhebung BfS für das Jahr 2000 [36] auf den Kenntnisstand des Jahres 2000 angepasst. Für Forschungsreaktoren (BE2, FG1, FG2, FJ1, FMB, FMZ, FR2, FRH, FRM, FRN, HD2, OHA, SAK) konnten die Aktivitätsinventare (Anzahl Gebinde pro Abfallsorte x Aktivitäten der Radionuklide in Bq/Gebinde) aus dem Stand Konrad 1989 übernommen werden. Für Stilllegungsabfälle der Leistungsreaktoren (14 DWR + 8 SWR), 5 x KGR + KKR, Prototypreaktoren (KKN, KWL, THTR, VAK) wurde der ISTec-Bericht A-292 [40] ausgewertet. Derselbe Bericht diente auch als Vorlage für die Erfassung des Aktivitätsinventars der Stilllegungsabfälle aus dem Siemens-Brennelemente-Werk Karlstein (SBWK). Hingegen wurde für das Aktivitätsinventar der hoch-, mittel- und schwachaktiven Wiederaufarbeitungsabfälle von COGEMA, BNFL, WAK-VEK, UKAEA Dounreay ein neues, vollständig revidiertes Aktivitätsinventar erstellt. Das Gleiche gilt für das Aktivitätsinventar der Abfälle aus den Landessammelstellen, bei denen die radiologische Zusammensetzung der Abfälle der Landessammelstelle Bayern (Mitterteich) als weitgehend repräsentativ für die Zusammensetzung der Abfälle anderer Landessammelstellen verwendet wurde. Für die (konditionierten) Stilllegungsabfälle aus der Urananlage Ellweiler [52] wurden die Aktivitäts- und Massenangaben den Angaben des zuständigen Generalunternehmers entnommen und in der Herkunftskategorie U berücksichtigt. Der Zeithorizont der Erfassung der anfallenden Abfälle orientierte sich an der Abfallerhebung BfS für das Jahr 2000. Aufgrund der „Vereinbarung zwischen der Bundesregierung und den Energieversorgungsunternehmen vom 14. Juni 2000“, die am 11. Juni 2001 unterzeichnet wurde, ergab sich ein Zeithorizont 2030 für den Anfall wärmeentwickelnder Abfälle der Herkunftskategorien BE und W. Für die vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfälle der Herkunftskategorien F, I, L, U wurde mit einem Zuwachs an prognostiziertem Abfallgebinder Volumen bis zum Zeithorizont 2080 gerechnet, für die Herkunftskategorie K und S wurde der Zuwachs an Abfallgebinder Volumen aus den o.g. Gründen auf den Zeithorizont 2040 begrenzt. Der Zeitpunkt 01.01.2030 dient als Referenzzeitpunkt für die erstmalige Erfassung des real akkumulierten Aktivitätsinventars der Abfälle aller Herkunftskategorien, gefolgt von den Zeithorizonten 30, 50, 100, 300, 1.000, 3.000, 10.000, 30.000, 100.000, 300.000 und 1 Mio. Jahre danach.

Im Anhang C sind die Aktivitätsinventare der Radionuklide in den Abfallgebinden bzw. der Abfallsorten für die Herkunftskategorien und die Dauer ihrer Entstehung von Jahr zu Jahr real akkumuliert, d.h. gemäss „Zwiebelschalenprinzip“ pro Herkunftskategorie über die Aktivität und Zeit bis hin zum Gesamtaktivitätsinventar akkumuliert. Unterschieden wurde dabei in den detaillierten Ergebnistabellen zwischen: Gesamtaktivität, Alpha-Aktivität, Beta-/Gamma-Aktivität, Aktivität der Aktiniden und Aktivität der Aktivierungs- und Spaltprodukte, jeweils in Bq vs. Zeit.

Im Anhang D sind die Ergebnistabellen zum gesamten Aktivitätsinventar (Bq) aller Herkunftskategorien vs. Zeit (Jahre) bei realer Akkumulation im Allgemeinen inkl. der Massenanteile Schwermetall in MTIHM und dem Aktivitätsinventar von BE + W als Aktivität (Becquerel) vs. Zeit (Jahre) im Besonderen ersichtlich.

Besondere Beachtung ist den radioaktiven Elementen auch deshalb zu widmen, da diese sowohl beim Masseninventar als auch beim Aktivitätsinventar einen Beitrag zum betreffenden Inventar leisten. Dies betrifft z.B. Spurenelementverunreinigungen (z.B. U, Th) in ansonsten inaktiven Materialien wie z.B. U und Th in zementhaltigen Materialien. Es betrifft aber auch radioaktive Elemente (und deren chemische Verbindungen) aus dem Aktivitätsinventar (z.B. U_3O_8 , ThO_2 , PuO_2 und andere radioaktive Elemente), die einen nicht zu vernachlässigenden Beitrag zum Masseninventar von U, Th, Pu etc. leisten können. Uran ist das einzige radioaktive Element, dessen Chemotoxizität höher ist als seine Radiotoxizität, so dass von der WHO ein „guideline value“ für Uran im Trinkwasser festgelegt wurde. Darüber hinaus werden die natürlich vorkommenden radioaktiven Elemente auch in Mineralwässern von Zeit zu Zeit stichprobenweise überwacht.

5 Ergebnisse der Erfassung des Masseninventars im salinaren bzw. nicht-salinaren Wirtsgestein

Für die nachstehend genannten 8 Herkunftskategorien wurden die Massenbeiträge und deren Ma-% zum Basisinventar von zur Zeit 1.433.768 Mg erfasst (Tab. 5-1), das sich nach dem „Zwiebelschalenprinzip“ aus dem eigentlichen Abfall, den Abfallbehältern, den Fixierungsmitteln sowie den Verfüllmaterialien ergibt (Tab. 5-2). Darüber hinaus ist bei der Erfassung des Gesamtinventars der Beitrag an Versatzmaterialien pro Wirtsgestein zu bilanzieren (Tab. 5-3 + 5-4). Dabei ergeben sich für das Wirtsgestein „Salinar“ insgesamt 3 verschiedene Massen an Versatzmaterialien (und Gesamtinventar) bei ansonsten immer gleichem Basisinventar für alle Wirtsgesteine aufgrund der 3 unterstellten Resthohlraumvolumina von 100.000 m³, 500.000 m³ und 1 Mio. m³, die sich mit gesättigter NaCl-Lösung auffüllen.

Das u.g. Basisinventar von 1,433 Mio. Mg wird sich noch um die Differenz der Massen aus den abgetrennten Spaltstoffen (WAU + Pu) aus der Wiederaufarbeitung abgebrannter BE und deren Rezyklierung in Form von WAU-BE, MOX-BE und überschüssigem, abgereichertem WAU („Tails“) verglichen mit dem bereits bilanzierten Bedarf an U-BE der Leistungsreaktoren in der Zukunft ändern.

Tabelle 5-1: Massenbeiträge der Herkunftskategorien zum Basisinventar

Herkunftskategorie	Masse [Mg]	Anteil [Ma-%]
Brennelemente (BE)	177.479	12,4
Forschungseinrichtungen (F)	148.281	10,3
Kerntechnische Industrie (I)	20.695	1,5
Kernkraftwerke (K)	467.538	32,6
Landessammelstellen (L)	47.293	3,3
Stilllegung (S)	550.984	38,4
Sonstige (U)	1.500	0,1
Wiederaufarbeitung (W)	19.998	1,4
Summe	1.433.768	100,0

Tabelle 5-2: Basisinventar (ohne Versatzmaterial) geordnet nach Abfall, Abfallbehälter, Fixierungsmittel und Verfüllmaterial in Mg und Ma-%

Beitrag	Masse [Mg]	Anteil [Ma-%]
Abfall	221.758	15,5
Abfallbehälter	868.302	60,6
Fixierungsmittel	175.379	12,2
Verfüllmaterial	168.329	11,7
Summe	1.433.768	100,0

5.1 Masseninventar von Abfall und Versatzmaterial zum Gesamtinventar

Tabelle 5-3: Massen Basisinventar und Versatzmaterialien für verschiedene Wirtsgesteine

Inventar	Basisinventar [Mg]	Versatzmaterial ohne NaCl-Lsg. [Mg]	NaCl-Lösung [Mg]	Σ Inventar [Mg]
Inventar ohne Versatzmaterial	1.433.768	-	-	1.433.768
"Salinar" mit 100.000 m ³ RHV	1.433.768	2.814.310	120.300	4.368.378
"Salinar" mit 500.000 m ³ RHV	1.433.768	2.814.310	601.500	4.849.578
"Salinar" mit 1 Mio. m ³ RHV	1.433.768	2.814.310	1.203.000	5.451.078
"Ton"	1.433.768	3.127.047	-	4.560.815
"Unter Tonüberdeckung"	1.433.768	3.212.715	-	4.646.483
"Kristallin"	1.433.768	8.397.574	-	9.831.342

5.2 Massenbeiträge der Versatzmaterialien für verschiedene Wirtsgesteine

Tabelle 5-4: Mengengerüst der Versatzmaterialien für die Wirtsgesteine

Versatzmaterial	Salinar 100.000 m ³ [Mg]	Salinar 500.000 m ³ [Mg]	Salinar 1 Mio. m ³ [Mg]	Kristallin [Mg]	Ton [Mg]	Unter Tonüberdeckung [Mg]
Bentonit	-	-	-	7.063.598	1.782.308	2.152.742
PZ-Mörtel	-	-	-	1.333.976	1.344.739	1.059.973
Salzbeton	274.517	274.517	274.517	-	-	-
Salzgrus	2.539.793	2.539.793	2.539.793	-	-	-
NaCl-Lösung	120.300	601.500	1.203.000	-	-	-
Summe	2.934.610	3.415.810	4.017.310	8.397.574	3.127.047	3.212.715

Zu den weltweiten Vorkommen an Bentonit erwähnt Walz [33] in seiner Diss. 1991, dass die prospektierten Bentonitvorkommen im süddeutschen Raum bei 9 Mio. Tonnen liegen und bei einer Jahresproduktion von 0,6 Mio. Tonnen im Jahr 1991 einer Sicherstellung des Rohstoffes Bentonit für ca. 15 Jahre entsprechen. In Bezug auf die geschätzten Ressourcen in Bayern könne mit einer Versorgung bis mindestens ins Jahr 2020 gerechnet werden. Wie aus der obigen Tabelle 5-4 zu entnehmen ist, würde der Bedarf an Bentonit als Versatzmaterial für das Wirtsgestein „Ton“ ca. 1,8 Mio. Mg, für „unter Tonüberdeckung“ ca. 2,2 Mio. Mg und für „Kristallin“ ca. 7,1 Mio. Mg betragen. Im Vergleich zu den USA als wichtigstes Förderland der Welt entspricht die Bentonitproduktion im süddeutschen Raum einem Anteil von 25%.

5.3 Massen der Materialien

Einen Überblick über die Reihenfolge der Materialien im Basisinventar nach Massenbeitrag geordnet zeigt Tab. 5-5, nach anorganischen und organischen Stoffen pro Inventarszenario zeigen Tab. 5-6 in Mg + 5-7 in Ma.-%.

Tabelle 5-5: Wichtigste Massenbeiträge der Materialien im Basisinventar (Inventar ohne Versatzmaterial)

Material	Masse [Mg]	Anteil am Basisinventar
Sphäroguss GGG 40	365.215,65914	0,254724
Normalbeton	280.067,41496	0,195337
Schwerbeton	199.080,40285	0,138851
PZ-Mörtel Z 350	121.660,51460	0,084854
Portl.zem.stein Z350	94.386,70149	0,065831
Pb99,9	65.243,30602	0,045505
Stahl 15 MnNi 6 3	58.175,00548	0,040575
Stahl RSt 37-2	25.695,88328	0,017922
Stahl St 37-2 W 22	20.146,03700	0,014051
Stahl 1.6751	13.596,54400	0,009483
Sp.Fuel+Str.Mat DWR	11.082,13420	0,007729
Stahl 1.4550	10.342,01555	0,007213
Stahl StW 22	7.425,55634	0,005179
Stahl St 52-3	6.757,79012	0,004713
Stahl 1.4541	6.510,90907	0,004541
Stahl 1.0405	6.021,83339	0,004200
Stahl Armierung	5.672,73342	0,003957
Getr.Verd.Konz.DWR	5.584,49319	0,003895
Baustahl	5.579,35127	0,003891
Stahl 1.4301	5.306,03758	0,003701
Sp.Fuel+Str.Mat SWR	4.840,95560	0,003376
Spannbeton	3.962,71200	0,002764
Polyethylen	3.915,65628	0,002731
Stahl 1.0440	3.734,81972	0,002605
Incoloy 800	3.599,00000	0,002510
Stahlguss GS 45	3.461,46986	0,002414
Altkabel	3.381,88791	0,002359
Stahl 1.4401	3.368,05908	0,002349
Metallschrott	2.963,86076	0,002067
Werkzeugstahl	2.942,37770	0,002052
Mexphalt R90/40	2.861,65100	0,001996
Stahl 1.6310	2.737,91994	0,001910
Mischabfall (L)	2.670,47818	0,001863
Kugelharze	2.666,45725	0,001860
Mineralwolle	2.541,20700	0,001772
Stahl GS18NiCr37	2.518,14297	0,001756
Stahl 15Ch2MFA	2.271,50000	0,001584
H&E COG.	2.241,51840	0,001563
PUR-Beschichtung	2.207,74023	0,001540
Magnet./Limonitbeton	2.012,88453	0,001404
Asche Standard	1.926,97476	0,001344
Getr.Verd.Konz.SWR	1.877,10074	0,001309
Glaswolle	1.837,95047	0,001282

Material	Masse [Mg]	Anteil am Basisinventar
Korund	1.760,91660	0,001228
Steinwolle	1.651,13147	0,001152
Asbest	1.579,86508	0,001102
SLLR techn.Abfl. BNFL	1.512,42400	0,001055
Stahl 1.4404	1.317,88280	0,000919
Stahl 1.4408	1.279,34169	0,000892
Polyvinylchlorid	1.227,49702	0,000856
Glasfritte COG.	1.150,70753	0,000803
Bauschutt	1.136,41831	0,000793
Hämatitbeton	1.100,00000	0,000767
HOS PZ-Stein H&E BNF	1.076,89950	0,000751
Aktivkohle	971,16869	0,000677
Stahl 1.4306 B	930,24000	0,000649
Stahl 1.4313	930,24000	0,000649
Kunstharz	901,69454	0,000629
Sp.Fuel+Str.Mat KGR	864,72500	0,000603
Stahl Z15 CN 24.13	831,11795	0,000580
Stahl 1.0481/17Mn4A	819,62870	0,000572
Kupfer	754,27111	0,000526
Stahl TStE 355	748,62470	0,000522
Stahl Schrauben	730,26885	0,000509
H&E BNFL	728,68050	0,000508
Barytbeton	705,36032	0,000492
Erde	698,29400	0,000487
Kohlestein	635,48125	0,000443
Kieselgur	632,93373	0,000441
Stahl 1.4551	627,97100	0,000438
Fugenmaterial	606,53540	0,000423
C-Stahl (verzinkt)	591,74600	0,000413
BE-Kästen SWR (K)	568,67040	0,000397
Polystyrol-DVB	563,11741	0,000393
Zircaloy 4	563,03583	0,000393
Bitumen COGEMA	558,88200	0,000390
AlMgSi0.5	545,77500	0,000381
Stahl 19Mn5+Mo	541,72604	0,000378
Steuerelemente SWR	519,44000	0,000362
Quarzsand	494,26200	0,000345
Pulverharze	492,33874	0,000343
Blei	486,92464	0,000340
Stahl MSt 37	482,59838	0,000337
Schlacke	479,51800	0,000334
Stahl 1.4436	460,71623	0,000321
Erdreich	459,78537	0,000321
Plastik	424,09452	0,000296
Platinen	416,15187	0,000290

Material	Masse [Mg]	Anteil am Basisinventar
Stahl 1.6958	413,17000	0,000288
Stahl SA 302 B	404,00000	0,000282
LAW-Konzentrat	398,76812	0,000278
MAW-Konzentrat	398,76812	0,000278
Zellstoff	389,12723	0,000271
Fäll.+Konz. COGEMA	375,64200	0,000262
HOS PZ-Stein FKS BNF	362,44886	0,000253
Laborabwasser TS	347,93400	0,000243
SE-Führungsrohre SWR	345,48800	0,000241
Stahl 1.4306	332,86144	0,000232
Schwerstbeton	330,00000	0,000230
Schutzanzüge	322,55805	0,000225
Stahl 1.4057	320,41600	0,000223
Fe2O3-Schlamm	317,35800	0,000221
Glas (Laborgeräte)	309,86100	0,000216
Σ o.g. Materialien	Σ 1.422.020,15032	Σ 0,991805
Σ Restliche Materialien	Σ 11.748,08907	Σ 0,008195
Σ Basisinventar	Σ 1.433.768,23939	Σ 1,000000

5.4 Massen von anorganischen und organischen Stoffen

5.4.1 Massen der anorganischen und organischen Stoffe pro Inventarszenario

Tabelle 5-6: Massen der anorganischen und organischen Stoffe pro Inventarszenario

	Basisinventar ohne Versatzmaterial [Mg]	Salinar 1 Mio. m ³ [Mg]	Ton [Mg]	Unter Tonüberdeckung [Mg]	Kristallin [Mg]
anorg. Stoffe	1.412.757	5.429.842	4.539.447	4.625.041	9.808.918
organ. Stoffe	21.011	21.236	21.368	21.442	22.424
Summe	1.433.768	5.451.078	4.560.815	4.646.483	9.831.342

In der Masse anorganischer Stoffe sind auch anorganische chemotoxische Stoffe, in der Masse organischer Stoffe auch organische chemotoxische Stoffe enthalten.

5.4.2 Massenprozent der anorganischen und organischen Stoffe pro Inventarszenario

Tabelle 5-7: Massenprozent der anorganischen und organischen Stoffe pro Inventarszenario

	Basisinventar ohne Versatz- material [Ma.-%]	Salinar 1 Mio. m³ [Ma.-%]	Ton [Ma.-%]	Unter Ton- überdeckung [Ma.-%]	Kristallin [Ma.-%]
anorg. Stoffe	98,53%	99,61%	99,53%	99,54%	99,77%
organ. Stoffe	1,47%	0,39%	0,47%	0,46%	0,23%
Summe	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%

5.4.3 Massen der anorganischen und organischen chemotoxischen Stoffe (Auswahl)

Die u.g. Wasserinhaltsstoffe aus Tabelle 5-8 haben bei der Prüfung auf Einhaltung der wasserrechtlichen Schutzziele am ehesten zu Überschreitungen der Prüfwerte (PW) im oberflächennahen Grundwasser bzw. Grenzkonzentrationen (GK) im Trinkwasser geführt, siehe auch Tabelle 8-7.

Tabelle 5-8: Mengengerüst für ausgewählte Wasserinhaltsstoffe im Basisinventar mit und ohne Versatzmaterialien (siehe auch Abb. 2, 3 + 5)

Wasser- inhaltsstoff	Basisinventar ohne Versatz- material [Mg]	Salinar 1 Mio. m³ [Mg]	Ton [Mg]	Unter Ton- überdeckung [Mg]	Kristallin [Mg]
Anorganika:					
As	14,64	26,74	20,86	20,96	30,87
B	955,90	983,78	957,87	957,45	957,85
Cd	89,91	90,24	90,05	90,04	90,20
K	5.283,17	41.798,70	40.580,41	41.673,28	100.963,99
Li	55,28	89,29	155,34	167,06	387,55
Pb	65.775,36	65.828,00	65.836,69	65.846,14	65.995,07
Rb	33,67	53,70	233,80	257,23	698,21
Te	9,32	9,47	9,34	9,34	9,34
Tl	0,038	3,05	0,077	0,069	0,077
Y	8,96	8,96	55,30	64,93	192,61
Organika:					
Öl-KW	82,35	82,35	82,35	82,35	82,35
NIT	161,11	161,11	161,11	161,11	161,11

Was die geringen Massen an Tl in den Versatzmaterialien bei den Wirtsgesteinen Ton, unter Tonüberdeckung und Kristallin betrifft, verglichen mit dem Wirtsgestein Salinar, so waren keine Analysenwerte für Tl im Versatzmaterial Bentonit verfügbar. Aus geochemischen Analysen ist allerdings bekannt, dass Tl mit ca. 0,8 ppm als Spurenelement in Tonmineralien vorkommt. Übernimmt man diesen Wert für das Tonmineral Bentonit, so ergeben sich zusätzliche Massen von Tl im Versatzmaterial Bentonit für die nicht-salinaren Wirtsgesteine von ca. 1,51 Mg Tl für Ton, ca. 1,79 Mg Tl für Unter Tonüberdeckung und ca. 5,73 Mg Tl für Kristallin. Infolge guter Löslichkeit von Thalliumsalzen lässt sich das minimal notwendige Wasservolumen berechnen, mit dem

die Grenzkonzentration von Tl im Trinkwasser eingehalten würde. Dieses Verdünnungswasservolumen bleibt gleichwohl bei allen o.g. nicht-salinaren Wirtsgesteinen (Kristallin, Ton, unter Tonüberdeckung) und allen drei Resthohlraumvolumina unter dem notwendigen Verdünnungswasservolumen für andere Wasserinhaltsstoffe. Beim Wirtsgestein Salinar führt der Thalliumgehalt im Salzgrus (und im Salzbeton) zum ausschlaggebenden Verdünnungswasservolumen bei einem unterstellten Resthohlraumvolumen von 100.000 m³, bevor Cd für 500.000 m³ bzw. 1 Mio. m³ Resthohlraumvolumen das minimal notwendige Verdünnungswasservolumen bestimmt.

An dieser Stelle ist zu erwähnen, dass die z.B. im ANHANG B genannten Massenangaben mit 5 Stellen nach dem Komma der Qualitätskontrolle und der Nachvollziehbarkeit des Inventars (keine Mehrfachzählungen und keine Massenlücken) dienen, ansonsten z.B. 0,00058 Mg Berylliumpulver als Bestandteil sekundärer Neutronenquellen in der Masseinheit [Mg] nicht mehr wiedergegeben würde, beträgt doch der Unterschied der Massen von 0,00058 Mg Be zu 280.067 Mg Normalbeton mehr als acht Grössenordnungen.

6 Ergebnisse der Erfassung des Aktivitätsinventars inkl. Massenanteile Schwermetall kumulativ

6.1 Modellierung des gesamten Aktivitätsinventars an BE + W vs. Zeit, reale Akkumulation und Massenanteile Schwermetall in MTIHM

Die folgende Tabelle fasst die **Inventare an BE, welche der direkten Endlagerung zugeführt werden**, zusammen. Bei DWR und SWR werden die jeweiligen Inventare anteilmässig, entsprechend dem Massenanteil Schwermetall, welcher der direkten Endlagerung zugeführt wird, aufgeteilt.

Tabelle 6-1: Gesamtmasse Schwermetall [MTIHM] und Aktivität [Bq] der BE, welche der direkten Endlagerung zugeführt werden, bezogen auf den Referenzzeitpunkt 01.01.2030

Reaktoren	Masse Brennstoff [MTIHM] zur Endlagerung direkt	01.01.2030 [Bq]	30 a [Bq]	50 a [Bq]	100 a [Bq]	300 a [Bq]	1.000 a [Bq]
DWR	7.109,990	7,83E+19	3,55E+19	2,22E+19	7,92E+18	1,30E+18	4,95E+17
SWR	3.323,457	3,07E+19	1,40E+19	8,82E+18	3,22E+18	5,71E+17	2,13E+17
KGR, KKR	581,800	3,95E+18	1,89E+18	1,21E+18	4,57E+17	9,44E+16	3,74E+16
AVR, THTR	9,053	9,56E+16	4,72E+16	2,97E+16	9,58E+15	4,34E+14	1,96E+14
Rosendorf RFR, RAKE, RRR	2,104	9,37E+15	9,01E+15	5,69E+15	1,85E+15	7,44E+13	2,12E+13
Siemens Unterrichtsreaktoren	0,039	2,74E+10	2,16E+10	2,04E+10	1,91E+10	1,85E+10	1,89E+10
NS Otto Hahn	0,033	7,05E+13	3,50E+13	2,25E+13	8,19E+12	1,46E+12	7,68E+11
FR-Entsorgung bis 2010	0,570	1,79E+16	8,73E+15	5,46E+15	1,70E+15	2,55E+13	4,83E+12
Direkte Endlagerung	11.027,045	1,13E+20	5,15E+19	3,23E+19	1,16E+19	1,97E+18	7,45E+17

Reaktoren	3.000 a [Bq]	10.000 a [Bq]	30.000 a [Bq]	100.000 a [Bq]	300.000 a [Bq]	1 Mio. a [Bq]	
DWR	1,82E+17	1,13E+17	5,13E+16	1,74E+16	1,16E+16	6,62E+15	
SWR	7,90E+16	4,96E+16	2,31E+16	7,82E+15	4,91E+15	2,80E+15	
KGR, KKR	1,41E+16	8,81E+15	4,02E+15	1,29E+15	8,40E+14	4,92E+14	
AVR, THTR	1,97E+14	3,10E+14	3,91E+14	3,09E+14	1,39E+14	1,18E+13	
Rosendorf RFR, RAKE, RRR	1,23E+13	9,11E+12	5,82E+12	3,72E+12	2,86E+12	1,38E+12	
Siemens Unterrichtsreaktoren	2,08E+10	2,99E+10	5,37E+10	9,94E+10	1,00E+11	2,65E+10	
NS Otto Hahn	4,63E+11	3,17E+11	1,53E+11	4,15E+10	2,34E+10	1,31E+10	
FR-Entsorgung bis 2010	3,99E+12	3,26E+12	2,30E+12	1,43E+12	9,48E+11	5,31E+11	
Direkte Endlagerung	2,75E+17	1,72E+17	7,88E+16	2,68E+16	1,75E+16	9,92E+15	

Die folgende Tabelle fasst die Inventare in MTIHM, welche aus der **Wiederaufarbeitung** stammen, zusammen. Bei COGEMA HAW Glas und BNFL Blended Glass werden die vertraglich kontrahierten Mengen Schwermetall aufgeführt, welche wiederaufgearbeitet werden können.

Tabelle 6-2: Gesamtmasse Schwermetall [MTIHM] und Aktivität [Bq] der aus der Wiederaufarbeitung zurückkommenden Abfälle, bezogen auf den Referenzzeitpunkt 01.01.2030

Kategorie	Masse Brennstoff [MTIHM] zur Wiederaufarbeitung	01.01.2030 [Bq]	30 a [Bq]	50 a [Bq]	100 a [Bq]	300 a [Bq]	1.000 a [Bq]
COGEMA HAW Glas	5.708,000	3,41E+19	1,70E+19	1,07E+19	3,50E+18	2,18E+17	6,79E+16
BNFL Blended Glass	1.060,000	8,84E+18	4,39E+18	2,77E+18	8,91E+17	4,04E+16	1,13E+16
COGEMA Hülsen und Endstücke		2,38E+17	1,53E+17	1,26E+17	8,37E+16	2,10E+16	2,50E+15
COGEMA Bituminierte Fällungen und Konzentrate		5,61E+15	2,52E+15	1,60E+15	6,68E+14	2,15E+14	1,14E+14
BNFL Hulls and Ends		9,18E+16	5,17E+16	4,02E+16	2,49E+16	5,92E+15	6,72E+14
BNFL MEB- und BaCO ₃ -Schlämme		2,18E+13	2,03E+13	1,96E+13	1,83E+13	1,59E+13	1,41E+13
BNFL Feedklärschlämme		3,43E+15	1,66E+15	1,13E+15	5,84E+14	3,29E+14	2,80E+14
BNFL Solid Low Level Residues		1,28E+11	4,48E+10	2,60E+10	1,14E+10	5,32E+09	2,29E+09
WAK	212,200	4,08E+17	2,04E+17	1,29E+17	4,25E+16	2,89E+15	8,72E+14
UKAEA ILR zementiert (Dounreay)	0,206	6,30E+15	3,11E+15	1,94E+15	6,07E+14	1,06E+13	3,17E+12
Wiederaufarbeitung	6.980,406	4,37E+19	2,18E+19	1,38E+19	4,54E+18	2,88E+17	8,37E+16

Kategorie	3.000 a [Bq]	10.000 a [Bq]	30.000 a [Bq]	100.000 a [Bq]	300.000 a [Bq]	1 Mio. a [Bq]	
COGEMA HAW Glas	1,45E+16	8,79E+15	5,22E+15	3,60E+15	2,63E+15	1,49E+15	
BNFL Blended Glass	2,38E+15	1,63E+15	1,22E+15	9,45E+14	6,81E+14	3,65E+14	
COGEMA Hülsen und Endstücke	2,14E+15	1,86E+15	1,43E+15	7,47E+14	1,92E+14	6,49E+13	
COGEMA Bituminierte Fällungen und Konzentr.	6,89E+13	4,81E+13	2,86E+13	1,95E+13	1,74E+13	1,17E+13	
BNFL Hulls and Ends	5,87E+14	5,21E+14	4,06E+14	2,10E+14	4,97E+13	1,49E+13	
BNFL MEB- und BaCO ₃ -Schlämme	1,10E+13	4,80E+12	5,18E+11	7,97E+10	6,09E+10	5,56E+10	
BNFL Feedklärschlämme	2,58E+14	2,43E+14	2,20E+14	1,73E+14	9,07E+13	1,09E+13	
BNFL Solid Low Level Residues	9,30E+08	6,67E+08	5,21E+08	6,13E+08	6,67E+08	4,01E+08	
WAK	1,76E+14	1,18E+14	8,63E+13	6,40E+13	4,57E+13	2,40E+13	
UKAEA ILR zementiert (Dounreay)	2,56E+12	2,11E+12	1,63E+12	1,40E+12	1,13E+12	3,09E+11	
Wiederaufarbeitung	2,01E+16	1,32E+16	8,61E+15	5,76E+15	3,71E+15	1,98E+15	

Die folgende Tabelle summiert die beiden vorhergehenden Tabellen und gibt somit **das gesamte Aktivitätsinventar von Brennelementen (BE) und Wiederaufarbeitungsabfällen (W)** aus der kommerziellen Nutzung der Kernenergie gemäss Vereinbarung vom 14. Juni 2001 an, welches der Endlagerung zugeführt wird.

Tabelle 6-3: Gesamtmasse Schwermetall [MTIHM] und Aktivität [Bq] des gesamten der Endlagerung zugeführten Inventars von BE und W, bezogen auf den Referenzzeitpunkt 01.01.2030

Kategorie	Masse Brennstoff [MTIHM]	01.01.2030 [Bq]	30 a [Bq]	50 a [Bq]	100 a [Bq]	300 a [Bq]	1.000 a [Bq]
Direkte Endlagerung	11.027,045	1,13E+20	5,15E+19	3,23E+19	1,16E+19	1,97E+18	7,45E+17
Wiederaufarbeitung	6.980,406	4,37E+19	2,18E+19	1,38E+19	4,54E+18	2,88E+17	8,37E+16
Summe	18.007,451	1,57E+20	7,32E+19	4,61E+19	1,62E+19	2,26E+18	8,29E+17

Kategorie	3.000 a [Bq]	10.000 a [Bq]	30.000 a [Bq]	100.000 a [Bq]	300.000 a [Bq]	1 Mio. a [Bq]	
Direkte Endlagerung	2,75E+17	1,72E+17	7,88E+16	2,68E+16	1,75E+16	9,92E+15	
Wiederaufarbeitung	2,01E+16	1,32E+16	8,61E+15	5,76E+15	3,71E+15	1,98E+15	
Summe	2,95E+17	1,85E+17	8,74E+16	3,26E+16	2,12E+16	1,19E+16	

6.2 Modellierung des gesamten Aktivitätsinventars aller Abfälle vs. Zeit bei realer Akkumulation

Neben den Nuklidinventaren der Herkunftskategorie "Direkte Endlagerung von Brennelementen (BE)" und "Wiederaufarbeitungsabfälle (W)" wurde auch das Inventar der "Stilllegungsabfälle (S)" erfasst, also der bei der Nachbetriebsphase und beim Rückbau jeder Anlage anfallenden Radionuklide. Das Inventar wurde für jede Anlage zum Zeitpunkt der Stilllegung erfasst und anschliessend real zwiebelschalenartig akkumuliert. Weiter sind die Herkunftskategorien "F (Forschungseinrichtungen)", "I (kerntechnische Industrie)", "K (Abfälle aus dem Betrieb der Kernkraftwerke)", "L (Landessammelstellen)", sowie "U (von sonstigen Ablieferungspflichtigen)" berücksichtigt. Ausgehend vom Referenzzeitpunkt 01.01.2030 wurden die üblichen 11 Zeithorizonte bis 1 Million Jahre gerechnet.

Die folgende Tabelle zeigt das gesamte Aktivitätsinventar in den acht erwähnten Herkunftskategorien (BE, F, I, K, L, S, U, W):

Tabelle 6-4: Aktivität [Bq] des gesamten der Endlagerung zugeführten Inventars bezogen auf den Referenzzeitpunkt 01.01.2030 und unterteilt in die acht Kategorien der Abfälle aus: direkte Endlagerung von BE (BE), Forschungseinrichtungen (F), Kerntechnische Industrie (I), Betriebsabfälle der KKW (K), Landessammelstellen (L), Stilllegungsabfälle (S), sonstige Ablieferungspflichtige (U) sowie Wiederaufarbeitung von BE (W).

Kategorie	01.01.2030 [Bq]	30 a [Bq]	50 a [Bq]	100 a [Bq]	300 a [Bq]	1.000 a [Bq]
BE	1,13E+20	5,1457E+19	3,23E+19	1,16E+19	1,97E+18	7,45E+17
F	4,61E+15	3,29E+15	2,84E+15	9,00E+14	1,01E+14	4,63E+13
I	5,88E+15	3,22E+15	2,71E+15	1,29E+15	7,97E+14	3,80E+14
K	8,20E+15	4,93E+15	3,96E+15	2,48E+15	5,65E+14	4,34E+13
L	5,76E+13	5,79E+13	5,83E+13	4,83E+13	4,20E+13	3,54E+13
S	2,14E+17	1,48E+17	1,23E+17	8,20E+16	1,98E+16	1,74E+15
U	1,61E+12	2,11E+12	2,31E+12	9,39E+11	6,52E+11	7,01E+11
W	4,37E+19	2,18E+19	1,38E+19	4,54E+18	2,88E+17	8,37E+16
Summe	1,57E+20	7,34E+19	4,62E+19	1,62E+19	2,28E+18	8,31E+17

Kategorie	3.000 a [Bq]	10.000 a [Bq]	30.000 a [Bq]	100.000 a [Bq]	300.000 a [Bq]	1 Mio. a [Bq]
BE	2,75E+17	1,7161E+17	7,88E+16	2,68E+16	1,75E+16	9,92E+15
F	2,54E+13	1,67E+13	8,04E+12	3,21E+12	3,85E+12	5,86E+12
I	1,85E+14	1,18E+14	5,54E+13	2,19E+13	1,43E+13	7,66E+12
K	3,89E+13	3,57E+13	2,93E+13	1,53E+13	2,47E+12	1,99E+10
L	2,71E+13	1,52E+13	8,09E+12	8,37E+12	9,52E+12	9,77E+12
S	1,36E+15	8,54E+14	4,34E+14	2,13E+14	6,22E+13	2,48E+13
U	7,67E+11	7,22E+11	6,06E+11	5,04E+11	4,22E+11	4,09E+11
W	2,01E+16	1,32E+16	8,61E+15	5,76E+15	3,71E+15	1,98E+15
Summe	2,97E+17	1,86E+17	8,80E+16	3,29E+16	2,13E+16	1,19E+16

Im Anhang C sind die zusammenfassenden Ergebnisse der realen Akkumulation der radioaktiven Abfälle aller Herkunftskategorien und die Abklingrechnung als Aktivität (Becquerel) vs. Zeit (Jahre) detailliert dargestellt. Dabei wird für jede Herkunftskategorie sowie aus der Summe aller Herkunftskategorien (Gesamtinventar) unterschieden zwischen: Gesamtaktivität, Alpha-Aktivität, Beta-/ Gamma-Aktivität, Aktivität der Aktiniden und Aktivität der Aktivierungs- und Spaltprodukte, jeweils in Bq vs. Zeit.

Im Anhang D sind die Ergebnistabellen zum gesamten Aktivitätsinventar (Bq) aller Herkunftskategorien vs. Zeit (Jahre) bei realer Akkumulation im Allgemeinen inkl. der Massenanteile Schwermetall in MTIHM und dem Aktivitätsinventar von BE + W als Aktivität (Becquerel) vs. Zeit (Jahre) im Besonderen ersichtlich.

7 Modellbetrachtungen zur Ermittlung von Konzentrationen für alle wasserrechtlich relevanten Wasserinhaltsstoffe des Gesamtinventars im salinaren bzw. nicht-salinaren Wirtsgestein

7.1 Grundlagen für die Ermittlung der Konzentrationen

Das weitere Vorgehen bei der Bewertung der wasserrechtlich relevanten Stoffe des Inventars gliedert sich in 2 Schritte für die nicht-salinaren Lösungen der Wirtsgesteine Ton, unter Tonüberdeckung, Kristallin und in 3 Schritte für die salinare Lösung des Wirtsgesteins Salinar. Es sind unterstellte Resthohlräume von 100.000 m³, 500.000 m³ und 1.000.000 m³ sowie unterstellte Verdünnungsfaktoren von 500, 5.000 und 50.000 zu verwenden. Die Lösungsszenarien und das weitere Vorgehen im Einzelnen:

7.2 Vorgehensweise bei der Ermittlung der Konzentrationen wasserrechtlich relevanter Wasserinhaltsstoffe

7.2.1 Hypothetische vollständige Lösung aller wasserrechtlich relevanten Wasserinhaltsstoffe

Schritt 1: Unterstellte hypothetische vollständige Löslichkeit in reinem Wasser mit anschliessender Verdünnung:

Im ersten Schritt wird die hypothetische vollständige Löslichkeit der wasserrechtlich relevanten Stoffe in reinem Wasser unterstellt. Dabei werden **minimal 50 Mio. m³** (aus 100.00 m³ x Verdünnung 500) und **maximal 50 Mia. m³** (aus 1.000.000 m³ x Verdünnung 50.000) Verdünnungswasservolumina angenommen und die sich einstellende Konzentration mit der zulässigen Grenzkonzentration bzw. Prüfwert verglichen. Der Quotient zeigt dann eine Unterschreitung bzw. Überschreitung der zulässigen Konzentration des jeweiligen Wasserinhaltsstoffes an. Dieses Vorgehen zeigt bei Unterschreitung mit Sicherheit die wasserrechtlich relevanten Stoffe an, die aufgrund ihres zu geringen Inventars bei der o.g. Verdünnung gar nicht in der Lage sind, Grenzkonzentrationen bzw. Prüfwerte zu überschreiten. Selbst für den Fall der salinaren Lösung ist bei Unterschreitung die Bildung von möglichen Chlorokomplexen der wasserrechtlich relevanten Stoffe nicht weiter zu berücksichtigen, da eine vollständige Löslichkeit nicht weiter erhöht werden kann. Bei sehr gut wasserlöslichen Stoffen ist zu erwarten, dass die resultierende Konzentration bei Berücksichtigung der realen Löslichkeit identisch mit dem Fall der hypothetischen vollständigen Löslichkeit ist. Für den Fall der Überschreitung der zulässigen Konzentrationen geht die Prüfung des Löslichkeitsverhaltens von Schritt 1 im Schritt 2 weiter.

7.2.2 Reale Löslichkeit von wasserrechtlich relevanten Wasserinhaltsstoffen in reinem Wasser

Schritt 2: Löslichkeitsverhalten in reinem Wasser mit anschliessender Verdünnung:

Im zweiten Schritt wird die Konzentration der Stoffe unter Verwendung der Löslichkeiten in reinem Wasser ermittelt. Diejenigen Stoffe, die aufgrund ihrer stoffspezifischen Eigenschaften mit dem Wasser schwerlösliche Verbindungen bilden oder deren Löslichkeit begrenzt ist (Sättigung!) werden damit erfasst und erkannt. Dabei werden die Betrachtungen so geführt, als seien die einzelnen Stoffe jeweils allein im Wasser gelöst. Die Annahme, dass jeder Stoff für sich alleine in reinem Wasser neben allen anderen Stoffen gelöst wird, stellt bereits eine sehr konservative (d.h. weit auf der sicheren Seite liegende) Annahme dar. In der Praxis konkurrieren alle in Wasser leicht löslichen bzw. schwerlöslichen Stoffe mit dem zur Verfügung stehenden Wasseranteil, der nicht gleichzeitig allen Stoffen gehören kann. Deshalb werden unter praktischen Bedingungen auch vorwiegend Aussalz- und selten Einsalzeffekte beobachtet. Die Bildung schwerlöslicher Verbindungen und deren Wiederauflösung durch überschüssige Salzanteile in salinaren Lösungen (hier Bildung von Chlorokomplexen) ist möglich, doch muss deren Wiederausfällung bei einsetzender Verdünnung ebenfalls berücksichtigt werden, was zu Schritt 3 überleitet.

7.2.3 Reale Löslichkeit von wasserrechtlich relevanten Wasserinhaltsstoffen im Wasseranteil der gesättigten NaCl-Lösung

Schritt 3: Löslichkeitsverhalten in salinaren Lösungen mit anschliessender Verdünnung:

Für Lösungsvorgänge steht hier nur der reine Wasseranteil von z.B. 72,5 Ma.-% der gesättigten NaCl-Lösung

zur Verfügung, da die Bestandteile des Inventars sich nicht im Salz, sondern nur im Wasseranteil der salinaren Lösung lösen, in der die Salze der gesättigten NaCl-Lösung bereits gelöst sind. Die Bildung von Chlorokomplexen ist konzentrationsabhängig, d.h. reversibel bei einsetzender Verdünnung. Die Löslichkeit gewisser Stoffe wird aufgrund des Löslichkeitsproduktes bei gleichionigem Zusatz (gelöste Bestandteile der gesättigten NaCl-Lösung) vermindert, sofern keine (reversible) Komplexbildung eintritt. Löslichkeitserhöhungen aufgrund der Anwesenheit von Chloriden werden berücksichtigt.

Die o.g. Schritte 1-3 dienen dem Verständnis für eine pragmatische und nachvollziehbare Vorgehensweise im Hinblick auf das Löslichkeitsverhalten der wasserrechtlich relevanten Stoffe und der Prüfung auf Einhaltung der wasserrechtlichen Bestimmungen.

Von einer Herabsetzung der Konzentration der betrachteten Wasserinhaltsstoffe infolge Sorption an Feststoffoberflächen (Basisinventar, Versatzmaterial, Wirtsgestein) wird bei keinem der Wasserinhaltsstoffe Kredit genommen.

7.3 Konzentrationsänderungen bei abbaubaren organischen chemotoxischen Stoffen

Eine umfassende wasserrechtliche Bewertung hat bei rechnerischen Überschreitungen der Grenzwerte auf Aspekte aufmerksam zu machen, welche z.B. den biochemischen Abbau von organischen chemotoxischen Stoffen wie BTEX, NTA, Tenside und damit eine zeitliche Abnahme der Anfangskonzentration bzw. die Konzentrationseinstellung anorganischer chemotoxischer Stoffe wie Cu + Pb betreffen. Dies soll anhand einiger Beispiele näher ausgeführt und erläutert werden.

Bei der In-situ-Sanierung eines BTEX-Schadens zeigte sich, dass im Grundwasserleiter vorhandener Sauerstoff, Nitrat und Sulfat beim Abbau von BTEX-Aromaten mikrobiell verwertet werden, worauf das Redoxpotential von anfänglich + 150 mV auf – 100 mV wechselte [30]. Unter diesen sulfatreduzierenden Bedingungen werden nicht nur die BTEX-Aromaten weitgehend mikrobiell umgesetzt, sondern auch polare Verbindungen (z.B. Kohlenwasserstoffe) eliminiert. Zum Vergleich: das Redoxpotenzial in den Einlagerungsbereichen des Endlagers im Wirtsgestein „Kristallin“ (+50 bis –580 mV), „Ton“ (ca. –185 mV) und „Unter Tonüberdeckung“ wird im Bereich –130 mV (pH 7) bis - 300 mV (pH 8) erwartet.

Das Abbauverhalten von Tensiden (grenzflächenaktiven Verbindungen) ist von deren chemischer Struktur abhängig und wird für die nichtionogenen und anionaktiven Tenside von Brüsweiler [31] erläutert. Bei nichtionogenen Tensiden findet eine Hydrolyse der Polyglykoethergruppen und damit ein Abbau der waschaktiven Substanz statt, so z.B. beim Dodecylpolyglykoether mit 7 Ethylenoxidgruppen als einem typischen Vertreter der nichtionogenen Tenside. Anionaktive Tenside, z.B. Dodecylbenzolsulfonat Na-Salz als typischer Vertreter, weisen einen Primärabbauwert von über 98% auf. Der biologische Abbau von Tensiden in Abwasserreinigungsanlagen liegt üblicherweise bei 75 bis 95% Primärabbau. Im Hinblick auf die Einwirkung von Tensiden auf den Menschen ist festzustellen, dass bereits die in den 70er Jahren gebräuchlichen Tenside humantoxikologisch unbedenklich waren [31].

Bei den organischen Wasserinhaltsstoffen ANT+NIT, BTEX G, NIT, NTA, Mineralöl-KW ist infolge biochemischen Abbaus im Laufe der Zeit eine allmähliche Konzentrationsabnahme bis hin zur Nachweis- bzw. Bestimmungsgrenze zu erwarten. Davon wird im Rahmen der wasserrechtlichen Bewertung hier kein Kredit genommen.

Die Praxis der Verwendung von Na₃-NTA in Haushaltwaschmitteln als Phosphat-Teilersatz zeigt, dass dessen biologische Abbaubarkeit selbst unter ungünstigen klimatischen Bedingungen bei mehr als 95% (adaptierte Stämme) liegt, so dass in der Nähe der Einleitungsstelle in Oberflächengewässern NTA-Konzentrationen im ppb-Bereich (ca. 5 ppb) gemessen werden und in grösserer Entfernung von der Einleitungsstelle die analytische Nachweisgrenze von NTA in Oberflächengewässern unterschritten wird.

7.4 Konzentrationseinstellung am Beispiel der anorganischen chemotoxischen Stoffe Kupfer und Blei in Wasser bzw. in salinaren Lösungen

Höll [18] macht darauf aufmerksam, dass beim Kupfer der pH-Bereich der geringsten Löslichkeit bei geringer Pufferkapazität zwischen 8 und 10 liegt. Dabei ist die Spezies CuCO₃ im pH-Bereich 6,3 bis etwa pH 9, je nach dem Gehalt an gelöstem anorganischem Kohlenstoff, massgeblich für den gesamten Kupfergehalt (Cu, gesamt)

verantwortlich. Die Löslichkeiten wurden unter der Annahme berechnet, dass die Konzentration von Kupferhydroxid als Deckschicht auf Kupferrohren bestimmt wird.

Im Bericht von Wagner [28] wird untersucht, welchen Einfluss die Verwendung von Bleirohren auf die Wasserqualität, insbesondere die Trinkwasserqualität, hat. Der Zusammenhang für den pH-Bereich zwischen 6,5 und pH 9,5 bei m-Werten (Carbonathärte) zwischen 0,2 und 6 mol/m³ (= mval/L) wird tabellarisch dargestellt. Dabei zeigt sich, dass die (berechnete) Löslichkeit von Blei in einem NaHCO₃/NaNO₃-System unter Berücksichtigung der jeweils schwerlöslichen Verbindungen bei einem pH-Wert von 6,5 und m-Wert 0,2 Mol/m³ Bleilöslichkeiten von 0,60 mg Pb/L in Form von Bleicarbonat (PbCO₃) und bei einem pH-Wert von 8,0 und m-Wert 0,2 Mol/m³ Bleilöslichkeiten von 0,08 mg Pb/L in Form von Bleihydroxocarbonat Pb₃(OH)₂(CO₃)₂ ergibt. In sehr günstigen Fällen sinkt unter diesen Bedingungen die Bleilöslichkeit auf ca. 0,03 mg Pb/L. Zum Vergleich: die Grenzkonzentration für Blei im Trinkwasser liegt gemäss Trinkwasserverordnung (TWVO) 2001 bei 0,010 mg Pb/L. Wagner [28] weist darauf hin, dass ausser den Verbindungen der Kohlensäure und dem pH-Wert keine signifikanten Einflüsse von den Hauptinhaltsstoffen des Wassers, wie Calcium, Magnesium, Kalium, Natrium und der Chlorid-, Nitrat- und Sulfationen auf die Bleilöslichkeit vorhanden sind. Der Einsatz von Polyphosphaten und Silikaten bewirkt keine Verringerung der Bleiwerte nach Stagnation des Wassers. Hingegen zeigen die Ergebnisse von Labor- und Feldversuchen, dass sich mit ortho-Phosphat eine deutliche Herabsetzung der Bleilöslichkeit erreichen lässt.

Mathew & Krueger [29] untersuchten den korrosiven Einfluss von chloridhaltigem, synthetischem Grundwasser (ca. 0,65 Ma.-% Chlorid) und salinaren Lösungen (ca. 3,43 Ma.-% Chlorid) auf Bleioberflächen bei pH 7,0 in Anwesenheit von Luftsauerstoff (!). Die Konzentration von gelöstem Blei bei 150°C (!) und einem Jahr Versuchsdauer wurde zu 20-60 mg Pb/L im synthetischem Grundwasser bzw. zu 550-650 mg Pb/L in der salinaren Lösung gemessen, wobei das Oberfläche/Volumenverhältnis des Bleicoupons zum Volumen der Lösung 0,5 cm²/cm³ entsprach. Festgestellt wurde, dass beim Blei der Widerstand gegen Korrosion von der Bildung einer schützenden Oberflächenschicht aus z.B. Carbonaten, Sulfaten und Chloriden abhängt. Dementsprechend verringerte sich die Korrosionsrate von Blei in chloridhaltigen Lösungen mit zunehmender Chloridkonzentration. Im Vergleich dazu enthält die gesättigte NaCl-Lösung ca. 16,07 Ma.-% Chlorid und die Temperatur in den Einlagerungsbereichen beträgt maximal 45°C.

7.5 Einfluss auf den pH-Wert infolge Wechselwirkung zutretender Wässer (Grundwasser) mit dem Versatzmaterial im Wirtsgestein

Zur Frage der Equilibrierung von Grundwasser in Granit mit Bentonitverfüllung liegt folgender Beitrag vor, Karnland und Muurinen et al.: "Geochemical Model of the Granite-Bentonite-Groundwater at Äspö (LOT Experiment)" in Materials Research Society Symposium Proceedings (June 2003) Vol. 807, pp. 855-860.

Es heisst darin u.a.: "pH is buffered by the equilibrium with calcite, ..." "The initial pore water in granite is the Äspö groundwater and the initial mineral composition in granite is that corresponding to the Äspö granite. Due to limitations of the code, which can only deal with saturated conditions, we have assumed that bentonite was saturated before starting the modelling. Thus, the initial composition of MX-80 bentonite pore water has been calculated by diluting 1/3 the Äspö groundwater and equilibrating it with the mineral and exchange composition of bentonite (Table II) simulating bentonite saturation."

"Table II: Initial aqueous, mineral and exchange composition. Concentrations in mmol/kg.

Aqueous composition for granite pH 7.7 (pe -3.8), for bentonite pH 8.4 (pe -4.4)."

Der pH-Wert des Grundwassers wurde in Äspö mit 7,7, der pH-Wert des Porenwassers im Bentonit zu pH 8,4 im Sättigungszustand gemessen.

Im Bericht Jül-4104 von Heiner Brücher et al. in "Untersuchungen zur Radionuklidfreisetzung und zum Korrosionsverhalten von bestrahltem Kernbrennstoff aus Forschungsreaktoren unter Endlagerbedingungen", Seite 105/106 wird zitiert pH-Wert in Lauge 3 (ges. NaCl-Lösung) bei 55°C: 7,15; pH-Wert Grundwasser im Granit (Grimsel-West) bei 55°C: 8,00.

Rechnet man für das Wirtsgestein „Salinar“ nur mit dem Zutritt von (gesättigter) NaCl-Lösung in das vorhandene Resthohlraumvolumen, so zeigt sich in Experimenten, dass der Gleichgewichts-pH-Wert von gesättigter NaCl-Lösung und Salzbeton z.B. bei pH 10,6 liegt. Unerwünscht ist ein Zutritt von Q-Lauge, deren pH-Wert im Kontakt mit Salzbeton im leicht sauren bis schwach alkalischen Bereich liegen wird, abhängig von der chemischen Zusammensetzung des Salzbetons. Die einsetzende Verdünnung senkt den Anfangs-pH-Wert dann immer weiter auf den pH-Wert des Wassers mit dem die Verdünnung erfolgt und letztlich auf die pH-

Werte von Grundwasser und entsprechend den Trinkwasserrichtlinien auf den empfohlenen und günstigen pH-Wert Bereich von 7,8 bis 8,5 für Trinkwasser.

Der Anfangs-pH-Wert in einem Endlager passt sich sehr schnell dem dominierenden Einfluss des verdünnenden Grundwassers an, dass bei Bedarf zusätzlich einer Trinkwasseraufbereitung unterzogen wird. Zum Thema pH-Wert im Trinkwasser äussert sich Prof. Grohmann im Beitrag: "Zur Begründung des Parameters pH-Wert in der Trinkwasserverordnung" in "Messung, Regelung und Einstellung des pH-Wertes im Trinkwasser" Berichtsband des VFTV zum Seminar vom 31.10.91 in Wolfenbüttel. Auf Seite 57 wird "ein günstiger pH-Bereich von 7,8 bis 8,5 für Trinkwasser" inkl. Begründung genannt wie folgt: "Die Verminderung der Kupfer- und der Zinkaufnahme in das Trinkwasser ist der Grund, warum bei der Verwendung von metallischen Rohren eine pH-Wert-Erhöhung auf pH-Wert 8,0 verlangt wird, soweit die Calcitsättigung des Wassers dies zulässt. Dies steht im Einklang mit dem Minimierungsgebot § 2 Abs. 3 der Trinkwasserverordnung ..., wonach nur die technisch unvermeidbaren Anteile des Rohrmaterials auf das Lebensmittel Trinkwasser übergehen dürfen.". Als ungünstig für verzinkte Rohre gilt ein pH-Wert von 7,3 und für Kupferrohre ein pH-Wert tiefer als pH 7,0. Unterhalb dieser pH-Werte wird der Einsatz von Kupferrohren bzw. verzinkten Rohren beanstandet.

8 Ergebnisse der Prüfung auf Einhaltung der wasserrechtlichen Schutzziele im oberflächennahen Grundwasser unter Verwendung von unterstellten Resthohlraumvolumina und Verdünnungsfaktoren

Für die Prüfung auf Einhaltung der wasserrechtlichen Schutzziele wurden die nachstehenden Randbedingungen berücksichtigt:

- 4 vorgegebene Wirtsgesteine (1 Wirtsgestein "Salinar" und 3 Wirtsgesteine nicht-salinar, und zwar "Ton", "Unter Tonüberdeckung", "Kristallin") d.h. Basisinventar mit Versatzmaterial für jedes Wirtsgestein, als Zusatzvariante das Basisinventar ohne Versatzmaterial (und ohne Wirtsgesteinsangabe)
- 3 unterstellte Resthohlraumvolumina RHV (100.000 m³, 500.000 m³, 1 Mio. m³) entsprechend Tiefenwasservolumina, in denen die Auflösung der Inventarbestandteile bis zur Sättigung stattfindet
- 3 unterstellte Verdünnungsfaktoren VF (VF 500, VF 5.000, VF 50.000)
- 2 Lösungsszenarien für nicht-salinare Wirtsgesteine: "hypothetisch vollständige Lösung" und "reale Löslichkeit in reinem Wasser" sowie beim Wirtsgestein „Salinar“ ausserdem ein drittes Lösungsszenario: "reale Löslichkeit in gesättigter NaCl-Lösung" für jeweils 3 Resthohlraumvolumina und 3 Verdünnungsfaktoren
- 120 Wasserinhaltsstoffe (Parameter), davon 82 anorganische, 38 organische Wasserinhaltsstoffe.

Die Auswertung der wasserrechtlichen Bewertung umfasst 11 Szenarien (3 nicht-salinare Wirtsgesteine mit 2 Lösungsszenarien für Basisinventar/Versatzmaterial/Wirtsgestein, 1 salinares Wirtsgestein mit 3 Lösungsszenarien für das Basisinventar/Versatzmaterial/Wirtsgestein und zum Vergleich das Basisinventar (notabene ohne Versatzmaterial und Wirtsgestein) mit 2 Lösungsszenarien).

Die Kombination aller o.g. Randbedingungen liefert 99 berechnete Varianten (4 Wirtsgesteine + 1 Basisinventar x 3 Resthohlraumvolumina x 3 Verdünnungsfaktoren x 2 Lösungsszenarien = 90 Varianten, zusätzlich 1x3x3x1 Lösungsszenario für Salinar im Wasseranteil der gesättigten NaCl-Lösung (s.u.) = 9 Varianten, mithin insgesamt 99 Varianten. Für alle Szenarien wird das jeweils vorgegebene Versatzmaterial (Salzgrus/Salzbeton/ges. NaCl-Lösung beim Wirtsgestein „Salinar“ bzw. Bentonit/Zementmörtel bei den nicht-salinaren Wirtsgesteinen) berücksichtigt. Als Lösungsmittel dient reines Wasser für alle Szenarien der Löslichkeit (hypothetisch und real), wobei für das salinare Wirtsgestein ausserdem der reine Wasseranteil der gesättigten NaCl-Lösung für die löslichen Anteile der Inventarbestandteile berücksichtigt wird.

Darüber hinaus wurde die Variante "Basisinventar ohne Versatzmaterial" zu Vergleichszwecken berechnet, um sowohl den Einfluss des Basisinventars als auch den Einfluss der Versatzmaterialien auf die wasserrechtliche Bewertung der jeweiligen Kombination aus Basisinventar + Versatzmaterial für die 4 Wirtsgesteine kennenzulernen und bewerten zu können.

Die Ergebnisse der Berechnungen berücksichtigen die o.g. Randbedingungen und sind im Anhang B detailliert in tabellarischer Form und in den Abbildungen 1 – 5 knapp zusammengefasst. Die Ergebnisse einiger ausgewählter Berechnungen werden nachstehend in A.) – D.) erläutert:

- A.) Anorganische und organische Wasserinhaltsstoffe (Parameter): Anzahl der Überschreitungen (ÜBS) der Parameter (von 120 insgesamt) über Prüfwert (PW) im oberflächennahen Grundwasser bzw. Grenzkonzentration (GK) im Trinkwasser bei pH 8 und vorgegebenem Verdünnungsfaktor (VF) von 500, 5.000 bzw. 50.000 und unterstellte Resthohlraumvolumina (RHV) von 100.000 m³, 500.000 m³, 1 Mio. m³ für reale Löslichkeit in reinem Wasser (bei nicht-salinaren Wirtsgesteinen/Versatzmaterialien) bzw. im Wasseranteil der gesättigten NaCl-Lösung (salinares Wirtsgestein/Versatzmaterialien) aus den nachstehenden Tabellen und im Anhang B ersichtlich:

Tabelle 8-1: Anzahl Überschreitungen (ÜBS) der PW/GK im Grundwasser/Trinkwasser sowie betreffende Wasserinhaltsstoffe bei vorgegebenem **VF 500** und für drei Resthohlraumvolumina (s. Abb. 1 + Anhang B, Abs. 1.1.)

Wirtsgestein/ Überschreitungen PW/GK:	Salinar	Kristallin	Ton	Unter Tonüberdeckg.	o. Versatzmat.
Resthohlraumvol. 100 k m ³	51	38	38	38	34
Resthohlraumvol. 500 k m ³	39	28	27	27	25
Resthohlraumvol. 1 Mio. m ³	34	25	23	23	20

Tabelle 8-2: Anzahl Überschreitungen (ÜBS) der PW/GK im Grundwasser/Trinkwasser sowie betreffende Wasserinhaltsstoffe bei vorgegebenem **VF 5.000** und für drei unterstellte Resthohlraumvolumina (s. Abb. 2 + Anhang B, Abs. 1.1.)

Wirtsgestein/ Überschreitungen PW/GK:	Salinar	Kristallin	Ton	Unter Tonüberdeckg.	o. Versatzmat.
Resthohlraumvol. 100 k m ³	18	17	15	15	12
Resthohlraumvol. 500 k m ³	4 (Cd, K, Tl, Y)	4 (K, Li, Rb, Y)	2 (K, Y)	3 (K, Rb, Y)	1 (Y)
Resthohlraumvol. 1 Mio. m ³	2 (Cd, Y)	3 (K, Rb, Y)	1 (Y)	1 (Y)	1 (Y)

Tabelle 8-3: Anzahl Überschreitungen (ÜBS) der PW/GK im Grundwasser/Trinkwasser sowie betreffende Wasserinhaltsstoffe bei vorgegebenem **VF 50.000** und für drei unterstellte Resthohlraumvolumina (s. Abb. 3 + Anhang B, Abs. 1.1.)

Wirtsgestein/ Überschreitungen PW/GK:	Salinar	Kristallin	Ton	Unter Tonüberdeckg.	o. Versatzmat.
Resthohlraumvol. 100 k m ³	0	1 (Rb)	0	0	0
Resthohlraumvol. 500 k m ³	0	0	0	0	0
Resthohlraumvol. 1 Mio. m ³	0	0	0	0	0

Bei der Verdünnung 50.000-fach und dem Hohlraumvolumen 100.000 m³ resultiert nur noch eine Überschreitung, und zwar für Rb aus dem Versatzmaterial Bentonit (Beitrag zu Rb ca. 93%) beim Wirtsgestein Kristallin. Alle anderen Prüfwerte bzw. Grenzkonzentrationen von Parametern werden für alle anderen Kombinationen mit Versatzmaterial/Wirtsgestein bzw. ohne Versatzmaterial eingehalten (siehe Abb. 3).

B.) Anorganische und organische Wasserinhaltsstoffe (Parameter): Minimaler Verdünnungsfaktor (VF) zur Einhaltung aller Prüfwerte (PW) im oberflächennahen Grundwasser bzw. Grenzkonzentration (GK) im Trinkwasser bei pH 8 und unterstellte Resthohlraumvolumina (RHV) von 100.000 m³, 500.000 m³, 1 Mio. m³ für reale Löslichkeit in reinem Wasser (bei nicht-salinaren Wirtsgesteinen/ Versatzmaterialien) bzw. im Wasseranteil der gesättigten NaCl-Lösung (salinares Wirtsgestein/Versatzmaterialien) aus nachstehender Tabelle 8-4 ersichtlich:

Tabelle 8-4: **Minimal notwendiger Verdünnungsfaktor (VF)** zur Einhaltung aller PW/GK im Grundwasser/Trinkwasser und Angabe desjenigen Wasserinhaltsstoffes mit dem **höchsten** Verdünnungsfaktor beim jeweiligen Resthohlraumvolumen (s. Abb. 4 + Anhang B, Abs. 1.1.)

Wirtsgestein:	Salinar	Kristallin	Ton	Unter Tonüberdeckg.	o. Versatzmat.
Resthohlraumvol. 100.000 m ³	35028 (TI)	69821 (Rb)	30955 (K)	30955 (K)	16111 (NIT) 13447 (B)
Resthohlraumvol. 500.000 m ³	12832 (Cd)	16823 (K)	7862 (Y)	7862 (Y)	7862 (Y)
Resthohlraumvol. 1 Mio. m ³	11926 (Cd)	8412 (K)	7862 (Y)	7862 (Y)	7345 (Y)

Tabelle 8-5: **Minimal notwendiger Verdünnungsfaktor (VF)** zur Einhaltung aller Prüfwerte im oberflächennahen Grundwasser bzw. Grenzkonzentrationen im Trinkwasser bei vorgegebenem Resthohlraumvolumen von 500.000 m³ ersichtlich (hier nur Wasserinhaltsstoffe, die mit Verdünnungsfaktor **5.000** noch Prüfwerte/Grenzkonzentrationen überschreiten)

Basisinventar mit Versatzmaterial vs. Wirtsgestein:	Salinar	Kristallin	Ton	Unter Tonüberdeckg.	o.Versatzmat.
Salzgrus und Salzbeton	K (VF 7866) TI (VF 7006)	nicht zutreffend	nicht zutreffend	nicht zutreffend	nicht zutreffend
Bentonit und PZ-Mörtel	nicht zutreffend	K (VF 16823) Li (VF 7751) Rb (VF13964) Y (VF 7862)	K(VF6759) Y(VF7862)	K (VF 6941) Rb (VF 5145) Y (VF 7862)	Y (VF 7862)
BE und HAW-Glas (aus hochaktivem Abfallinventar)	Y (VF 7862)	Y (VF 7862)	Y(VF7862)	Y (VF 7862)	Y (VF 7862)
Basisinventar ohne Versatzmaterial vs. Wirtsgestein:	Salinar	Kristallin	Ton	Unter Tonüberdeckg.	o.Versatzmat.
Cadmium- + Metallschrott	Cd (VF12832)				

Tabelle 8-6: Gesamtübersicht der Anzahl Überschreitungen der Prüfwerte (PW) im oberflächennahen Grundwasser bzw. der Grenzkonzentrationen (GK) im Trinkwasser und minimaler notwendiger Verdünnungsfaktor zur Einhaltung aller 120 untersuchten Prüfwerte bzw. Grenzkonzentrationen für verschiedene Wirtsgesteine/Versatzmaterialien, Löslichkeitsszenarien, Resthohlraumvolumina und Verdünnungsfaktoren für pH 8

Wirtsgestein/ Versatzmaterial	Löslichkeits- szenario	Resthohl- raumvol. [m ³]	Anzahl Überschreitungen der Prüfwerte bzw. Grenzkonzentrationen für Verdünnungsfaktor			Minimaler Ver- dünnungsfaktor zur Einhaltung aller PW/GK
			500	5.000	50.000	
ohne Versatzmaterial	hypothetisch vollständig	100.000	56	40	20	65.775.356
		500.000	45	27	13	13.155.071
		1 Mio.	40	20	10	6.577.536
ohne Versatzmaterial	reines Wasser	100.000	34	12	-	16.111
		500.000	25	1	-	7.862
		1 Mio.	20	1	-	7.345
Salinar	hypothetisch vollständig	100.000	72	53	27	75.505.541
		500.000	58	35	13	15.101.109
		1 Mio.	56	27	10	7.550.555
Salinar	reines Wasser	100.000	50	18	-	35.028
		500.000	37	3	-	7.866
		1 Mio.	32	1	-	7.862
Salinar	NaCl-Lösung	100.000	51	18	-	35.028
		500.000	39	4	-	12.832
		1 Mio.	34	2	-	11.926
Ton	hypothetisch vollständig	100.000	62	45	24	72.950.780
		500.000	49	29	14	14.590.156
		1 Mio.	45	24	12	7.295.078
Ton	reines Wasser	100.000	38	15	-	30.955
		500.000	27	2	-	7.862
		1 Mio.	23	1	-	7.862
Unter Tonüberdeckung	hypothetisch vollständig	100.000	62	44	24	74.033.931
		500.000	50	30	14	14.806.786
		1 Mio.	44	24	12	7.403.393
Unter Tonüberdeckung	reines Wasser	100.000	38	15	-	30.955
		500.000	27	3	-	7.862
		1 Mio.	23	1	-	7.862
Kristallin	hypothetisch vollständig	100.000	62	47	28	93.840.169
		500.000	52	33	15	18.768.034
		1 Mio.	47	28	12	9.384.017
Kristallin	reines Wasser	100.000	38	17	1	69.821
		500.000	28	4	-	16.823
		1 Mio.	25	3	-	8.412

C.) Durch die Kombination des minimalen notwendigen Verdünnungsfaktors zur Einhaltung aller Prüfwerte im oberflächennahen Grundwasser bzw. Grenzkonzentrationen im Trinkwasser mit den jeweils unterstellten Resthohlraumvolumina ergibt sich bei gleichem Basisinventar aber verschiedenen Versatzmaterialien und –massen (für 4 Wirtsgesteine mit Versatzmaterial/Basisinventar und zum Vergleich zusätzlich das Basis

inventar ohne Versatzmaterial) ein minimal notwendiges Verdünnungswasservolumen (in Mia. m³) zur Einhaltung aller Prüfwerte bzw. Grenzkonzentrationen, wie aus nachstehender Tabelle 8-7 ersichtlich:

Tabelle 8-7: Minimal notwendige **Verdünnungswasservolumina in Mia. m³** sowie Angabe des dazugehörigen Wasserinhaltsstoffes im Grundwasser/Trinkwasser zur Einhaltung aller Prüfwerte/Grenzkonzentrationen für drei Resthohlraumvolumina und Anwendung der realen Löslichkeiten (s. Abb. 5 + 7)

Wirtsgestein:	Salinar [Mia. m ³]	Kristallin [Mia. m ³]	Ton [Mia. m ³]	Unter Ton- überdeckung [Mia. m ³]	ohne Versatz- material [Mia. m ³]
Resthohlraumvol. 100.000 m ³	3,1 (TI)	7,0 (Rb)	3,1 (K)	3,1 (K)	1,6 (NIT), {1,4 B}
Resthohlraumvol. 500.000 m ³	5,6 (Cd)	8,4 (K)	3,9 (Y)	3,9 (Y)	3,9 (Y)
Resthohlraumvol. 1 Mio. m ³	10,4 (Cd)	8,4 (K)	7,9 (Y)	7,9 (Y)	7,3 (Y)

D.) „Ausgewählte anorganische und organische Wasserinhaltsstoffe und deren x-fache Prüfwerte (PW) im oberflächennahen Grundwasser bzw. Grenzkonzentrationen (GK) im Trinkwasser“ (für 4 Wirtsgesteine mit Versatzmaterial/Basisinventar und zum Vergleich zusätzlich das Basisinventar ohne Versatzmaterial). Dabei sind die Verdünnungswasservolumina im Endeffekt identisch für die Kombinationen aus (siehe Anhang B.1.2):

Resthohlraumvolumen 100.000 m³ x VF 5.000 = 500 Mio. m³ bzw. 1.000.000 m³ x VF 500 = **500 Mio. m³** bzw.

Resthohlraumvolumen 100.000 m³ x VF 50.000 = 5 Mia. m³ bzw. 1.000.000 m³ x VF 5.000 = **5 Mia. m³**.

Mit dieser tabellarischen Auswertung lässt sich die Frage beantworten, ob bei vorgegebenem Verdünnungswasservolumen die Kombination aus einem kleinen Resthohlraumvolumen mit grossem Verdünnungsfaktor oder umgekehrt ein grosses Resthohlraumvolumen mit kleinem Verdünnungsfaktor die zulässigen Prüfwerte im oberflächennahen Grundwasser bzw. Grenzkonzentrationen im Trinkwasser eher erreichen bzw. einhalten lässt. Das Ergebnis ist eindeutig und bestätigt die Resultate der minimal notwendigen Verdünnungswasservolumina, wie aus der o.g. Tabelle 8-7 bereits bekannt: die Kombination eines kleinen Resthohlraumvolumens mit grossem Verdünnungsfaktor ist für die Einhaltung der Grenzkonzentrationen bzw. Prüfwerte vorteilhafter und am besten geeignet, die anzuwendenden Prüfwerte/Grenzkonzentrationen einzuhalten. Andererseits wäre unter Berücksichtigung der zu erwartenden Gasentwicklung und des damit verbundenen Druckaufbaus im Endlager ein grosses (nutzbares) Resthohlraumvolumen erstrebenswert, sofern noch nicht mit eingedrungener Flüssigkeit (Grundwasser bzw. saline Lösung) aufgefüllt.

Separat aufgeführt ist in der Tabelle 8-8 für die ausgewählten Wasserinhaltsstoffe der in 100.000 m³ bzw. 1 Mio. m³ Resthohlraumvolumen gelöste Inventaranteil in Ma.-%. Von den 21 Wasserinhaltsstoffen (18 anorganisch, 3 organisch) werden Cs, Hg, K, Li, Rb, Tl zu 100 Ma.-% bzw. fast 100 Ma.-% ihres Inventars gelöst, und zwar praktisch unabhängig vom Produkt Resthohlraumvolumen x Verdünnungsfaktor = Verdünnungswasservolumen.

Tabelle 8-8: Ausgewählte anorganische und organische Wasserinhaltsstoffe und deren X-fache Prüfwerte (PW) im oberflächennahen Grundwasser bzw. der Grenzkonzentration (GK) im Trinkwasser an den Beispielen A.) „Basisinventar ohne Versatzmaterial, reale Löslichkeit in reinem Wasser“ und B.) für das Wirtsgestein „Salinar“ mit „Reale Löslichkeit in gesättigter NaCl-Lösung im Wasseranteil der ges. NaCl-Lösung“ für Resthohlraumvolumina von 100.000 m³ mit Verdünnungsfaktoren von 5.000 (= 500 Mio. m³) bzw. 50.000 (= 5 Mia. m³) vs. Resthohlraumvolumina von 1 Mio. m³ mit Verdünnungsfaktoren von 500 (= 500 Mio. m³) bzw. 5.000 (= 5 Mia. m³) bei pH 8

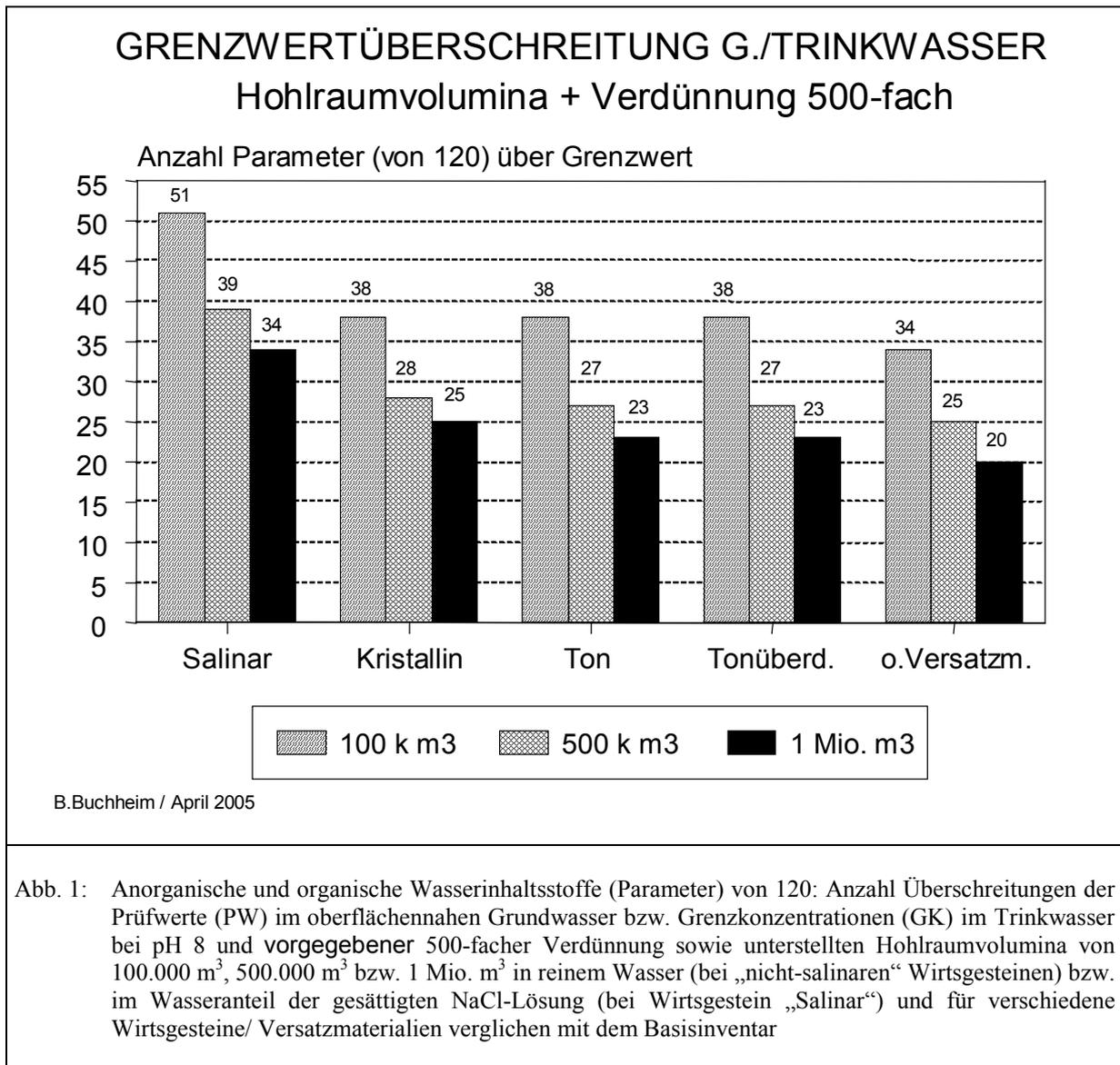
A) Inventar ohne Versatzmaterial, reale Löslichkeiten in reinem Wasser						
Parameter/ Wasserin- haltsstoff	x-fache Prüfwerte bzw. Grenzkonzentrationen				Parameter gelöst im RHV	
	RHV 100.000 m³		RHV 1 Mio. m³		100.000 m³	1 Mio. m³
	VF 5.000	VF 50.000	VF 500	VF 5.000	[%]	[%]
<i>A.1) anorganische Parameter</i>						
Ag	0,1016	0,0102	0,2104	0,0210	0,497	1,029
B	2,6895 *	0,2689	3,6723 *	0,3672	70,338	96,044
Cd	1,9617 *	0,1962	5,4015 *	0,5401	1,091	3,004
Cl	0,0011	0,0001	0,0011	0,0001	3,339	3,344
Cs	0,9036	0,0904	0,9036	0,0904	100,000	100,000
Hg	0,0773	0,0077	0,0773	0,0077	100,000	100,000
K	0,8762	0,0876	0,8763	0,0876	99,509	99,522
Li	1,1056 *	0,1106	1,1056 *	0,1106	100,000	100,000
Mg	0,0016	0,0002	0,0153	0,0015	0,707	6,929
Mo	2,1132 *	0,2113	2,2030 *	0,2203	4,157	4,334
NH ₄	0,0969	0,0097	0,0974	0,0097	16,742	16,839
Ni	0,2672	0,0267	1,9914 *	0,1991	0,024	0,180
PO ₄	2,0876 *	0,2088	2,2203 *	0,2220	25,582	27,207
Pb	1,3528 *	0,1353	2,4009 *	0,2401	0,010	0,018
Rb	0,6735	0,0673	0,6735	0,0673	100,000	100,000
Se	1,1229 *	0,1123	2,2232 *	0,2223	50,508	100,000
Tl	0,0753	0,0075	0,0753	0,0075	100,000	100,000
Y	1,5725 *	0,1572	14,6895 *	1,4690 *	8,778	82,003
<i>A.2) organische Parameter</i>						
ANT+NIT	2,8084 *	0,2808	2,8084 *	0,2808	100,000	100,000
PAK G	0	0	0	0	0	0
SOS G	0,8278	0,0828	0,8278	0,0828	9,850	9,850

B) Wirtsgestein "Salinar", reale Löslichkeiten in gesättigter NaCl-Lösung im Wasseranteil der gesättigten NaCl-Lösung						
Parameter/ Wasserin- haltsstoff	x-fache Prüfwerte bzw. Grenzkonzentrationen				Parameter gelöst im RHV	
	RHV 100.000 m ³		RHV 1 Mio. m ³		100.000 m ³	1 Mio. m ³
	VF 5.000	VF 50.000	VF 500	VF 5.000	[%]	[%]
<i>B.1) anorganische Parameter</i>						
Ag	0,1148	0,0115	0,2235	0,0224	0,487	0,947
B	2,8001 *	0,2800	4,3402 *	0,4340	63,541	96,156
Cd	4,0157 *	0,4016	23,8517 *	2,3852 *	1,940	11,521
Cl	0,9168	0,0917	5,2534 *	0,5253	2,687	13,784
Cs	1,0482 *	0,1048	1,0867 *	0,1087	100,000	100,000
Hg	2,0742 *	0,2074	2,0753 *	0,2075	100,000	100,000
K	4,4056 *	0,4406	7,9858 *	0,7986	56,665	99,939
Li	1,8120 *	0,1812	2,0482 *	0,2048	100,000	100,000
Mg	0,6012	0,0601	0,6482	0,0648	61,539	64,576
Mo	2,4224 *	0,2422	2,5122 *	0,2512	4,152	4,306
NH4	0,1110	0,0111	0,2945	0,0295	16,193	33,435
Ni	0,1066	0,0107	0,2849	0,0285	0,008	0,022
PO4	1,0429 *	0,1043	2,2049 *	0,2205	9,304	19,671
Pb	1,1852 *	0,1185	5,4768 *	0,5477	0,008	0,036
Rb	0,9419	0,0942	1,2319 *	0,1232	100,000	100,000
Se	0,9188	0,0919	1,5812 *	0,1581	26,060	35,246
Tl	7,0057 *	0,7006	7,0057 *	0,7006	100,000	100,000
Y	1,5725 *	0,1572	15,7245 *	1,5725 *	7,653	76,530
<i>B.2) organische Parameter</i>						
ANT+NIT	3,2213 *	0,3221	3,2213 *	0,3221	100,000	100,000
PAK G	3,0001 *	0,3000	4,8015 *	0,4801	21,556	34,500
SOS G	0,9533	0,0953	0,9845	0,0984	9,830	10,104
verwendete Abkürzungen:						
RHV: Resthohlraumvolumen						
VF : Verdünnungsfaktor						
* : Überschreitung der anwendbaren Prüfwerte im Grundwasser bzw. Grenzkonzentrationen im Trinkwasser						

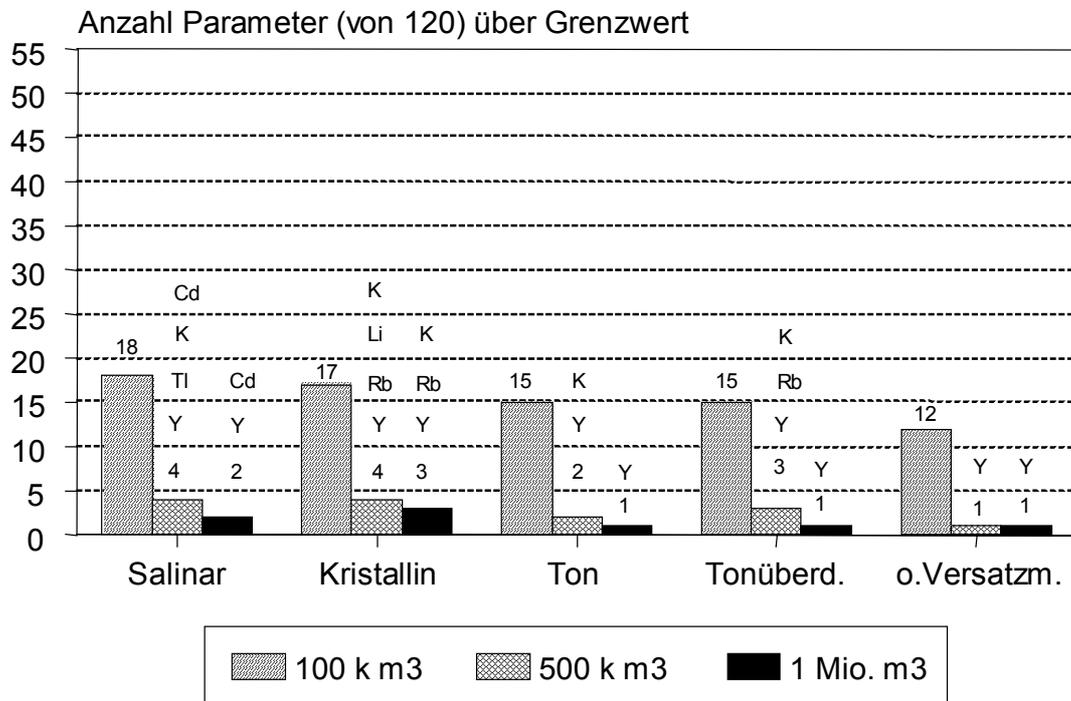
Die Ergebnisse der wasserrechtlichen Bewertung für die Varianten Wirtsgesteine mit Versatzmaterial bzw. ohne Versatzmaterial (nur Basisinventar) lassen sich auch in Grafiken darstellen, und zwar für die Resthohlraumvolumina 100.000 m³, 500.000 m³, 1 Mio. m³. Im Einzelnen:

- Abb. 1: Grenzwertüberschreitung Grundwasser/Trinkwasser bei Verdünnung **500-fach**: Anzahl Parameter (von 120) über Grenzwert (s. Tab. 8-1)
- Abb. 2: Grenzwertüberschreitung Grundwasser/Trinkwasser bei Verdünnung **5.000-fach**: Anzahl Parameter (von 120) über Grenzwert (s. Tab. 8-2)

- Abb. 3: Grenzwertüberschreitung Grundwasser/Trinkwasser bei Verdünnung **50.000-fach**: Anzahl Parameter (von 120) über Grenzwert (s. Tab. 8-3)
- Abb. 4: Minimal notwendiger Verdünnungsfaktor zur Einhaltung aller Prüfwerte im oberflächennahen Grundwasser bzw. Grenzkonzentrationen im Trinkwasser (s. Tab. 8-4)
- Abb. 5: Minimal notwendige Verdünnungswasservolumina in Mia. m³ zur Einhaltung aller Prüfwerte im oberflächennahen Grundwasser bzw. Grenzkonzentrationen im Trinkwasser (s. Tab. 8-7)
- Abb. 6: Anorganische und organische Wasserinhaltsstoffe (Parameter): Mehrfachgrafik der Abb. 1 – 3
- Abb. 7: Anorganische und organische Wasserinhaltsstoffe (Parameter): Mehrfachgrafik der Abb. 4 + 5



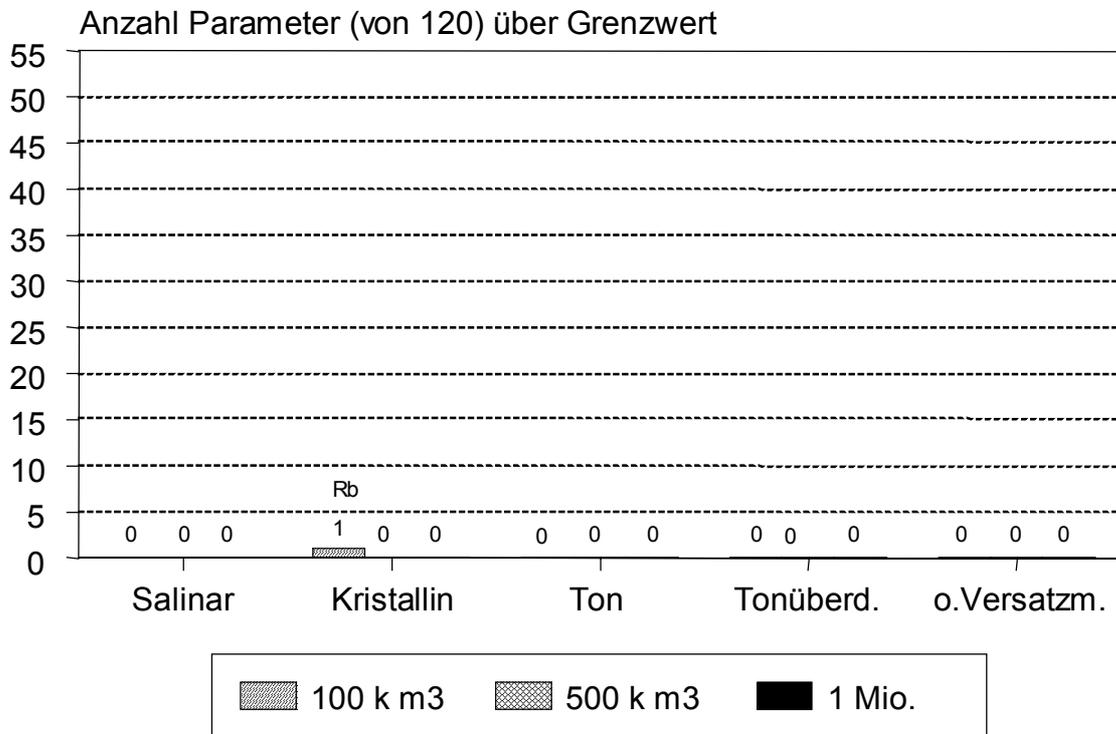
GRENZWERTÜBERSCHREITUNG G./TRINKWASSER Hohlraumvolumina + Verdünnung 5.000-fach



B.Buchheim / April 2005

Abb. 2: Anorganische und organische Wasserinhaltsstoffe (Parameter) von 120: Anzahl Überschreitungen der Prüfwerte (PW) im oberflächennahen Grundwasser bzw. Grenzkonzentrationen (GK) im Trinkwasser bei pH 8 und vorgegebener 5.000-facher Verdünnung sowie unterstellten Hohlraumvolumina von 100.000 m³, 500.000 m³ bzw. 1 Mio. m³ in reinem Wasser (bei „nicht-salinaren“ Wirtsgesteinen) bzw. im Wasseranteil der gesättigten NaCl-Lösung (bei Wirtsgestein „Salinar“) und für verschiedene Wirtsgesteine/ Versatzmaterialien verglichen mit dem Basisinventar

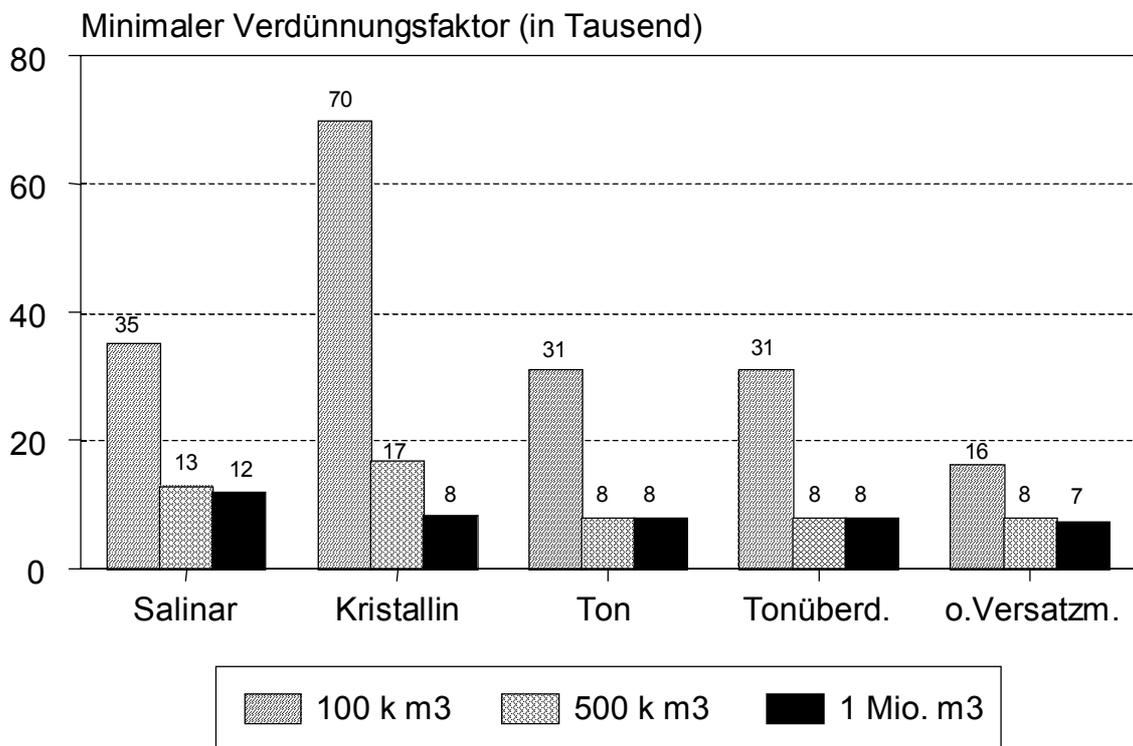
GRENZWERTÜBERSCHREITUNG G./TRINKWASSER Hohlraumvolumina + Verdünnung 50.000-fach



B.Buchheim / April 2005

Abb. 3: Anorganische und organische Wasserinhaltsstoffe (Parameter) von 120: Anzahl Überschreitungen der Prüfwerte (PW) im oberflächennahen Grundwasser bzw. Grenzkonzentrationen (GK) im Trinkwasser bei pH 8 und vorgegebener 50.000-facher Verdünnung sowie unterstellten Hohlraumvolumina von 100.000 m³, 500.000 m³ bzw. 1 Mio. m³ in reinem Wasser (bei „nicht-salinaren“ Wirtsgesteinen) bzw. im Wasseranteil der gesättigten NaCl-Lösung (bei Wirtsgestein „Salinar“) und für verschiedene Wirtsgesteine/Versatzmaterialien verglichen mit dem Basisinventar

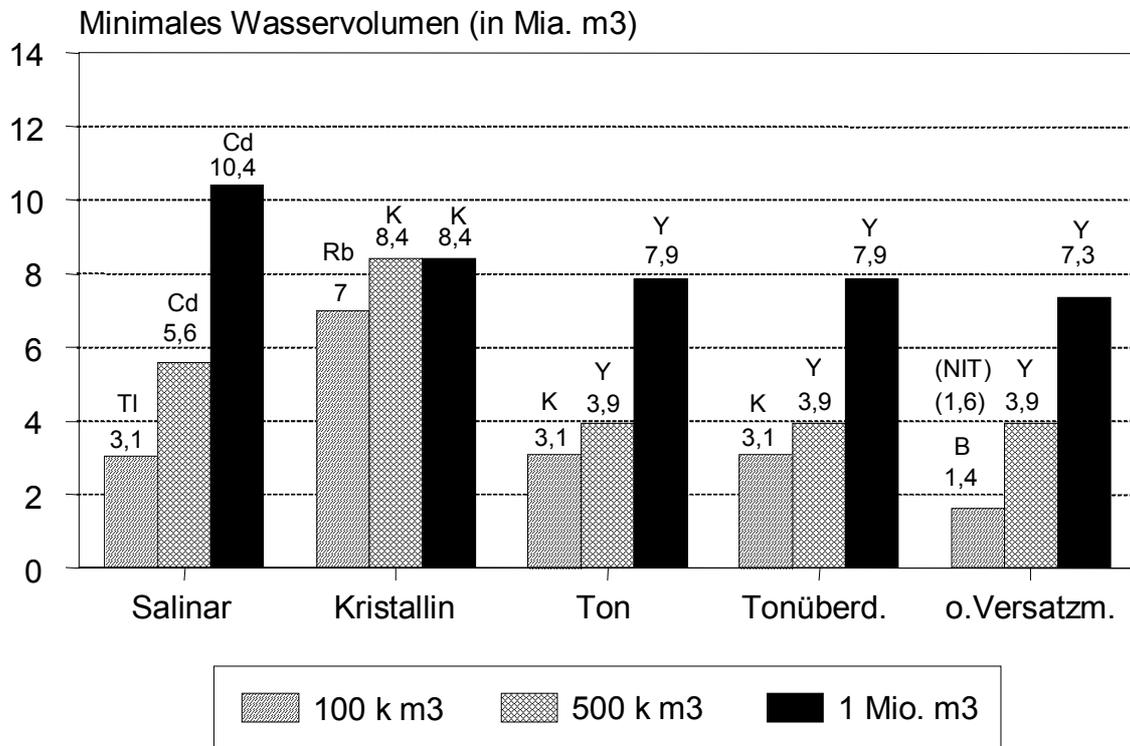
MIN. VERD.FAKTOR EINHAL. ALLE GRENZWERTE Hohlraumvolumina + Wirtsgesteine



B.Buchheim / April 2005

Abb. 4: Anorganische und organische Wasserinhaltsstoffe (Parameter): Minimaler notwendiger Verdünnungsfaktor zur Einhaltung aller Prüfwerte (PW) im oberflächennahen Grundwasser bzw. Grenzkonzentrationen (GK) im Trinkwasser bei pH 8 bei unterstellten Hohlraumvolumina von 100.000 m³, 500.000 m³ bzw. 1 Mio. m³ in reinem Wasser (bei „nicht-salinaren“ Wirtsgesteinen) bzw. im Wasseranteil der gesättigten NaCl-Lösung (bei Wirtsgestein „Salinar“) und für verschiedene Wirtsgesteine/Versatzmaterialien verglichen mit dem Basisinventar

MIN. WASSERVOLUMEN EINH. ALLE GRENZWERTE Hohlraumvolumina + Wirtsgesteine



B.Buchheim / April 2005

Abb. 5: Anorganische und organische Wasserinhaltsstoffe (Parameter): Minimal notwendiges Wasservolumen zur Einhaltung aller Prüfwerte (PW) im oberflächennahen Grundwasser bzw. Grenzkonzentrationen (GK) im Trinkwasser bei pH 8 bei unterstellten Hohlraumvolumina von 100.000 m³, 500.000 m³ bzw. 1 Mio. m³ in reinem Wasser (bei „nicht-salinaren“ Wirtsgesteinen) bzw. im Wasseranteil der gesättigten NaCl-Lösung (bei Wirtsgestein „Salinar“) und für verschiedene Wirtsgesteine/Versatzmaterialien verglichen mit dem Basisinventar

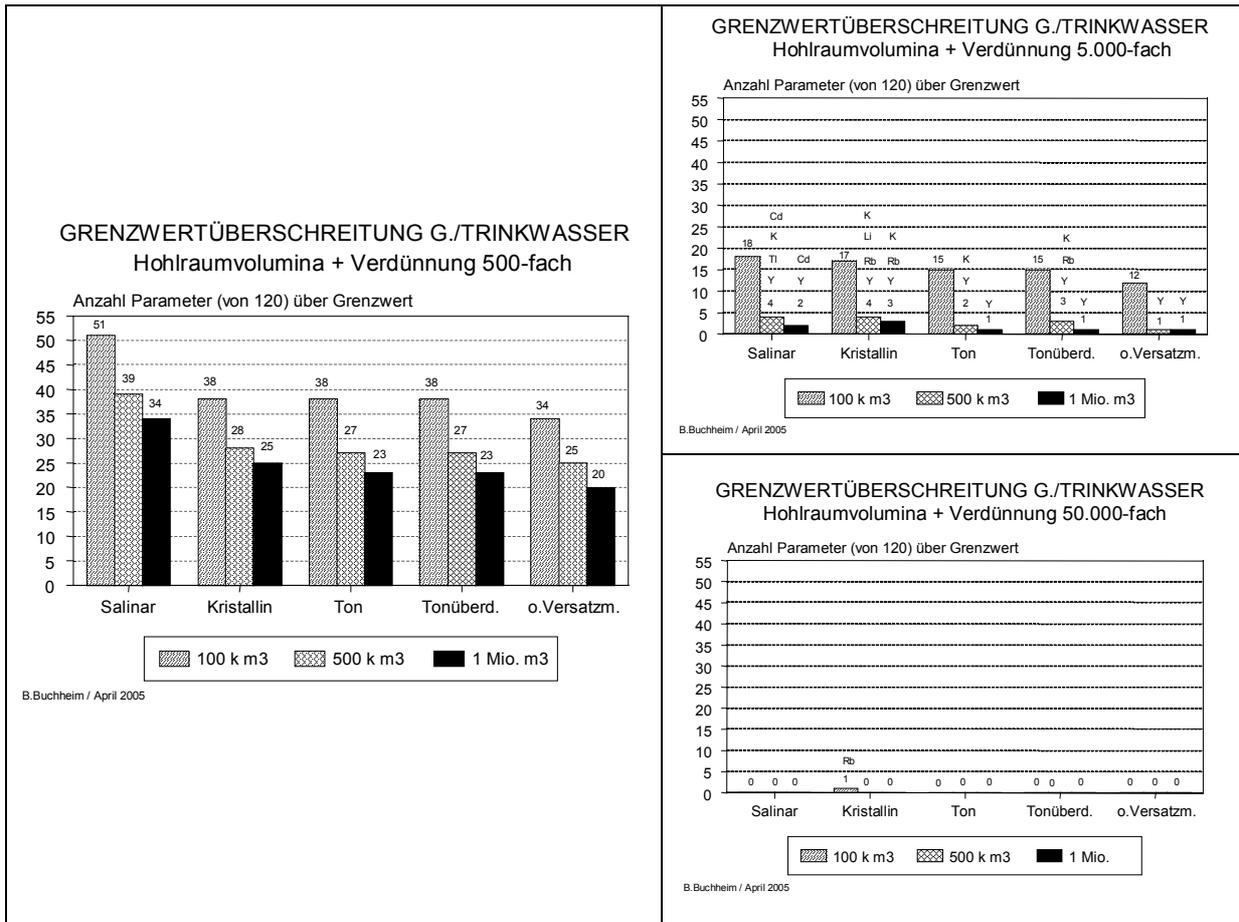


Abb. 6: Anorganische und organische Wasserinhaltsstoffe (Parameter): Mehrfachgrafik der Abb. 1 – 3

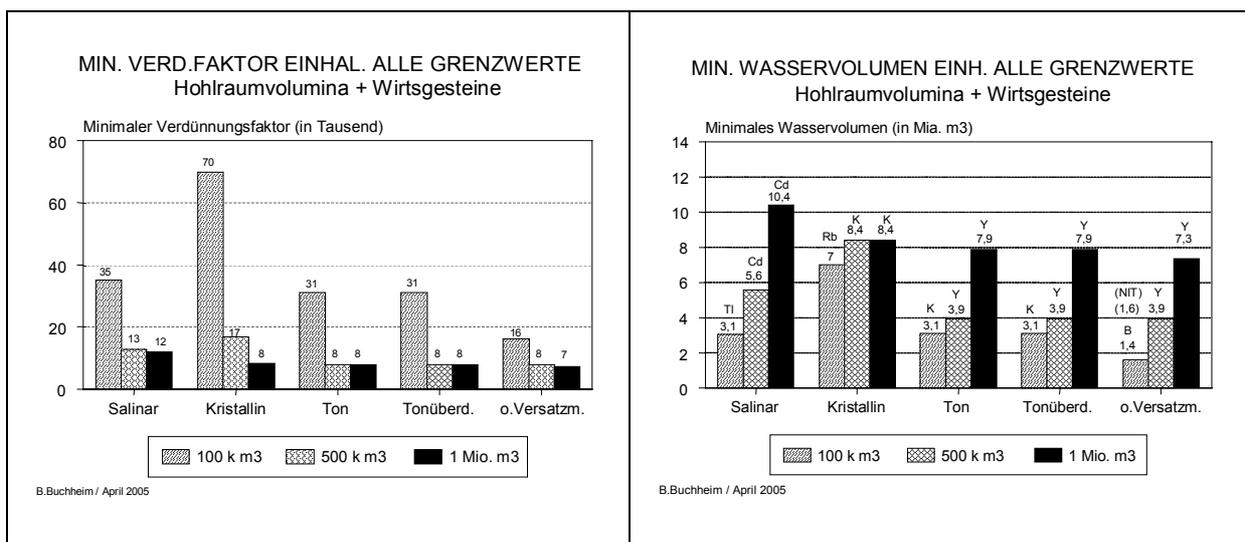


Abb. 7: Anorganische und organische Wasserinhaltsstoffe (Parameter): Mehrfachgrafik der Abb. 4 + 5

9 Vergleich und Bewertung dieser modellmässig abgeleiteten Konzentrationen mit den Begrenzungen bzw. Grenzwerten aus den einschlägigen Verordnungen, Regelwerken oder Empfehlungen zum Grundwasserschutz

Für die Prüfung auf Einhaltung der wasserrechtlichen Bestimmungen wurden die modellmässig abgeleiteten Konzentrationen der Wasserinhaltsstoffe im Tiefenwasser mit anschliessender Verdünnung verglichen mit den neuesten jeweils restriktivsten Prüfwerten im oberflächennahen Grundwasser bzw. Grenzkonzentrationen im Trinkwasser auf der Basis der folgenden nationalen und internationalen Verordnungen, Regelwerke oder Empfehlungen:

- "Verordnung zur Novellierung der Trinkwasserverordnung vom 21. Mai 2001"
Bundesgesetzblatt, Jahrgang 2001, Teil I, Nr. 24, S. 959-980
- "Bekanntmachung der Neufassung der Trinkwasserverordnung vom 5. Dezember 1990"
(Trinkwasserverordnung - TrinkWV) vom 5. Dezember 1990, Bundesgesetzblatt, Jahrgang 1990, Teil I, Nr. 66, S. 2612-2629
- Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA): "Empfehlungen für die Erkundung, Bewertung und Behandlung von Grundwasserschäden". Stand: 03. Dezember 1996
- Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA): "Geringfügigkeitsschwellen (Prüfwerte) zur Beurteilung von Grundwasserschäden und ihre Begründung". Stand: 21. Dezember 1998
- Deutscher Verein von Gas- und Wasserfachmännern e.V. Eschborn,
"Eignung von Oberflächenwasser als Rohstoff für die Trinkwasserversorgung", DVGW-Regelwerk, Technische Regeln, Arbeitsblatt W 151, Stand: Juli 1975
- Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V. Bonn
"Eignung von Fließgewässern für die Trinkwasserversorgung", DVGW-Regelwerk, Technische Mitteilung, Merkblatt W 251, Stand: August 1996
- Bewertung der Stoffe Cs, Li, Rb im Grundwasser mit Vorsorgewert 0.1 mg/L (NLÖ 15.05.1998)
- World Health Organization (WHO): „Guidelines for Drinking-Water Quality“, 2nd Edition, Addendum to Volume 1, Recommendations (1993/96/98)
- Richard P. Pohanisch (Editor)
"Sittig's Handbook of Toxic and Hazardous Chemicals and Carcinogens", 4th. edition, Vol. 1+2, Noyes Publications, Norwich/New York, 2002
- M. Sittig, "World-wide Limits for Toxic and Hazardous Chemicals in Air, Water and Soil", Noyes Publications, New Jersey 1994
- G.W. Dawson, "The Chemical Toxicity of Elements", BNWL-1815 UC-70 (June 1974); elemental chemical toxicities incorporated in ORIGEN2: A.G. Croff, „ORIGEN2 – A Revised and Updated Version of the Oak Ridge Isotope Generation and Depletion Code“, ORNL-5621 (July 1980), pp. 41-42; elemental chemical toxicity of Yttrium referenced in "U.S. Department of Health, Education and Welfare Toxic Substances List", Rockville, Maryland (June 1972).

Beim Vergleich der Prüfwerte im oberflächennahen Grundwasser bzw. Grenzkonzentrationen im Trinkwasser zeigt sich, dass - mit Ausnahme des Grenzwertes von 0,010 mg/L Mineralöl-KW im Trinkwasser gemäss Trinkwasserverordnung (TWVO) 1990 - die anwendbaren Prüfwerte/Grenzkonzentrationen aus anderen nationalen oder internationalen Regelwerken (LAWA, DVGW, EG, WHO) entweder gleich oder restriktiver sind als die entsprechenden Werte der TWVO 1990 bzw. 2001. Darüber hinaus wird z.B. im Gegensatz zur TWVO 1990 in der Novellierung der Trinkwasserverordnung vom Mai 2001 kein Grenzwert für Mineralöl-KW im Trinkwasser mehr erwähnt. Von den insgesamt erfassten 120 Wasserinhaltsstoffen sind deren 41 in der Trinkwasserverordnung 1990 bzw. 36 in der Novellierung der Trinkwasserverordnung 2001 genannt. Die übrigen Wasserinhaltsstoffe wurden den anderen o.g. nationalen und internationalen Verordnungen, Regelwerken oder Empfehlungen mit den neuesten jeweils restriktivsten Prüfwerten/Grenzkonzentrationen entnommen.

Für die wasserrechtliche Bewertung wurden 82 anorganische und 38 organische, d.h. insgesamt 120 Wasserinhaltsstoffe zugrundegelegt. Im Einzelnen für die Anorganika (in alphabetischer Reihenfolge): Ag, Al, As, Au, B, Ba, Be, Bi, Br, BrO₃, Ca, Cd, Cl, CN, CN Gesamt, Co, Cr, Cr(VI), Cs, Ce, Cu, Dy, Er, F, Fe, Ga, Gd, Ge, Hf, Hg, Ho, I, In, Ir, K, La, Li, Lu, Mg, Mn, Mo, Na, Nb, Nd, NH₄, Ni, NO₂, NO₃, Os, Pb, Pd, Pm,

PO₄, Pr, Pt, Rb, Re, Rh, Ru, Sb, Sc, Se, SiO₂, Sm, Sn, SO₄, Sr, Ta, Tb, Tc, Te, Ti, Tl, Tm, U, V, W, Y, Yb, Zn, Zr. Von den anorganischen Wasserinhaltsstoffen blieben aus dem Periodensystem der Elemente für die wasserrechtliche Bewertung unberücksichtigt: Ac, Ar, At, Fr, H, He, Kr, N, Ne, O, Pa, Po, Ra, Rn, Th, Xe und alle Transurane (Np, Pu, Am, Cm, Bk, Cf, Es, Fm, Md, No, Lr, Rf, Ha). Alle anderen anorganischen Elemente wurden berücksichtigt, z.T. in Form ihrer (wasserlöslichen) chemischen Verbindungen wie BrO₃, CN, NH₄, NO₂, NO₃, PO₄, SiO₂, SO₄. Einen Spezialfall stellt Cr(VI) bzw. CrO₄ dar.

Bei den organischen Wasserinhaltsstoffen galt es, nicht nur einzelne organische Stoffe (Acrylamid, EDTA, NTA), sondern auch Summenparameter (DOC G, SOS G) und Gruppenparameter (ANT, NIT, ANT+NIT, AOX, KW, PAK) zu erfassen und wasserrechtlich zu bewerten. Im Einzelnen wurden folgende Organika als Wasserinhaltsstoffe berücksichtigt (in alphabetischer Reihenfolge): Acrylamid, Aldrin, ANT, ANT+NIT, AOX, Benzo(a)pyren, Benzol, BTEX, Chloroformextrahierbare Substanzen, Chlorethen, Chlorierte Benzole, Chlorierte Naphthaline, Chlorierte Phenole, 1,2-Dichlorethan, Dieldrin, DOC, EDTA und -Salze, Epichlorhydrin, Heptachlor, Heptachlorepoxyd, leichtflüchtige halogenierte Kohlenwasserstoffe gesamt, leichtflüchtige halogenierte Kohlenwasserstoffe karzinogen, Mineralöl-Kohlenwasserstoffe, Naphthalin+Methylnaphthalin, Naphthalin, organische Chlorverbindungen, PAK, PCB (einzeln bzw. gesamt), PCDD+PCDF, wasserdampfvlüchtige Phenole, PSMBP (Pflanzenschutzmittel/Biozidprodukte einzeln bzw. gesamt), SOS, TCDD, Tetrachlormethan, Tetrachlorethen+Trichlorethen, Trihalogenmethane.

Aus dem Anhang B können die Konzentrationen in mg/L aller wasserrechtlich relevanten Wasserinhaltsstoffe für 11 Inventar- und Löslichkeitsszenarien, 3 unterstellte Resthohlraumvolumina und 3 unterstellte Verdünnungsfaktoren, d.h. $11 \times 3 \times 3 = 99$ Varianten sowie die Vielfachen der Prüfwerte für Grundwasser bzw. Grenzkonzentrationen im Trinkwasser in mg/L entnommen werden. Dabei bedeuten die berechneten Quotienten (mg/L berechnet : mg/L zulässig) für die wasserrechtlich relevanten Wasserinhaltsstoffe:

- > 1,0 eine Überschreitung,
- < 1,0 eine Unterschreitung,
- 1,0 die (formale) Einhaltung des Prüfwertes im Grundwasser bzw. der Grenzkonzentration im Trinkwasser.

Die Konzentrationen der Wasserinhaltsstoffe, die zu einer formalen Überschreitung des Prüfwertes im Grundwasser bzw. der Grenzkonzentration im Trinkwasser führen würden, sind mit einem * gekennzeichnet.

Da in wässriger Lösung u.a. die Anorganika Ba, Be, Mg, PO₄, SiO₂ und die Organika Anionische Tenside, Nichtionische Tenside, AOX, BTEX, Mineralöl-KW und die Bestandteile der Summenparameter DOC G und SOS G selbst unter den Bedingungen des geplanten Endlagers mit gesättigter NaCl-Lösung keine Chlorokomplexe bilden, ist für diese Stoffe auch keine weitere Betrachtung der Hydrolyse von Chlorokomplexen und deren Hydrolyseprodukte erforderlich. Die Bildung der bekannten Chlorokomplexe von Ag (I), Cd (II), Hg (II) in gesättigten NaCl-Lösungen und deren Zerfall zu Hydrolyseprodukten nach Massgabe der Verdünnungsfaktoren ist allerdings möglich. Dies erklärt auch, warum Cd beim Wirtsgestein Salinar in ges. NaCl-Lösung und Resthohlraumvolumen 500.000 m³ bzw. 1 Mio. m³ zur Einhaltung des Grenzwertes ein minimal notwendiges Verdünnungswasservolumen von 5,6 Mia. m³ bzw. 10,4 Mia. m³ erfordert, während Cd bei den nicht-salinaren Wirtsgesteinen/Versatzmaterialien und im Basisinventar geringere Verdünnungswasservolumina (Faktor 2-4) bedingt, siehe dazu Tab. 8-7 + 8-8; Abb. 2, 5 + 8.

10 Bewertung der Überschreitungen sowie Empfehlung und Bewertung von Abhilfemassnahmen bei Überschreitungen von Grenzkonzentrationen bzw. Prüfwerten gelöster Wasserinhaltsstoffe

Im ersten Schritt wird hypothetisch unterstellt, dass jeder wasserrechtlich relevante Stoff sich im angebotenen Lösungsvolumen (bzw. im reinen Wasseranteil der ges. NaCl-Lösung) vollständig auflöst. Die so ermittelten Konzentrationen sind als maximal erreichbare Konzentrationen zu betrachten, da keine Löslichkeitsbegrenzungen der Stoffe vorliegen. Aus Anhang B sind die Maximalkonzentrationen bei einer hypothetischen vollständigen Lösung aller wasserrechtlich relevanten Wasserinhaltsstoffe zu entnehmen.

Unterstellt man eine hypothetische vollständige Lösung des Basisinventars mit Versatzmaterial in 1 Mio. m³ gesättigter NaCl-Lösung (871.830 m³ Wasseranteil), dann enthält die Lösung ca. 84 Ma.-% gelöste Feststoffe und ca. 16 Ma.-% Wasseranteil. Alle anderen Kombinationen enthalten einen noch geringeren Wasseranteil.

Es gibt nur wenige Feststoffe, die im Wasser vergleichbar konzentrierte (Salz-)Lösungen bilden, z.B. die Anorganika ZnCl₂ mit ca. 78 Ma.-%, NH₄NO₃ mit ca. 66 Ma.-%, CsCl mit ca. 65 Ma.-% und die Organika Harnstoff (NH₂)₂CO mit ca. 52 Ma.-%, Saccharose mit 66,6 Ma.-% bzw. Weinsäure mit ca. 58 Ma.-%. Zum Vergleich: die gesättigte NaCl-Lösung, die als Versatzmaterial im Wirtsgestein „Salinar“ verwendet wird enthält ca. 27,5 Ma.-% gelöste Feststoffe und 72,5 Ma.-% Wasseranteil.

Die Annahme einer hypothetischen vollständigen Lösung der Inventarbestandteile lässt zweifelsfrei und nachweislich diejenigen wasserrechtlich relevanten Wasserinhaltsstoffe erkennen, die aufgrund ihres zu geringen Inventars und nach Massgabe der unterstellten Resthohlraumvolumina und Verdünnungsfaktoren 500, 5.000 und 50.000 nicht in der Lage sind, den vorgegebenen Prüfwert im Grundwasser bzw. die Grenzkonzentration im Trinkwasser zu überschreiten, wie aus Anhang B. im Detail ersichtlich. Für diese Stoffe ist auch eine mögliche Komplexbildung (z.B. Chlorokomplexe) in hochsalinaren Lösungen ohne Auswirkung auf die Einhaltung der Grenzwerte. Gleichwohl werden diese Stoffe bei allen Löslichkeitsbetrachtungen (hypothetische vollständige Lösung, reale Löslichkeit in reinem Wasser, Löslichkeit in Anwesenheit von ges. NaCl-Lösung) stets mitberücksichtigt. Das Interesse bei der Prüfung auf Einhaltung der wasserrechtlichen Bestimmungen konzentriert sich verständlicherweise auf diejenigen Wasserinhaltsstoffe, die aufgrund ihres Inventars und nach Massgabe der Resthohlraumvolumina und Verdünnungsfaktoren potenziell die Prüfwerte im Grundwasser bzw. Grenzkonzentrationen im Trinkwasser überschreiten könnten und untersucht die Löslichkeit der Wasserinhaltsstoffe u.a. in Abhängigkeit vom Referenz-pH-Wert 8 in den Trinkwassernetzen. Kein Kredit wird davon genommen, dass durch die grossen Massen an zementhaltigen Materialien (Mörtel, Beton) das chemische Milieu aus dem alkalischen Bereich (pH 12,5 bis 14) - in dem die Löslichkeit einer Reihe von Metall-Ionen erheblich herabgesetzt sein kann – nach Massgabe der Verdünnung in den pH-Bereich der Trinkwassernetze übergeht.

Da in diesem komplexen Vielstoffsystem des Gesamtinventars nicht nur leichtlösliche Stoffe unterstellt werden und vorkommen, sondern auch schwerlösliche Stoffe, so wird deren Lösungsverhalten im Anhang B unter Berücksichtigung der realen Löslichkeit der wasserrechtlich relevanten Wasserinhaltsstoffe (Materialien/Komponenten/Elemente) in reinem Wasser berücksichtigt, siehe dazu Abb. 4, 5, 7. Darüber hinaus wird im Anhang B das Lösungsverhalten der Bestandteile des Basisinventars in Anwesenheit von Versatzstoffen untersucht und die chemischen Reaktionen berücksichtigt, die realistischerweise unter den chemischen und chemotoxischen Stoffen zu erwarten sind. Sind keine Löslichkeiten der chemischen und chemotoxischen Stoffe unter den Bedingungen der Anwesenheit von gesättigter NaCl-Lösung und Basisinventar mit übrigem Versatzmaterial verfügbar, so werden konservativ die Löslichkeiten in reinem Wasser zugrundegelegt.

10.1 Bewertung der Überschreitungen bei einzelnen Kombinationen Basisinventar/ohne bzw. mit Versatzmaterial/Wirtsgestein/Resthohlraumvolumina

Bei den Hohlraumvolumina 100.000 m³, 500.000 m³ und 1 Mio. m³ und der jeweiligen Verdünnung 5.000-fach resultieren die Überschreitungen für verschiedene Wasserinhaltsstoffe (Parameter) aus verschiedenen Gründen, und zwar bei:

- a) Cadmium wegen relativ grossem Abfallinventar (kerntechnische Industrie, Metallschrott) und vor allem wegen erhöhter Löslichkeit von Cadmium und seinen Verbindungen in gesättigter NaCl-Lösung (hohe Chloridgehalte!) im Versatzmaterial für das Wirtsgestein „Salinar“ sowie des niedrigen Grenzwertes für Cd von nur 0,001 mg/L,

- b) Kalium wegen relativ grossem Versatzmaterialinventar (Bentonit+PZ-Mörtel) für nicht-salinares Wirtsgestein bzw. im Salzgrus für Salinar-Wirtsgestein (siehe dazu Tab. 5-4) und infolge guter Löslichkeit der Kaliumsalze bei niedrigem Grenzwert für Kalium von nur 12 mg/L,
- c) Lithium wegen Versatzmaterialinventar (Bentonit+PZ-Mörtel) und guter Löslichkeit sowie extrem niedrigem "Vorsorgewert" von 0,1 mg/L für (identisch für Cs, Li, Rb),
- d) Rubidium wegen Versatzmaterialinventar (Bentonit+PZ-Mörtel) und guter Löslichkeit sowie extrem niedrigem "Vorsorgewert" von 0,1 mg/L für Rb (identisch für Cs, Li, Rb),
- e) Thallium wegen Versatzmaterialinventar (Salzgrus Salinar) und guter Löslichkeit sowie niedrigem Grenzwert für Tl von nur 0,001 mg/L,
- f) Yttrium wegen Versatzmaterialinventar (Bentonit) und niedrigem Grenzwert von nur 0,001 mg/L., aber auch schon für das Basisinventar (aufgrund der Massen an Sr-Y im hochaktiven Abfall BE + W). Yttrium ist ein Nervengift [25].

Anmerkung zur Überschreitung des Vorsorgewertes von Rb: der niedrige Vorsorgewert von 0,1 mg/L der seinerzeit vom BfS für KONRAD übernommen werden musste, wäre bei den Analysen einiger Grundwässer für Li mit ebenfalls 0,1 mg/L (identisch mit Cs, Rb) bereits massiv überschritten; siehe "Die natürliche, ubiquitär überprägte Grundwasserbeschaffenheit in Deutschland" von Kunkel et al. vom FZ-Jülich, S. 178-180 (Erscheinungsjahr 1997). Das Gleiche gilt für einige handelsübliche Mineral- und Tafelwässer aus dem In- und Ausland. Mit Hilfe der von Bunsen und Kirchhoff entwickelten Spektralanalyse entdeckten beide 1860 die Elemente Cäsium und Rubidium im „Bad Dürkheimer“ Mineralwasser.

10.2 Empfehlung und Bewertung von Abhilfemassnahmen bei Überschreitungen von Grenzkonzentrationen bzw. Prüfwerten von gelösten Wasserinhaltsstoffen aus Basisinventar ohne bzw. mit Versatzmaterial pro Wirtsgestein und jeweiligen Resthohlraumvolumina

An Möglichkeiten zur Einhaltung der jeweiligen Grenzkonzentrationen/Prüfwerte von Wasserinhaltsstoffen im Grundwasser bzw. Trinkwasser stehen im Prinzip zur Verfügung:

- a) eine grössere Verdünnung der im Tiefenwasser gelösten wasserfremden Inhaltsstoffe, die Verdünnung ist jedoch von der Hydrogeologie des künftigen Endlagerstandortes abhängig, also nicht frei wählbar, in eingeschränktem Umfang ist das geplante (und verbleibende) Resthohlraumvolumen einsetzbar. Eine Kombination aus einem geringen Resthohlraumvolumen und einer grossen Verdünnung ist von Vorteil für die Einhaltung der Grenzkonzentrationen/Prüfwerte von Wasserinhaltsstoffen. Wegen der Begrenzung des Druckaufbaus im Endlager infolge Gasentwicklung (Korrosion von Metallen, Radiolyse, biochemischer Abbau von Organika) werden hingegen grosse Resthohlraumvolumina angestrebt.
- b) die Einstellung eines günstigeren (höheren) pH-Wertes ($> \text{pH } 7$) für eine verringerte Löslichkeit z.B. von Metallhydroxiden, Metalloxidhydraten und Metalloxiden z.B. durch Verwendung alkalischer Fixierungsmittel im Abfallinventar und/oder Einlagerung alkalisch reagierender Versatzmaterialien wie Zuschläge von Zement (PZ-Stein, PZ-Mörtel, Beton, Flugasche, Kalkhydrat).

Für die in Tab. 8-2 genannten Wasserinhaltsstoffe Cd, K, Li, Rb, Tl, Y ergeben sich folgende Einflussmöglichkeiten zur Einhaltung der Grenzkonzentrationen/Prüfwerte:

- c) Cd, K, Li, Rb, Tl, Y: durch genügend grosse Verdünnung (abhängig von der Hydrogeologie des Endlagerstandortes). Gilt für alle wasserlöslichen (und suspendierten) Wasserinhaltsstoffe. Auf die Löslichkeit von Kalium-, Lithium- und Rubidium-Verbindungen haben Änderungen des pH-Wertes keinen Einfluss, noch kommen schwerlösliche Verbindungen dieser Elemente im Basisinventar bzw. Versatzmaterial vor.
- d) Y: die Grenzkonzentration von Y im Trinkwasser von 0,001 mg/L kann durch eine Erhöhung des pH-Wertes unterschritten werden, und zwar:
 - bei einem pH-Wert von $\geq 9,3$ (statt 8,0) ohne Verdünnung,
 - bei einem pH-Wert von $\geq 8,4$ (statt 8,0) bei 500-facher Verdünnung,

- bei einem pH-Wert von $\geq 8,05$ (statt 8,0) bei 5.000-facher Verdünnung,
 - bei einem pH-Wert von 8,0 bei 7862-facher Verdünnung, siehe Tab. 8-4
 - bei einem pH-Wert von $\geq 7,7$ (statt 8,0) bei 50.000-facher Verdünnung.
- e) Cd: für das Cd als $\text{Cd}(\text{OH})_2$ wirkt sich eine Änderung des pH-Wertes bei einem Verdünnungsfaktor 500 erst bei höheren pH-Werten $\geq 9,8$ zwecks Einhaltung des Grenzwertes aus. Löslichkeitsmindernd für Cd wirkt sich die Bildung von CdCO_3 aus.

11 Wirtsgesteine im Vergleich und minimal notwendige Verdünnungswasservolumina

Bei der Bewertung der Freisetzung chemischer und chemotoxischer Stoffe im Hinblick auf das Schutzziel des Wasserhaushaltsgesetzes zeigt sich, dass je nach unterstellten Resthohlraumvolumina von 100.000 m³, 500.000 m³ und 1 Mio. m³ sowie unterstellten Verdünnungsfaktoren von 500, 5.000 und 50.000 zur Einhaltung der wasserrechtlichen Schutzziele für alle Wasserinhaltsstoffe unterschiedliche Verdünnungswasservolumina erforderlich sind. Diese minimal notwendigen Verdünnungswasservolumina ergeben sich als Produkt aus dem minimal notwendigen Verdünnungsfaktor zur Einhaltung aller 120 untersuchten Prüfwerte für Wasserinhaltsstoffe im oberflächennahen Grundwasser bzw. Grenzkonzentrationen im Trinkwasser sowie den jeweils o.g. unterstellten Resthohlraumvolumina zu Beginn der Verdünnung und als Funktion des Basisinventars mit Versatzmaterialien für die 4 betrachteten Wirtsgesteine bzw. des Basisinventars ohne Versatzmaterial zu Vergleichszwecken, siehe dazu Abb. 5, 7, 8-12 mit den charakteristischen Verdünnungswasservolumina („Verdünnungswasserprofil“) für alle 120 untersuchten Wasserinhaltsstoffe (Anorganika + Organika).

Bei näherem Hinsehen zeigt sich, dass das minimal erforderliche Verdünnungswasservolumen (das minimal erforderliche Verdünnungspotential) sich aus dem Beitrag der löslichen und gelösten Anteile des Basisinventars und der Versatzmaterialien im oberflächennahen Grundwasser bzw. im Trinkwasser ergibt, verglichen mit den neuesten jeweils restriktivsten Konzentrationen der Wasserinhaltsstoffe, während das Wirtsgestein selbst keinen direkten Einfluss auf die Einhaltung der wasserrechtlichen Schutzziele hat. Das ist verständlich, da das Wirtsgestein zwar die Wahl des Versatzmaterials in Bezug auf Masse und chemische Zusammensetzung beeinflusst, jedoch keinen Beitrag zur Massenbilanz leistet und auch keinen direkten Kontakt zum Basisinventar hat, von dem es durch das Versatzmaterial zudem räumlich getrennt ist. Je nach Wirtsgestein (salinar bzw. nicht-salinar) unterscheiden sich die Massen und die chemische Zusammensetzung des Versatzmaterials in signifikanter Weise, während Masse und chemische Zusammensetzung des Basisinventars stets gleich bleiben. Während für das salinare Wirtsgestein ein Versatzmaterial aus Salzgrus/Salzbeton/ges. NaCl-Lösung unterstellt wird, fiel die Wahl für die nicht-salinen Wirtsgesteine auf ein Versatzmaterial aus Bentonit/PZ-Mörtel.

Mengenmässig übertrifft das umhüllende Versatzmaterial das Basisinventar beim jeweiligen Wirtsgestein, und zwar beim Wirtsgestein „Salinar“ um 205-280 Ma.-% je nach Masse gesättigter NaCl-Lösung als Füllung der unterstellten, unterschiedlich grossen Resthohlräume von 100.000 m³, 500.000 m³ bzw. 1 Mio. m³, beim Wirtsgestein „Ton“ um 218 Ma.-%, beim Wirtsgestein „Unter Tonüberdeckung“ um 224 Ma.-% und beim Wirtsgestein „Kristallin“ um 585 Ma.-%. Detaillierte Mengengerüste zum Basisinventar und zum Versatzmaterial der 4 Wirtsgesteine im Allgemeinen sind aus den Tabellen 5-1 bis 5-4 ersichtlich, während die Massen der anorganischen Wasserinhaltsstoffe As, B, Cd, K, Li, Pb, Rb, Te, Tl, Y und der organischen Wasserinhaltsstoffe NIT und Mineralöl-KW in Tabelle 5-8 dargestellt sind, d.h. Wasserinhaltsstoffe, die am ehesten zu Überschreitungen der Prüfwerte im oberflächennahen Grundwasser bzw. Grenzkonzentrationen im Trinkwasser führen und die deshalb auch die minimal erforderlichen Verdünnungswasservolumina zur Einhaltung aller Grenzwerte dominieren.

In den folgenden Tabellen 11-1 bis 11-3 sind 30 von insgesamt 120 Wasserinhaltsstoffen genannt, die bei mindestens einem Basisinventar/Versatzmaterial/Wirtsgestein bzw. bereits beim Basisinventar (ohne Versatzmaterial und ohne Wirtsgestein) zu einem hohen Verdünnungswasservolumen führen, jeweils bezogen auf die unterstellten Resthohlraumvolumina von 100.000 m³, 500.000 m³ bzw. 1 Mio. m³ und Anwendung der realen Löslichkeit in reinem Wasser bei pH 8 für nicht-salinare Wirtsgesteine bzw. im Wasseranteil der gesättigten NaCl-Lösung im Wirtsgestein Salinar. Dominierende Wasserinhaltsstoffe und dazugehörige Verdünnungswasservolumina $\geq 0,5 \text{ Mia. m}^3$ sind fett gedruckt hervorgehoben. Dabei handelt es sich bei den jeweiligen Wasserinhaltsstoffen um die minimal notwendigen Verdünnungswasservolumina in Mia. m³, um für die Wasserinhaltsstoffe deren neueste, restriktivste Prüfwerte im Grundwasser bzw. Grenzkonzentrationen im Trinkwasser formal einhalten zu können.

Zum Vergleich herangezogen wurden 23 anorganische und 7 organische Wasserinhaltsstoffe, deren minimal notwendige Verdünnungswasservolumina $\geq 0,5 \text{ Mia. m}^3$ übersteigen. Mit steigendem Resthohlraumvolumen erhöhen sich, wie bereits in Tabelle 8-7 erwähnt, die minimal notwendigen Verdünnungswasservolumina, sofern sich aufgrund eines genügend grossen Inventars die jeweiligen Wasserinhaltsstoffe im Tiefenwasser nachlösen können. Reicht das Inventar des betreffenden Wasserinhaltsstoffes dazu nicht aus, stagnieren die minimal notwendigen Verdünnungswasservolumina, siehe dazu die Ergebnisse in den Tabellen 11-1 bis 11-3.

Von der Sorption anorganischer und organischer Wasserinhaltsstoffe an Feststoffoberflächen, Hydrolyse und biochemischem Abbau organischer Stoffe wird hier im Rahmen einer konservativen (d.h. weit auf der sicheren Seite liegende) Modellbetrachtung bzw. -untersuchung kein Kredit genommen.

Tabelle 11-1: Minimal notwendige **Verdünnungswasservolumina in Mia. m³** im Grundwasser/Trinkwasser zur Einhaltung der PW/GK von Wasserinhaltsstoffen mit hohen Verdünnungswasservolumina bei mindestens einem Wirtsgestein (ausgehend von **100.000 m³** Resthohlraumvolumen; Wasserinhaltsstoffe mit **≥ 0,5 Mia. m³** Verdünnungswasservolumen pro Wirtsgestein bzw. ohne Versatzmaterial fett markiert)

Wirtsgestein (Resthohlraumvolumen 100.000 m ³) Wasserinhaltsstoffe:	Salinar [Mia. m ³]	Kristallin [Mia. m ³]	Ton [Mia. m ³]	Unter Ton- überdeckung [Mia. m ³]	<u>ohne Versatz-</u> material [Mia. m ³]
Anorganika:					
Al	0,26	0,002	0,002	0,002	0,002
As	0,30	0,34	0,34	0,34	0,34
B	1,22	1,35	1,35	1,35	1,35
Br	0,11	0,00009	0,00009	0,00009	0,00009
Cd	1,75	0,98	0,98	0,98	0,98
Cl	0,40	0,01	0,003	0,003	0,0006
Cr	0,45	0,022	0,022	0,021	0,014
Fe	0,20	0,036	0,036	0,036	0,0016
Hg	0,91	1,76	0,49	0,57	0,04
K	1,92	3,1	3,1	3,1	0,44
Li	0,79	3,9	1,55	1,67	0,55
Mo	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06
Na	0,356	0,53	0,52	0,46	0,15
PO4	0,455	1,05	1,05	1,05	1,05
Pb	0,52	0,68	0,68	0,68	0,68
Rb	0,41	7,0	2,34	2,57	0,34
Sb	0,13	0,144	0,144	0,144	0,144
Se	0,40	0,56	0,56	0,56	0,56
Te	0,175	0,20	0,20	0,20	0,20
TI	3,05	0,08	0,08	0,07	0,04
U	0,98	1,05	1,05	1,05	1,05
V	0,12	0,14	0,14	0,14	0,14
Y	0,69	0,79	0,79	0,79	0,79
Organika:					
ANT	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
ANT+NIT	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
Mineralöl-KW	0,19	0,22	0,22	0,22	0,22
NIT	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6
PAK G	1,31	0	0	0	0
PCB E (PCB 28)	0,91	0	0	0	0
PCB E (PCB 52)	0,26	0	0	0	0

Tabelle 11-2: Minimal notwendige **Verdünnungswasservolumina in Mia. m³** im Grundwasser/Trinkwasser zur Einhaltung der PW/GK von Wasserinhaltsstoffen mit hohen Verdünnungswasservolumina bei mindestens einem Wirtsgestein (ausgehend von **500.000 m³** Resthohlraumvolumen; Wasserinhaltsstoffe mit **≥ 0,5 Mia. m³** Verdünnungswasservolumen pro Wirtsgestein bzw. ohne Versatzmaterial fett markiert)

Wirtsgestein (Resthohlraumvolumen 500.000 m ³) Wasserinhaltsstoffe:	Salinar [Mia. m ³]	Kristallin [Mia. m ³]	Ton [Mia. m ³]	Unter Ton- überdeckung [500.000 m ³]	<u>ohne Versatz-</u> material [Mia. m ³]
Anorganika:					
Al	1,12	0,009	0,009	0,009	0,009
As	1,48	1,70	1,70	1,70	1,70
B	1,87	1,84	1,84	1,84	1,84
Br	0,56	0,00009	0,00009	0,00009	0,00009
Cd	5,60	1,75	1,75	1,75	1,75
Cl	1,32	0,01	0,003	0,003	0,0006
Cr	1,47	0,03	0,03	0,03	0,02
Fe	0,86	0,18	0,18	0,18	0,008
Hg	0,91	1,76	0,49	0,57	0,04
K	3,42	8,41	3,38	3,47	0,44
Li	0,84	3,88	1,55	1,67	0,55
Mo	1,07	1,08	1,08	1,08	1,08
Na	1,20	0,65	0,52	0,46	0,15
PO4	0,69	1,1	1,1	1,1	1,1
Pb	1,77	1,18	1,18	1,18	1,18
Rb	0,47	7,0	2,34	2,57	0,34
Sb	0,63	0,72	0,72	0,72	0,72
Se	0,53	1,14	1,14	1,14	1,11
Te	0,88	1,0	1,0	1,0	1,0
Tl	3,05	0,08	0,08	0,07	0,04
U	1,56	1,60	1,60	1,60	1,60
V	0,61	0,70	0,70	0,70	0,70
Y	3,43	3,93	3,93	3,93	3,93
Organika:					
ANT	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
ANT+NIT	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
Mineralöl-KW	0,96	1,10	1,10	1,10	1,10
NIT	1,61	1,61	1,61	1,61	1,61
PAK G	1,87	0	0	0	0
PCB E (PCB 28)	0,91	0	0	0	0
PCB E (PCB 52)	1,04	0	0	0	0

Tabelle 11-3: Minimal notwendige **Verdünnungswasservolumina in Mia. m³** im Grundwasser/Trinkwasser zur Einhaltung der PW/GK von Wasserinhaltsstoffen mit hohen Verdünnungswasservolumina bei mindestens einem Wirtsgestein (ausgehend von **1 Mio. m³** Resthohlraumvolumen; Wasserinhaltsstoffe mit **≥ 0,5 Mia. m³** Verdünnungswasservolumen pro Wirtsgestein bzw. ohne Versatzmaterial fett markiert)

Wirtsgestein (Resthohlraumvolumen 1 Mio. m ³) Wasserinhaltsstoffe:	Salinar [Mia. m ³]	Kristallin [Mia. m ³]	Ton [Mia. m ³]	Unter Ton- überdeckung [Mia. m ³]	<u>ohne Versatz-</u> material [Mia. m ³]
Anorganika:					
Al	2,2	0,02	0,02	0,02	0,02
As	3,0	3,4	3,4	3,4	2,9
B	1,89	1,84	1,84	1,84	1,84
Br	1,1	0,00009	0,00009	0,00009	0,00009
Cd	10,4	2,7	2,7	2,7	2,7
Cl	2,3	0,01	0,003	0,003	0,0006
Cr	2,4	0,03	0,03	0,03	0,022
Fe	1,5	0,36	0,36	0,36	0,016
Hg	0,91	1,76	0,49	0,57	0,04
K	3,5	8,4	3,4	3,5	0,44
Li	0,9	3,9	1,55	1,67	0,55
Mo	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10
Na	2,25	0,65	0,52	0,46	0,15
PO4	1,0	1,1	1,1	1,1	1,1
Pb	2,4	1,2	1,2	1,2	1,2
Rb	0,54	7,0	2,3	2,6	0,34
Sb	1,25	1,45	1,44	1,44	1,44
Se	0,69	1,15	1,14	1,14	1,11
Te	1,75	2,0	2,0	2,0	2,0
Tl	3,05	0,08	0,08	0,07	0,04
U	1,9	2,0	2,0	2,0	2,0
V	1,2	1,4	1,4	1,4	1,4
Y	6,9	7,9	7,9	7,9	7,3
Organika:					
ANT	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
ANT+NIT	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
Mineralöl-KW	1,9	2,2	2,2	2,2	2,2
NIT	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6
PAK G	2,1	0	0	0	0
PCB E (PCB 28)	0,91	0	0	0	0
PCB E (PCB 52)	1,05	0	0	0	0

11.1 Die Verdünnungswasservolumina dominierenden Wasserinhaltsstoffe

Diese die minimal notwendigen Verdünnungswasservolumina dominierenden (anorganischen + organischen) Wasserinhaltsstoffe sind, um hier jeweils nur die 10 wichtigsten pro Basisinventar/Versatzmaterial/Wirtsgestein bzw. Basisinventar (ohne Versatzmaterial/Wirtsgestein) für das konservative Lösungsszenario 1 Mio. m³ Resthohlraumvolumen (anfängliches Porenvolumen) in der Reihenfolge abnehmender Verdünnungswasservolumina zu nennen, wie aus Tabelle 11-3 mit 30 Wasserinhaltsstoffen eindeutig abzulesen ist:

- beim Wirtsgestein/Versatzmaterial „Salinar“: Cd, Y, K, Tl, As, Pb, Cr, Cl, Na, Al, PAK G, Öl-KW
- beim Wirtsgestein/Versatzmaterial „Kristallin“: K, Y, Rb, Li, As, Cd, Öl-KW, Te, U, B, Hg, NIT
- beim Wirtsgestein/Versatzmaterial „Ton“: Y, As, K, Cd, Rb, Öl-KW, Te, U, B, NIT, Li, Sb
- beim Wirtsgestein/Versatzmaterial „Unter Tonüberdeckung“: Y, K, As, Cd, Rb, Öl-KW, Te, U, B, Li, NIT, Sb
- beim Basisinventar (ohne Versatzmaterial): Y, As, Cd, Öl-KW, Te, U, B, NIT, Sb, ANT + NIT, V, Pb.

Für die o.g. 20 wichtigsten Wasserinhaltsstoffe aller 4 Wirtsgesteine/Versatzmaterialien/Basisinventare bzw. des Basisinventars allein lassen sich die neuesten jeweils restriktivsten Prüfwerte im Grundwasser bzw. Grenzkonzentrationen im Trinkwasser ableiten aus den folgenden Verordnungen, Regelwerken, Empfehlungen:

- Novellierung der Trinkwasserverordnung 2001: Pb, PAK G, Sb
- Neufassung der Trinkwasserverordnung 1990: K, Mineralöl-KW
- LAWA 1998: Tl, V
- DVGW 1996: As, B, Cd, Cr, Cl, Na, NIT, ANT+NIT
- NLÖ 1998: Li, Rb
- WHO 1998: U
- Sittig 2002: Te
- U.S. Department of Health, Education and Welfare Toxic Substances List 1972: Y.

Bemerkenswert ist, dass Y bereits beim Basisinventar (d.h. ohne Versatzmaterial) das Verdünnungswasservolumen mit $\geq 1,6$ Mia. m³ bei einem Resthohlraumvolumen ≥ 200.000 m³ dominiert, weil die Masse Y aus dem Spaltproduktpaar Sr+Y von abgebrannten BE und hochaktivem Glas bereits grösser ist als zur Sättigung in reinem Wasser bei pH 8 oder in gesättigter NaCl-Lösung mit gelösten Y-Verbindungen notwendig wäre.

Wie das Beispiel Yttrium zeigt, überträgt sich der Einfluss der Wasserinhaltsstoffe aus dem Basisinventar auf die Ergebnisse für die Kombination Basisinventar/Versatzmaterial für die 4 Wirtsgesteine, wie auch aus Abb. 5, 8-12 und den Tabellen 11-1 bis 11-3 für As, B, Cd, Te, U, Sb, Y ersichtlich. Bemerkenswert ist, dass aus dem Versatzmaterial selbst bedeutende Beiträge der Massen von leichtlöslichen Wasserinhaltsstoffen K, Na, Li, Rb, Tl, Cl stammen, die dazu führen, dass zur Einhaltung der entsprechenden Prüfwerte im oberflächennahen Grundwasser und Grenzkonzentrationen im Trinkwasser bedeutende Verdünnungswasservolumina notwendig werden, die aus dem Basisinventar (ohne Versatzmaterial) nicht notwendig wären.

Die dominierende Rolle des Cd beim Wirtsgestein Salinar und Resthohlraumvolumina 500.000 m³ bzw. 1 Mio. m³ ist auf die in stark chloridhaltigen Lösungen (hier gesättigte NaCl-Lösung) markant erhöhte Löslichkeit von Cd als Chlorokomplex zurückzuführen, mit dem die Verdünnung beginnt. Eine solche Löslichkeitserhöhung zeigt sich auch bei chromhaltigen Stoffen, wenn auch ohne Bildung starker Chromchlorokomplexe.

Von künftigen Interesse ist ein Vergleich der unterstellten Resthohlraumvolumina mit den aus heutiger Planung erwarteten Porenvolumina im Versatzmaterial pro Wirtsgesteininformation. Gemäss Unterlagen BfS „Modellparameter für die Endlagerauslegung“ wird das anfängliche Porenvolumen für die Wirtsgesteine wie folgt geschätzt (hier dürfte es sich um das Porenvolumen in den Versatzmaterialien und nicht im Basisinventar handeln):

- Unter Tonüberdeckung: 206.000 m³
- Ton: 223.000 m³
- Kristallin: 671.000 m³
- Salinar: 1.024.000 m³ (hier Salinar flach).

Während für die unterstellten Resthohlraumvolumina von 100.000 m³, 500.000 m³ bzw. 1 Mio. m³ und unterstellten Verdünnungsfaktoren (inkl. der minimal erforderlichen Verdünnungsfaktoren zur Einhaltung aller Prüfwerte/Grenzkonzentrationen der Wasserinhaltsstoffe) die Ergebnisse der wasserrechtlichen Bewertung hier vorliegen, wird ein Vergleich mit den Resthohlraumvolumina, die sich aus dem Auffüllen der anfänglich vorhandenen Porenvolumina mit Flüssigkeit (Wasser bzw. gesättigte NaCl-Lösung) ergeben, weitere wertvolle Ergebnisse liefern. Dabei ist auch eine Reihenfolge der minimal erforderlichen Verdünnungswasservolumina pro Basisinventar/Versatzmaterial/Wirtsgestein bei ansonsten unveränderten Randbedingungen zu erwarten, siehe dazu Abb. 5. Einen nicht zu unterschätzenden Einfluss nehmen allerdings auch die sich einstellenden pH-Werte auf die Löslichkeit vieler Metallhydroxide, -oxidhydrate und -oxide der Inventarbestandteile. Dieser Löslichkeitsbeeinflussung durch den pH-Wert überlagert sich der Einfluss von Carbonaten (infolge CO₂-Entwicklung beim biochemischen Abbau), Phosphaten, Chromaten, Sulfaten und Silikaten auf die Löslichkeit der Inventarbestandteile.

Vorteilhaft ist in jedem Falle ein minimales Resthohlraumvolumen (Porenvolumen des Versatzmaterials) für jede Kombination Basisinventar/Versatzmaterial/Wirtsgestein, sofern das entsprechende Porenvolumen nicht im Widerspruch zum zulässigen Druckaufbau infolge Gasentwicklung und der fortwährenden Integrität der technischen und geologischen Barrieren steht. Die Bandbreite des Porenvolumens bei den Wirtsgesteinen reicht gemäss modellhafter Endlagerauslegung BfS nach heutigem Kenntnisstand von ca. 200.000 m³ bei Ton, ca. 223.00 m³ unter Tonüberdeckung, über ca. 671.0000 m³ bei Kristallin bis hin zu ca. 1 Mio. m³ bei Salinar. Die unterstellten Resthohlraumvolumina von minimal 100.000 m³, 500.000 m³ bzw. 1 Mio. m³ decken diese o.g. Porenvolumina ab und erlauben eine Eingrenzung der minimal notwendigen Verdünnungswasservolumina für die dominierenden Wasserinhaltsstoffe bei den verschiedenen Kombinationen Basisinventar/Versatzmaterial/Wirtsgestein. Allerdings wird erst die Berücksichtigung der o.g. erwarteten Porenvolumina aus den Planungsdaten BfS für die einzelnen Wirtsgesteine/Versatzmaterialien massgeschneiderte Ergebnisse liefern.

Zur konservativen Bewertung der wasserrechtlich relevanten Wasserinhaltsstoffe und der Einhaltung/Nichteinhaltung ihrer Schutzziele gehört auch, dass von einer möglichen Sorption der betrachteten 120 Wasserinhaltsstoffe im Basisinventar, am Versatzmaterial und/oder Wirtsgestein bei der wasserrechtlichen Bewertung kein Kredit genommen wird, obwohl mit dem Phänomen der Sorption an Feststoffoberflächen bei dem einen oder anderen Wasserinhaltsstoff auf dem Transportweg vom Endlager in die Biosphäre zu rechnen sein wird. Ebenso wenig wird der im Laufe der Zeit unvermeidliche biochemische Abbau der Organika (u.a. BTEX, Tenside, Mineralöl-KW) bei der Einhaltung der wasserrechtlichen Schutzziele berücksichtigt, sondern konservativ unterstellt, dass die Organika abbauresistent seien, was bekanntermassen nicht der Fall ist. Der biochemische, hydrolytische und/oder durch metallisches Eisen katalysierte Abbau der chemotoxischen organischen Stoffe garantiert deren Einhaltung der wasserrechtlichen Schutzziele. Der radiolytische Abbau der Organika ist in der Regel gering verglichen mit dem hydrolytischen Abbau.

11.2 Zusammenfassende Bewertung

Die Hydrogeologie des künftigen Endlagerstandortes entscheidet letzten Endes über die Einhaltung/Nichteinhaltung der wasserrechtlichen Schutzziele. Für ein fiktives standortungebundenes Endlager ist die Hydrogeologie (das Verdünnungspotenzial) allerdings nicht bekannt. Eine verbindliche Reihenfolge der Endlagereignung gemäss den 4 vorgegebenen Wirtsgesteinformationen lässt sich deshalb nicht aufstellen. Möglich ist jedoch eine Reihenfolge der Einflussgrössen auf die Einhaltung der wasserrechtlichen Schutzziele, wie aus der Abb. 5, 8-12 und den Tabellen 11-1 bis 11-3 ersichtlich. Die charakteristischen Unterschiede der minimal notwendigen Verdünnungswasservolumina zur Einhaltung aller Prüfwerte im oberflächennahen Grundwasser bzw. Grenzkonzentrationen im Trinkwasser zeigen sich in den Abb. 8-12 auf anschauliche Weise ("Verdünnungswasservolumenprofil") mit Nennung der dominierenden Wasserinhaltsstoffe und sind direkt unter den verschiedenen Kombinationen Basisinventar/Versatzmaterial/Wirtsgestein und mit dem Basisinventar (ohne Versatzmaterial und ohne Wirtsgestein) vergleichbar.

Obwohl die hier durchgeführte Parameterstudie mit den 3 unterstellten Resthohlraumvolumina (Anfangsporenvolumen) von 100.000 m³, 500.000 m³ und 1 Mio. m³, die sich mit gesättigter NaCl-Lösung bei salinarem Wirtsgestein bzw. bzw. mit zutretendem Wasser bei den nicht-salinaren Wirtsgesteinen auffüllen, die Anfangsporenvolumina der Versatzmaterialien mit den 4 Wirtsgesteinen abdecken, wird erst die Berücksichtigung der erwarteten Porenvolumina aus den Planungsdaten BfS für die einzelnen Basisinventare/Versatzmaterialien/Wirtsgesteine massgeschneiderte Ergebnisse der minimal notwendigen Verdünnungswasservolumina zur Einhaltung aller Prüfwerte im oberflächennahen Grundwasser bzw. Grenzkonzentrationen im Trinkwasser liefern. Einige generell gültige Feststellungen lassen sich jedoch treffen.

Entscheidenden Einfluss auf die Einhaltung der Schutzziele haben in der Reihenfolge ihrer Bedeutung:

- a) das notwendige Verdünnungswasservolumen (die Hydrogeologie des Standortes!),**
- b) das Resthohlraumvolumen (Anfangsporenvolumen) im Endlagerwirtsgestein/Versatzmaterial,**
- c) das Versatzmaterial, das für die betreffende Wirtsgesteinformation vorgegeben wird,**
- d) das Basisinventar.**

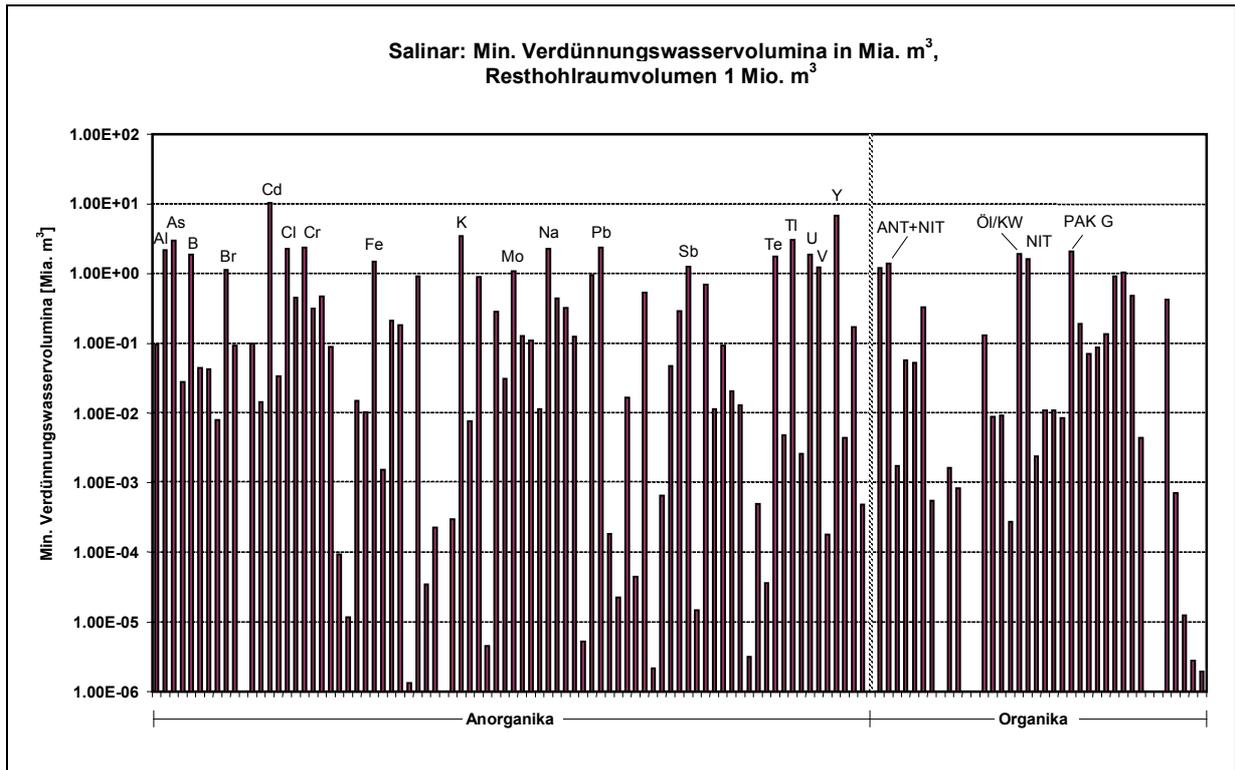


Abb. 8: Verdünnungswasservolumina in **Mia. m³** für anorganische und organische Wasserinhaltsstoffe (Parameter) für das Wirtsgestein Salinar mit Resthohlraumvolumen **1 Mio. m³** und Anwendung der realen Löslichkeit in ges. NaCl-Lösung im Wasseranteil der ges. NaCl-Lösung bei pH 8: minimal notwendige Verdünnungswasservolumina zur Einhaltung aller Prüfwerte/Grenzkonzentrationen nach Anorganika und Organika getrennt dargestellt

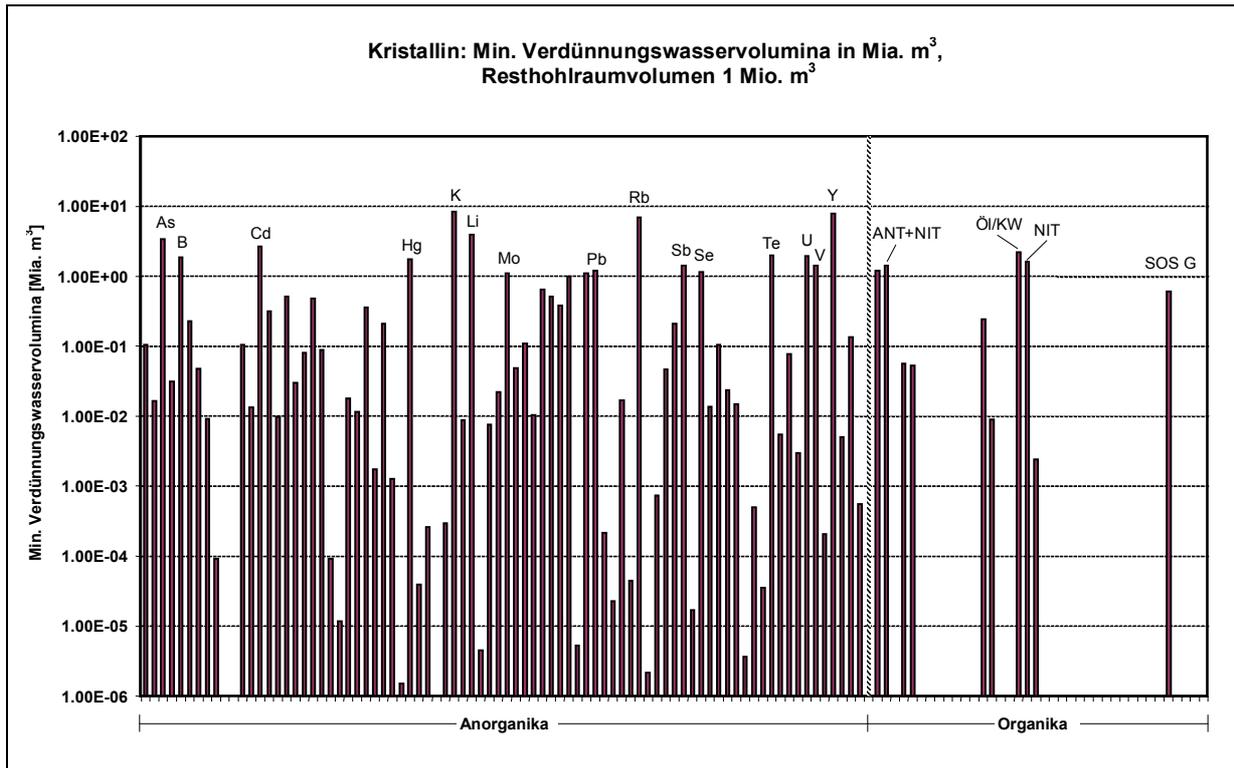


Abb. 9: Verdünnungswasservolumina in **Mia. m³** für anorganische und organische Wasserinhaltsstoffe (Parameter) für das Wirtsgestein Kristallin mit Resthohlraumvolumen **1 Mio. m³** und Anwendung der realen Löslichkeit in reinem Wasser bei pH 8: minimal notwendige Verdünnungswasservolumina zur Einhaltung aller Prüfwerte/Grenzkonzentrationen nach Anorganika und Organika getrennt dargestellt

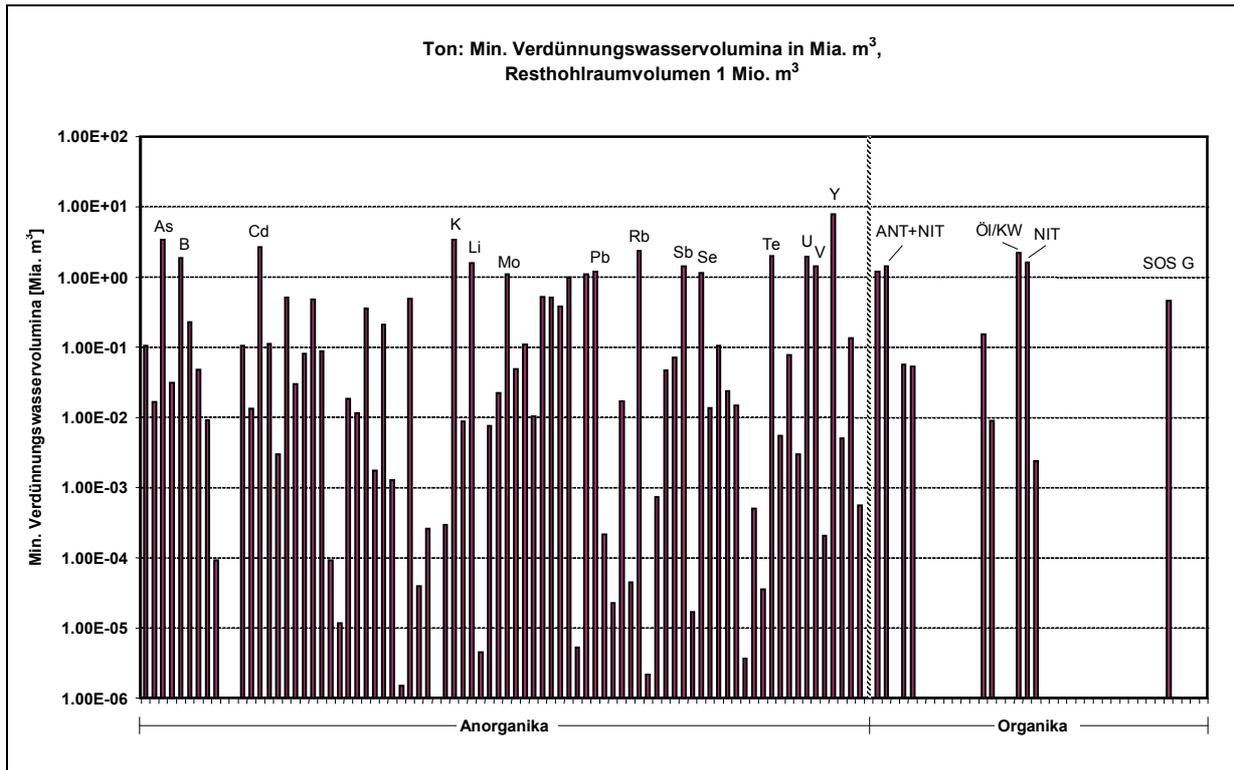


Abb. 10: Verdünnungswasservolumina in **Mia. m³** für anorganische und organische Wasserinhaltsstoffe (Parameter) für das Wirtsgestein Ton mit Resthohlraumvolumen **1 Mio. m³** und Anwendung der realen Löslichkeit in reinem Wasser bei pH 8: minimal notwendige Verdünnungswasservolumina zur Einhaltung aller Prüfwerte/Grenzkonzentrationen nach Anorganika und Organika getrennt dargestellt

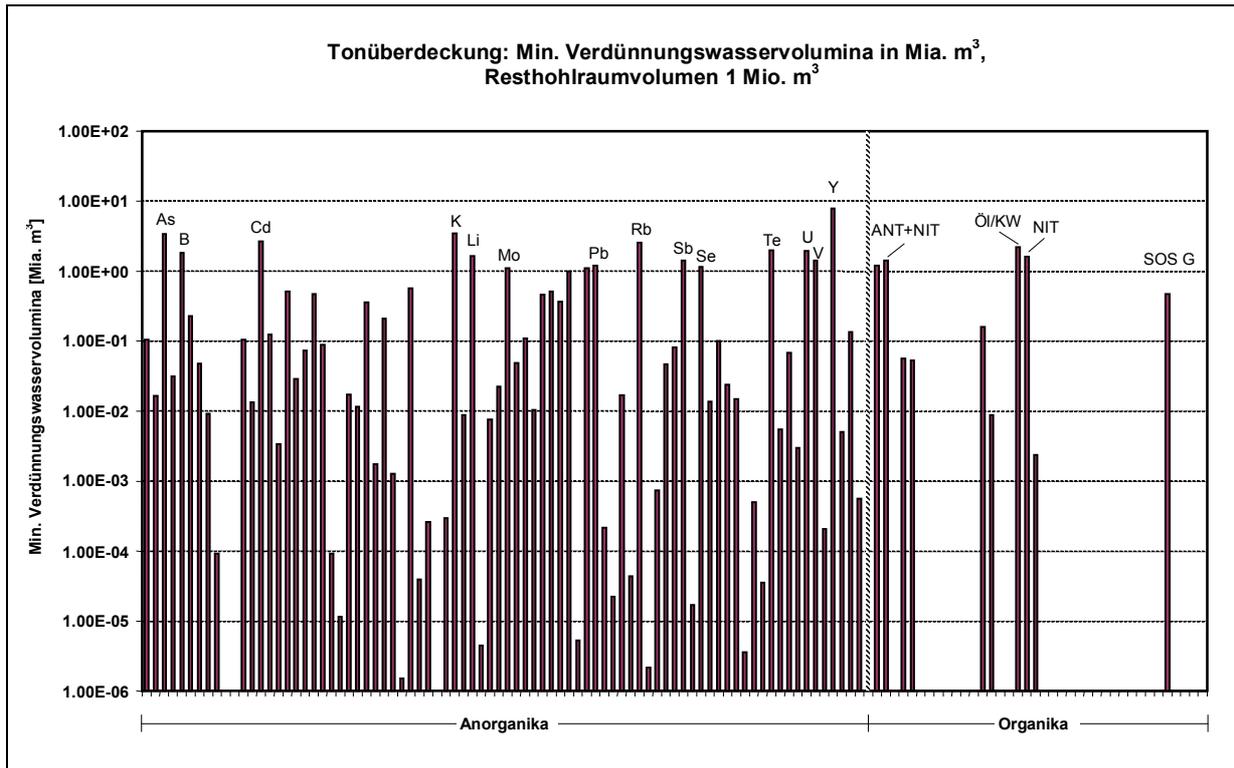


Abb. 11: Verdünnungswasservolumina in **Mia. m³** für anorganische und organische Wasserinhaltsstoffe (Parameter) für das Wirtsgestein Unter Tonüberdeckung mit Resthohlraumvolumen **1 Mio. m³** und Anwendung der realen Löslichkeit in reinem Wasser bei pH 8: minimal notwendige Verdünnungswasservolumina zur Einhaltung aller Prüfwerte/Grenzkonzentrationen nach Anorganika und Organika getrennt dargestellt

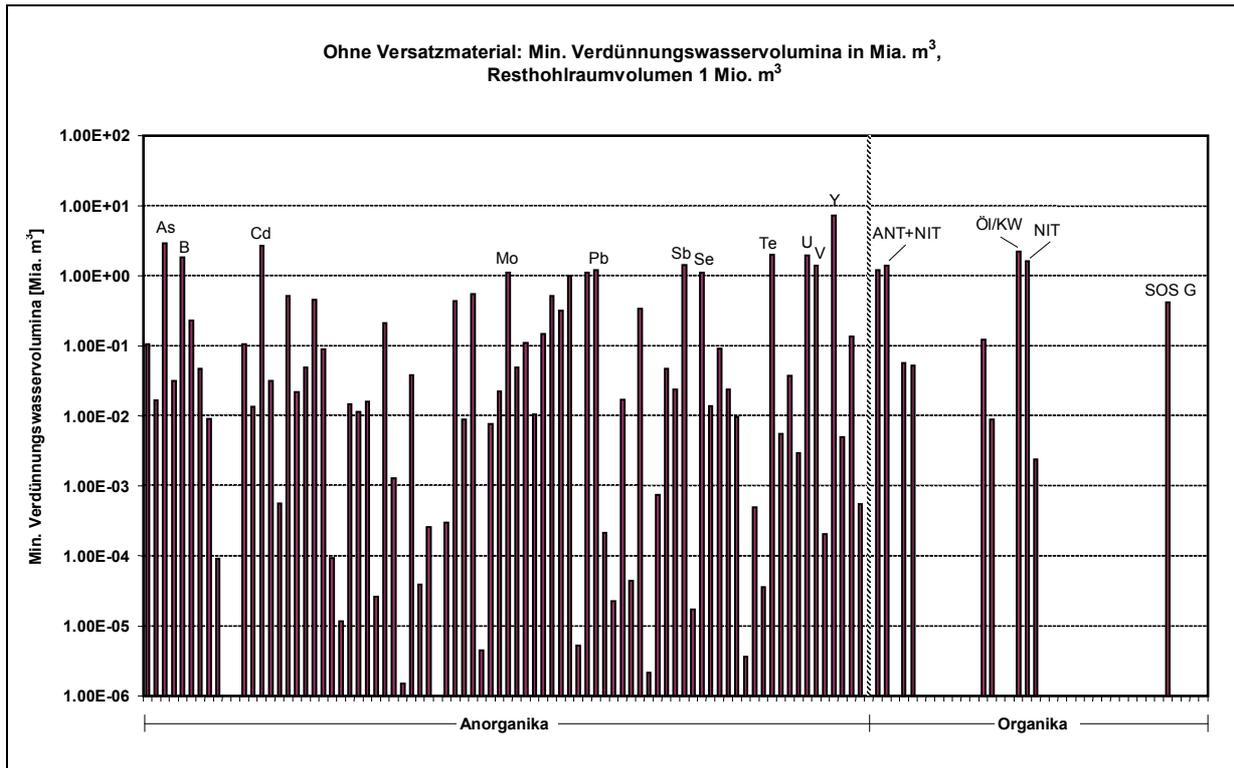


Abb. 12: Verdünnungswasservolumina in **Mia. m³** für anorganische und organische Wasserinhaltsstoffe (Parameter) für das Basisinventar (ohne Versatzmaterial) mit Resthohlraumvolumen **1 Mio. m³** und Anwendung der realen Löslichkeit in reinem Wasser bei pH 8: minimal notwendige Verdünnungswasservolumina zur Einhaltung aller Prüfwerte/Grenzkonzentrationen nach Anorganika und Organika getrennt dargestellt

12 Literaturverzeichnis / Referenzen

- [1] „Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts (Wasserhaushaltsgesetz, WHG), Bundesgesetzblatt, Jahrgang 1996, Teil I, Nr. 58, S. 1696-1711
- [2] „Verordnung zur Umsetzung der Richtlinie 80/68/EWG des Rates vom 17. Dezember 1979 über den Schutz des Grundwassers gegen Verschmutzung durch bestimmte gefährliche Stoffe (Grundwasserverordnung) vom 18. März 1997“
Bundesgesetzblatt, Jahrgang 1997, Teil I, Nr. 18, S. 542-544
- [3] „Richtlinie des Rates vom 17. Dezember 1979 über den Schutz des Grundwassers gegen Verschmutzung durch bestimmte gefährliche Stoffe (80/68 EWG)“.
Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften, II, Nr. L 20/43 – Nr. 20/48 vom 26.01.1980
- [4] „Bekanntmachung der Neufassung der Trinkwasserverordnung vom 5. Dezember 1990“, Bundesgesetzblatt, Jahrgang 1990, Teil I, Nr. 66, S. 2612-2629
- [5] „Verordnung zur Novellierung der Trinkwasserverordnung vom 21. Mai 2001“, Bundesgesetzblatt, Jahrgang 2001, Teil I, Nr. 24, S. 959-980
- [6] „Bewertung der Stoffe Cs, Li und Rb in Grundwasser“, Niedersächsisches Landesamt für Ökologie, 15.05.1998
- [7] P. Brennecke
„Endlagerung: Grundwasserrelevante Aspekte“, atw 43. Jg. (1998) Heft 12 – Dezember, S. 779-783
- [8] Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA): Empfehlungen für die Erkundung, Bewertung und Behandlung von Grundwasserschäden“, Stand: Oktober 1993
- [9] LAWA-Arbeitsgruppe ‘Grundwasserschutz bei Abfallverwertung und Produkteinsatz’
„Aktualisierte Prüfwerte der LAWA-Empfehlungen für die Erkundung, Bewertung und Behandlung von Grundwasserschäden“, Stand: 02. Dezember 1996
- [10] Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA):
„Geringfügigkeitsschwellen (Prüfwerte) zur Beurteilung von Grundwasserschäden und ihre Begründung“, Stand: 21. Dezember 1998
- [11] Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V. Bonn:
„Eignung von Fließgewässern für die Trinkwasserversorgung“
DVGW-Regelwerk, Technische Mitteilung, Merkblatt W 251, Stand: August 1996
- [12] Deutscher Verein von Gas- und Wasserfachmännern e.V. Eschborn:
„Eignung von Oberflächenwasser als Rohstoff für die Trinkwasserversorgung“
DVGW-Regelwerk, Technische Regeln, Arbeitsblatt W 151, Stand: Juli 1975
- [13] World Health Organization (WHO):
„Guidelines for Drinking-Water Quality“, 2nd Edition, Volume 1 (1983 + 1993/96) and Addendum to Volume 1, Recommendations (1998)
- [14] G.W. Dawson, “The Chemical Toxicity of Elements”, BNWL-1815 UC-70 (June 1974) incorporated in ORIGEN2: A.G. Croff, “ORIGEN2 – A Revised and Updated Version of the Oak Ridge Isotope Generation and Depletion Code”, ORNL-5621 (July 1980); elemental chemical toxicity of Yttrium referenced in “U.S. Department of Health, Education and Welfare Toxic Substances List”, Rockville, Maryland (June 1972)
- [15] Richard P. Pohanisch (Editor):
„Sittig’s Handbook of Toxic and Hazardous Chemicals and Carcinogens“
4th. edition, Vol. 1+2, Noyes Publications, Norwich/New York, 2002
- [16] Chlorierte Naphthaline E (Einzel) bzw. G (Gesamt) in M. Sittig:
„World-wide Limits for Toxic and Hazardous Chemicals in Air, Water and Soil“, Noyes Publications, New Jersey 1994
- [17] K. Aurand et al.; Hrsg. A. Grohmann:
„Die Trinkwasserverordnung: Einführung und Erläuterungen für Wasserversorgungs-unternehmen und Überwachungsbehörden“ 4. neu bearbeitete Auflage, Verlag Erich Schmidt, Berlin (2002)
- [18] K. Höll; Hrsg. A. Grohmann:
„Wasser – Nutzung im Kreislauf, Hygiene, Analyse und Bewertung“, 8. Auflage, Verlag Walter de Gruyter,

Berlin/New York (2002)

- [19] F.K. Ohnesorge
„Grenz- und Richtwerte der Trinkwassergüte aus toxikologischer Sicht – „Richtige“ Auswahl und Festlegung von Grenzwerten“ in AMK Berlin (Hrsg., „Wasser Berlin '85 – Kongressvorträge“, S. 671-675, Wissenschaftsverlag Spiess, Berlin (1985)
- [20] M. Altmaier, V. Brendler, D. Bosbach, B. Kienzler, Chr. Marquardt, V. Neck, A. Richter in FZK-INE 002/04:
„Geochemische Prozesse bei der Ausbreitung von Schadstoffen aus einem Endlager für radioaktive Abfälle“, September 2004, Table 6-1
- [21] C. Domènech, D. Arcos, J. Bruno, O. Karnland, A. Muurinen
„Geochemical Model of the Granite-Bentonite-Groundwater at Äspö (LOT-Experiment)“, Materials Research Society Symposium Proceedings XXVII, Vol. 807, pp. 855-860, Kalmar, Sweden (June 15-19, 2003),
- [22] H. Brücher et al.,
„Untersuchungen zur Radionuklidfreisetzung und zum Korrosionsverhalten von bestrahltem Kernbrennstoff aus Forschungsreaktoren unter Endlagerbedingungen“, Bericht Jül-4104 (2003), S. 105/106
- [23] Grohmann,
„Zur Begründung des Parameters pH-Wert in der Trinkwasserverordnung“, in „Messung, Regelung und Einstellung des pH-Wertes im Trinkwasser“, Berichtsband des VFTV zum Seminar vom 31.10.1991 in Wolfenbüttel, S. 57
- [24] R. Kunkel, F. Wendland, H-J. Voigt, S. Hannappel,
„Die natürliche, ubiquitär überprägte Grundwasserbeschaffenheit in Deutschland“, Schriften des FZ-Jülich Band 47 (Erscheinungsjahr 1997) S. 178-180
- [25] J. Falbe, M. Regitz (Hrsg.): „Römpf Lexikon Chemie“, 10., völlig überarbeitete Auflage, Georg Thieme Verlag, Stuttgart, New York 1996
- [26] „Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry“, 5th. Completely Revised Edition, Vol. B. 8 „Water“, pp. 25-27, Table 2.3, p. 26
- [27] E. Gebhart, „Mutagenität, Karzinogenität, Teratogenität“ in E. Merian (Hrsg.):
„Metalle in der Umwelt – Verteilung, Analytik und biologische Relevanz“, S. 237 – 247 Verlag Chemie, Weinheim/Deerfield Beach/Basel (1984)
- [28] I. Wagner:
„Bleirohre und Wasserqualität“
DVGW-Schriftenreihe Wasser Nr. 31, S. 331-342, Wasserfachliche Aussprachetagung Hamburg 1982, DVGW Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V., Eschborn
- [29] P.M. Mathew, P.A. Krueger:
„Metal matrixing of used nuclear fuel with particular reference to lead“, p. 25-31 in „lead: ist role in nuclear waste management – proceedings of a seminar on the role of lead in nuclear waste management“, Brussels, Nov. 20, 1984
- [30] P. Eckert, H.P. Jones, J. Schubert et al.:
„In-situ-Sanierung eines BTEX-Schadens auf dem Gelände des ehemaligen Gaswerksstandortes in Düsseldorf-Flingern“, S. 407-409 in „In-situ-Sanierung von Böden“, 11. Dechema-Fachgespräch Umweltschutz (1996)
- [31] H. Brüscheiler:
„Eigenschaften und biologisches Abbauverhalten von grenzflächenaktiven Verbindungen (Tensiden)“, Chimia 29 (1975), Nr. 1 (Januar)
- [32] J. D'Ans:
„Die Lösungsgleichgewichte der Systeme der Salze ozeanischer Salzablagerungen“, Kali Forschungs-Anstalt G.m.b.H, Berlin (1933)
- [33] W. Walz:
„Chemisch-mineralogische und physikalisch-technische Untersuchungen an bayerischen Bentoniten sowie Betrachtungen zur Genese der bayerischen Bentonitlagerstätten“, Dissertation Uni Erlangen-Nürnberg 1991
- [34] M. Hilz:

- „Die Spurenelemente in Kaolinen, kaolinitischen Tonen und Bentoniten – ihr Verhalten bei Ionenumtauschreaktionen und gegen Säuren“,
Dissertation TU München 1979
- [35] P. Brennecke
„Anforderungen an endzulagernde radioaktive Abfälle (Endlagerungsbedingungen, Stand: Dezember 1995) - Schachanlage Konrad“, BfS-Bericht ET_IB-79, Salzgitter, Dezember 1995
- [36] P. Brennecke, K. Kugel:
„Anfall radioaktiver Abfälle in Deutschland – Abfallerhebung für das Jahr 2000“, BfS-SE-02/04, Salzgitter, April 2004
- [37] Abschlussbericht „Erfassung chemotoxischer Stoffe in radioaktiven Abfällen“, Zürich (1989)
- [38] B. Rehs, E. Spoden
„Übersicht über Stilllegungsprojekte in Deutschland – Teil I: Kernkraftwerke und Prototypreaktoren“, BfS-Bericht KT-IB-88/2002, Salzgitter, Februar 2002
- [39] „Übersicht über Stilllegungsprojekte in Deutschland – Teil II: Forschungsreaktoren – Entwurf“, SR2390/1, GRS-Bericht
- [40] „Verwertung von Reststoffen und Beseitigung radioaktiver Abfälle aus der Stilllegung kerntechnischer Anlagen“ (interner Abschlussbericht)
ISTec-A-292, Juli 1998
- [41] „Stilllegungstechnik für ausgediente Kernkraftwerke mit Leichtwasserreaktoren“
NIS, Juni 2000
- [42] „Sicherheitsbericht für den Abbau des Kernkraftwerkes Stade“ (Stand: April 2003)
- [43] „Sicherheitsbericht – Stilllegung und Abbau Kernkraftwerk Mülheim-Kärlich“ (Stand: 10. Januar 2003),
RWE Power AG
- [44] H. Sterner, D. Leushacke, D. Rittscher
„Stilllegung und Abbau des Kernkraftwerkes Greifswald“, atw 40. Jg. (1995), Heft 4 – April, S. 247-252
- [45] D. Rittscher, M. Häger, F. Krause
„Kernkraftwerke Greifswald und Rheinsberg: Stilllegung, Abbau und Aufbau“, atw 47. Jg. (2002), Heft 4 – April, S. 235-243
- [46] F.W. Ledebriink, P. Faber, L. Valencia, A. Graf
„Endkonditionierung radioaktiver Abfälle für längerfristige Zwischenlagerung“, atw 45. Jg. (2000), Heft 10 – Oktober, S. 610-614
- [47] R. Baumann, E. Raabe, L. Lebert
„Endkonditionierung kernbrennstoffhaltiger Abfälle aus dem ehemaligen Siemens-Brennelementewerk Hanau“, TÜV-Seminar am 17./18.11.2003 in Hannover
- [48] W. Hajek
„Stilllegung von deutschen Forschungsreaktoren“, atw 46. Jg. (2001), Heft 2 – Februar, S. 110-112
- [49] R. Odoj, P. Brennecke, U. Hellwig
„Entsorgung von deutschen Forschungsreaktoren“, Jahrestagung Kerntechnik 2003, Fachsitzung Entsorgung/Stilllegung, November 2003, Berlin
- [50] Wiederaufarbeitungsanlage Karlsruhe (WAK)
„Wiederaufarbeitung von abgebrannten Brennelementen: Uran- und Plutoniumdurchsatz der WAK“
- [51] Landessammelstelle Bayern (LBA)
siehe Website im Internet
- [52] S. Mika, Th. Rohr, R. Seehars, A. Feser
„Urananlage Ellweiler – ein Rückbauprojekt“, atw 44. Jg. (1999), Heft 11 – November, S. 657-661
- [53] „Transport radioaktiver Stoffe – Rechtliche Grundlage, Zwischenlager und Transportbehälter“, atw 43. Jg. (1998), Heft 4 – April, S. 258

13 Verzeichnis der Abkürzungen

Abkürzung	Bedeutung
AGR	"Advanced Gas-cooled Reactor", britischer graphitmoderierter gasgekühlter Reaktortyp
ANT	Anionische Tenside
AOX	Adsorbierbare Organische Halogenverbindungen
atw	Zeitschrift Atomwirtschaft
AVR	Arbeitsgemeinschaft Versuchsreaktor
BBGA, BBGB	Kernkraftwerk Biblis A, B
BE	Brennelemente
BER2	Forschungsreaktor Berlin 2
BNFL/BNF	British Nuclear Fuel Limited
BTEX G	Benzol, Toluol, Ethylbenzol, Xylol, Styrol, Cumol Gesamt
Chelate	z. B. EDTA, NTA
COG	COGEMA
DBP	Dibutylphosphat
DDBSA	Dodecylbenzolsulfonat Na-Salz
DDD	Dichlordiphenyldichlorethan
DDE	Dichlordiphenyldichlorethylen
DDT	Dichlordiphenyltrichlorethan
DOC G	Dissolved Organic Carbon Gesamt
DVGW	Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V.
DWR	Druckwasserreaktor
EDTA	Ethylendiamintetraessigsäure (-acetat)
EOX	Eluierbare Organische Halogenverbindungen
EPDM	Ethylen-Propylen-Dien-Terpolymere (Kautschuk)
FKS	Feedklärschlämme (centrifuge cake slurry), eine mittelaktive Abfallsorte von BNFL
FRG1	Forschungsreaktor Geesthacht 1
FRM2	Forschungsreaktor München 2
GFK/KFK	Kernforschungszentrum Karlsruhe (jetzt FZ Karlsruhe)
GK	Grenzkonzentrationen
GKN1, GKN2	Gemeinschaftskraftwerk Neckar 1, 2
GWVO	Grundwasserverordnung
H&E	Hülsen und Endstücke (Hulls & Ends)
HAW	"High Active Waste", hochaktiver Abfall
HEU	Hochangereichertes Uran (High Enriched Uranium), Anreicherung typisch zwischen 70 und 93 Gewichts-% U-235
HOS	Hochhofenschlacke
ILR	"Intermediate Level Residue", mittelaktive Abfallsorte von UKAEA Dounreay

Abkürzung	Bedeutung
ITP	"Integrated Toxic Potential", Äquivalenzprinzip für den Abtausch von nicht-spezifizierten gegen spezifizierte Wiederaufarbeitungsabfälle bei BNFL
KBR	Kernkraftwerk Brokdorf
KFA	Kernforschungszentrum Jülich (jetzt FZ Jülich)
KFK	Kernforschungszentrum Karlsruhe (jetzt FZ Karlsruhe)
KGA	Kernkraftwerk Gundremmingen A
KGGB, KGGC	Kernkraftwerk Gundremmingen B, C
KGR	Kernkraftwerk Greifswald
KI1, KI2	Kernkraftwerk Isar 1, 2
KKB	Kernkraftwerk Brunsbüttel
KKE	Kernkraftwerk Emsland
KKG	Kernkraftwerk Grafenrheinfeld
KKK	Kernkraftwerk Krümmel
KKP1, KKP2	Kernkraftwerk Philippsburg 1, 2
KKR	Kernkraftwerk Rheinsberg
KKS	Kernkraftwerk Stade
KKU	Kernkraftwerk Unterweser
Komplexbildner	z. B. Citronensäure (-citrate), Weinsäure (-tartrate), Oxalsäure (-oxalate)
KW	Kohlenwasserstoff(e)
KWG	Kernkraftwerk Grohnde
KWL	Kernkraftwerk Lingen
KWO	Kernkraftwerk Obrigheim
KWW	Kernkraftwerk Würgassen
LAW	"Low Active Waste", schwachaktiver Abfall
LAWA	Länderarbeitsgemeinschaft Wasser
LEU	Niedrigangereichertes Uran (Low Enriched Uranium), Anreicherung typisch bis 20 Gewichts-% U-235
LHKW G	Leichtflüchtige Halogenierte Kohlenwasserstoffe Gesamt
LWR	Leichtwasserreaktor
MAGNOX	Britischer schwerwassermoderierter Natururanreakortyp, benannt nach einer darin verwendeten Magnesiumlegierung
MAW	"Medium Active Waste", mittelaktiver Abfall
MBP	Monobutylphosphat
MEB	"Multi-Element-Bottle", Transportbehälter der BNFL für verschiedene BE-Typen, sowie mittelaktive Abfallsorte von BNFL
MKA	Kernkraftwerk Mülheim-Kärlich
MOX-BE	"Mixed-Oxide"-BE, d.h. BE mit den Spaltstoffen Uran und Plutonium
MTIHM	"Metric Ton Initial Heavy Metal", Einheit für unbestrahlte Masse Schwermetall [Mg]
MTR	Materialtestreaktor

Abkürzung	Bedeutung
MWD	Megawatttage, Einheit der produzierten (thermischen) Energie
MWD/MTIHM	Einheit des Abbrandes (erzeugte thermische Energie pro Masseneinheit Schwermetall)
NaOH	Natronlauge
NIT	Nichtionische Tenside
NORM	Naturally Occurring Radioactive Materials (Natürlich vorkommende radioaktive Materialien)
NTA	Nitrilotriessigsäure (-acetat)
OCLV G	Organische Chlorverbindungen Gesamt
OHA	Nuklearschiff Otto Hahn
ORIGEN	Oak Ridge Isotope Generation and Depletion Code [2]
PA	Nylon
PAK	Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe
PCB	Polychlorierte Biphenyle
PCDD	Polychlorierte Dibenzodioxin(e)
PCDF	Polychlorierte Dibenzofuran(e)
PE	Polyethylen
PHB	para-Hydroxybenzoesäure
PMMA	Plexiglas
PP	Polypropylen
PS	Polystyrol
PTFE	Polytetrafluorethylen
PUR	Polyurethan
PVC	Polyvinylchlorid
PVDF	Polyvinylidenfluorid
PW	Prüfwerte
PZ	Portlandzement
RAKE	Rossendorfer Anordnung für kritische Experimente
RFR	Rossendorfer Forschungsreaktor
RHV	Resthohlraumvolumen
RRR	Rossendorfer Ringzonenreaktor
SCALE	Modular Code System for Performing Standardized Computer Analyses for Licensing Evaluation for Workstation and Personal Computers, Sammlung von Rechenprogrammen u.a. für Nuklidinventar- und Kritikalitätsberechnungen (siehe Literaturverzeichnis)
Schl.	Schlamm/Schlämme
SE	Steuerelemente
SFA	Steinkohlenflugasche
SLLR	"Solid Low Level Residues", schwachaktiver technologischer Abfall, eine Abfallsorte von BNFL
SOS G	Suspended Organic Solids Gesamt

Abkürzung	Bedeutung
Sp.Fuel+Str.Mat	Spent Fuel und Strukturmaterialien
SUR	Siemens Unterrichtsreaktoren
SWR	Siedewasserreaktor
TBP	Tributylphosphat
TCDD	Tetrachlordibenzodioxin(e)
TCDF	Tetrachlordibenzofuran(e)
THTR	Thorium-Hochtemperatur-Reaktor-Kraftwerk
TOC	Total Organic Carbon
TRIGA	Trainings- und Isotopenproduktionsreaktor
TS	Trockensubstanz
TWVO	Novellierung der Trinkwasserverordnung vom 21. Mai 2001
UKAEA	United Kingdom Atomic Energy Agency
VBA	Verlorene Betonabschirmung
VEK	Verglasungsanlage Karlsruhe (siehe auch WAK)
VDK	Verdampferkonzentrate
VEK	Verglasungsanlage Karlsruhe
VF	Verdünnungsfaktor
WAK	Wiederaufarbeitungsanlage Karlsruhe
WAU-BE	BE mit abgetrenntem und angereichertem Uran aus der Wiederaufarbeitung von BE
WHG	Wasserhaushaltsgesetz
WHO	World Health Organization
WNIH	World Nuclear Industry Handbook (siehe Literaturverzeichnis)
WTP	Walzentrocknerprodukt

ANHANG A Detaillierte Ergebnistabellen zum Masseninventar: Material-, Komponenten- und Elementinventar

Inhaltsverzeichnis des separaten Bandes:

A.1 Materialinventar: Basisinventar ohne Versatzmaterial

- A.1.1 Summe alle Herkunftskategorien
 - A.1.1.1 gesamt
 - A.1.1.2 Abfälle, Abfallbehälter, Fixierungsmittel und Verfüllmaterial
- A.1.2 Abfälle, Abfallbehälter, Fixierungsmittel und Verfüllmaterial aus der direkten Entsorgung von abgebrannten Brennelementen (BE)
- A.1.3 Abfälle, Abfallbehälter, Fixierungsmittel und Verfüllmaterial aus Forschungseinrichtungen (F)
- A.1.4 Abfälle, Abfallbehälter, Fixierungsmittel und Verfüllmaterial aus der kerntechnischen Industrie (I)
- A.1.5 Abfälle, Abfallbehälter, Fixierungsmittel und Verfüllmaterial aus dem Betrieb der Kernkraftwerke (K)
- A.1.6 Abfälle, Abfallbehälter, Fixierungsmittel und Verfüllmaterial aus den Landessammelstellen (L)
- A.1.7 Abfälle, Abfallbehälter, Fixierungsmittel und Verfüllmaterial aus der Stilllegung (S)
- A.1.8 Abfälle, Abfallbehälter, Fixierungsmittel und Verfüllmaterial von sonstigen Ablieferungspflichtigen (U)
- A.1.9 Abfälle, Abfallbehälter, Fixierungsmittel und Verfüllmaterial aus der Wiederaufarbeitung (W)

A.2 Materialinventar: Inventare mit Versatzmaterial

- A.2.1 Inventar "Salinar" mit 100.000 m³ Resthohlraumvolumen
- A.2.2 Inventar "Salinar" mit 500.000 m³ Resthohlraumvolumen
- A.2.3 Inventar "Salinar" mit 1 Mio. m³ Resthohlraumvolumen
- A.2.4 Inventar "Ton"
- A.2.5 Inventar "Unter Tonüberdeckung"
- A.2.6 Inventar "Kristallin"

A.3 Komponenteninventar

- A.3.1 Inventare mit Versatzmaterial
- A.3.2 Basisinventar ohne Versatzmaterial pro Herkunftskategorie

A.4 Elementinventar

- A.4.1 Inventare mit Versatzmaterial
- A.4.2 Basisinventar ohne Versatzmaterial pro Herkunftskategorie

ANHANG B Detaillierte Ergebnistabellen zur wasserrechtlichen Bewertung

Inhaltsverzeichnis des separaten Bandes:

B.1 Tabellarische Zusammenfassung der Ergebnisse der wasserrechtlichen Bewertung

- B.1.1 Anzahl Überschreitungen der Grenzwerte für verschiedene Wirtsgesteine/Versatzmaterialien, Löslichkeitsszenarien, Resthohlraumvolumen und Verdünnungsfaktoren
- B.1.2 Ausgewählte Wasserinhaltsstoffe und deren x-fache Prüfwerte bzw. Grenzkonzentrationen

B.2 Szenario ohne Versatzmaterial mit hypothetischer vollständiger Lösung des Gesamtinventars

- B.2.1 Resthohlraumvolumen 100.000 m³
- B.2.2 Resthohlraumvolumen 500.000 m³
- B.2.3 Resthohlraumvolumen 1 Mio. m³

B.3 Szenario ohne Versatzmaterial mit Anwendung der realen Löslichkeiten in reinem Wasser

- B.3.1 Resthohlraumvolumen 100.000 m³
- B.3.2 Resthohlraumvolumen 500.000 m³
- B.3.3 Resthohlraumvolumen 1 Mio. m³

B.4 Szenario „Salinar“ mit hypothetischer vollständiger Lösung des Gesamtinventars

- B.4.1 Resthohlraumvolumen 100.000 m³
- B.4.2 Resthohlraumvolumen 500.000 m³
- B.4.3 Resthohlraumvolumen 1 Mio. m³

B.5 Szenario „Salinar“ mit Anwendung der realen Löslichkeiten in reinem Wasser

- B.5.1 Resthohlraumvolumen 100.000 m³
- B.5.2 Resthohlraumvolumen 500.000 m³
- B.5.3 Resthohlraumvolumen 1 Mio. m³

B.6 Szenario „Salinar“ mit Anwendung der realen Löslichkeiten in gesättigter NaCl-Lösung

- B.6.1 Resthohlraumvolumen 100.000 m³
- B.6.2 Resthohlraumvolumen 500.000 m³
- B.6.3 Resthohlraumvolumen 1 Mio. m³

B.7 Szenario „Ton“ mit hypothetischer vollständiger Lösung des Gesamtinventars

- B.7.1 Resthohlraumvolumen 100.000 m³
- B.7.2 Resthohlraumvolumen 500.000 m³
- B.7.3 Resthohlraumvolumen 1 Mio. m³

B.8 Szenario „Ton“ mit Anwendung der realen Löslichkeiten in reinem Wasser

- B.8.1 Resthohlraumvolumen 100.000 m³
- B.8.2 Resthohlraumvolumen 500.000 m³
- B.8.3 Resthohlraumvolumen 1 Mio. m³

B.9 Szenario „Unter Tonüberdeckung“ mit hypothetischer vollständiger Lösung des Gesamtinventars

- B.9.1 Resthohlraumvolumen 100.000 m³
- B.9.2 Resthohlraumvolumen 500.000 m³
- B.9.3 Resthohlraumvolumen 1 Mio. m³

B.10 Szenario „Unter Tonüberdeckung“ mit Anwendung der realen Löslichkeiten in reinem Wasser

- B.10.1 Resthohlraumvolumen 100.000 m³
- B.10.2 Resthohlraumvolumen 500.000 m³
- B.10.3 Resthohlraumvolumen 1 Mio. m³

B.11 Szenario „Kristallin“ mit hypothetischer vollständiger Lösung des Gesamtinventars

- B.11.1 Resthohlraumvolumen 100.000 m³
- B.11.2 Resthohlraumvolumen 500.000 m³
- B.11.3 Resthohlraumvolumen 1 Mio. m³

B.12 Szenario „Kristallin“ mit Anwendung der realen Löslichkeiten in reinem Wasser

- B.12.1 Resthohlraumvolumen 100.000 m³
- B.12.2 Resthohlraumvolumen 500.000 m³
- B.12.3 Resthohlraumvolumen 1 Mio. m³

ANHANG C Reale Akkumulation der radioaktiven Abfälle aller Herkunftskategorien

Inhaltsverzeichnis des separaten Bandes:

C.1 Zusammenfassende Ergebnisse der Abklingrechnung des Gesamtinventars nach Herkunftskategorien

C.2 Aktivität [Bq] versus Zeit [Jahre] des Gesamtinventars

- C.2.1 Gesamtaktivität in [Bq]
- C.2.2 Alpha-Aktivität in [Bq]
- C.2.3 Beta/Gamma-Aktivität in [Bq]
- C.2.4 Aktivität der Aktiniden in [Bq]
- C.2.5 Aktivität der Aktivierungs- und Spaltprodukte in [Bq]

C.3 Aktivität [Bq] versus Zeit [Jahre] aus der direkten Entsorgung von abgebrannten Brennelementen (BE)

- C.3.1 Gesamtaktivität in [Bq]
- C.3.2 Alpha-Aktivität in [Bq]
- C.3.3 Beta/Gamma-Aktivität in [Bq]
- C.3.4 Aktivität der Aktiniden in [Bq]
- C.3.5 Aktivität der Aktivierungs- und Spaltprodukte in [Bq]

C.4 Aktivität [Bq] versus Zeit [Jahre] aus Forschungseinrichtungen (F)

- C.4.1 Gesamtaktivität in [Bq]
- C.4.2 Alpha-Aktivität in [Bq]
- C.4.3 Beta/Gamma-Aktivität in [Bq]
- C.4.4 Aktivität der Aktiniden in [Bq]
- C.4.5 Aktivität der Aktivierungs- und Spaltprodukte in [Bq]

C.5 Aktivität [Bq] versus Zeit [Jahre] aus der kerntechnischen Industrie (I)

- C.5.1 Gesamtaktivität in [Bq]
- C.5.2 Alpha-Aktivität in [Bq]
- C.5.3 Beta/Gamma-Aktivität in [Bq]
- C.5.4 Aktivität der Aktiniden in [Bq]
- C.5.5 Aktivität der Aktivierungs- und Spaltprodukte in [Bq]

C.6 Aktivität [Bq] versus Zeit [Jahre] aus dem Betrieb der Kernkraftwerke (K)

- C.6.1 Gesamtaktivität in [Bq]
- C.6.2 Alpha-Aktivität in [Bq]
- C.6.3 Beta/Gamma-Aktivität in [Bq]
- C.6.4 Aktivität der Aktiniden in [Bq]
- C.6.5 Aktivität der Aktivierungs- und Spaltprodukte in [Bq]

C.7 Aktivität [Bq] versus Zeit [Jahre] aus den Landessammelstellen (L)

- C.7.1 Gesamtaktivität in [Bq]
- C.7.2 Alpha-Aktivität in [Bq]
- C.7.3 Beta/Gamma-Aktivität in [Bq]
- C.7.4 Aktivität der Aktiniden in [Bq]
- C.7.5 Aktivität der Aktivierungs- und Spaltprodukte in [Bq]

C.8 Aktivität [Bq] versus Zeit [Jahre] aus der Stilllegung (S)

- C.8.1 Gesamtaktivität in [Bq]
- C.8.2 Alpha-Aktivität in [Bq]
- C.8.3 Beta/Gamma-Aktivität in [Bq]
- C.8.4 Aktivität der Aktiniden in [Bq]
- C.8.5 Aktivität der Aktivierungs- und Spaltprodukte in [Bq]

C.9 Aktivität [Bq] versus Zeit [Jahre] von sonstigen Ablieferungspflichtigen (U)

- C.9.1 Gesamtaktivität in [Bq]
- C.9.2 Alpha-Aktivität in [Bq]
- C.9.3 Beta/Gamma-Aktivität in [Bq]
- C.9.4 Aktivität der Aktiniden in [Bq]
- C.9.5 Aktivität der Aktivierungs- und Spaltprodukte in [Bq]

C.10 Aktivität [Bq] versus Zeit [Jahre] aus der Wiederaufarbeitung (W)

- C.10.1 Gesamtaktivität in [Bq]
- C.10.2 Alpha-Aktivität in [Bq]
- C.10.3 Beta/Gamma-Aktivität in [Bq]
- C.10.4 Aktivität der Aktiniden in [Bq]
- C.10.5 Aktivität der Aktivierungs- und Spaltprodukte in [Bq]

ANHANG D Ergebnistabellen zum Aktivitätsinventar und Mengengerüst von BE + WA in MTIHM

Inhaltsverzeichnis des separaten Bandes:

D.0 „Executive Summary“

D.1 Modellierung des Brennelementkollektivs (BE) der Leistungsreaktoren, reale Akkumulation und MTIHM

- D.1.1 Modellierung von AVR- und THTR- Brennelementen und reale Akkumulation des Aktivitätsinventars
- D.1.2 Modellierung des Brennelementkollektivs der Leichtwasserreaktoren und reale Akkumulation des Aktivitätsinventars

D.2 Modellierung der Wiederaufarbeitungsabfälle (W), reale Akkumulation und MTIHM

- D.2.1 Modellierung der hochaktiven Abfälle von COGEMA und reale Akkumulation des Aktivitätsinventars
- D.2.2 Modellierung der mittelaktiven Abfälle von COGEMA und reale Akkumulation des Aktivitätsinventars
- D.2.3 Modellierung der hochaktiven Abfälle von BNFL und reale Akkumulation des Aktivitätsinventars
- D.2.4 Modellierung der mittel- und schwachaktiven Abfälle von BNFL und reale Akkumulation des Aktivitätsinventars
- D.2.5 Modellierung der hochaktiven Abfälle der Wiederaufarbeitungsanlage Karlsruhe (WAK) und reale Akkumulation des Aktivitätsinventars
- D.2.6 Modellierung der mittelaktiven Abfälle aus UKAEA Dounreay und reale Akkumulation des Aktivitätsinventars
- D.2.7 Modellierung des Kernbrennstoffinventars aus dem Forschungsreaktor Rossendorf und reale Akkumulation des Aktivitätsinventars
- D.2.8 Modellierung des Kernbrennstoffinventars aus den Siemens Unterrichtsreaktoren (SUR) und reale Akkumulation des Aktivitätsinventars
- D.2.9 Modellierung der Brennstäbe des NS Otto Hahn und reale Akkumulation des Aktivitätsinventars
- D.2.10 Modellierung des Kernbrennstoffinventars aus den zur direkten Endlagerung vorgesehenen BE der Forschungsreaktoren und reale Akkumulation des Aktivitätsinventars

D.3 Modellierung des gesamten Aktivitätsinventars an BE + W vs. Zeit, reale Akkumulation und MTIHM

D.4 Modellierung des gesamten Aktivitätsinventars aller Abfälle vs. Zeit bei realer Akkumulation

D.5 Literaturverzeichnis

- D.5.1 Verwendete Abkürzungen

ANHANG E Strahlenchemischer Abbau oder Aufbau chemotoxischer organischer Stoffe in radioaktiven Abfällen

Inhaltsverzeichnis des separaten Bandes:

E.0 „Executive Summary“

E.1 Einleitung

E.2 Liste bekannter chemotoxischer organischer Stoffe, Nomenklatur

E.3 Resultate

E.3.1 COGEMA Bituminierte Fällungen und Konzentrate

E.3.2 EDTA-Abbau für ausgewählte Gebinde einer Abfallsorte K (Betriebsabfälle KKW)

E.3.3 Radiolytischer Abbau in der gesamten Herkunftskategorie K (Betriebsabfälle KKW)

E.3.4 Rangliste der dosisrelevanten Radionuklide für verschiedene Zeithorizonte in der Herkunftskategorie K

E.4 Literaturverzeichnis

E.5 Verzeichnis der Tabellen

ANHANG F Chemischer Abbau oder Aufbau chemotoxischer organischer Stoffe in radioaktiven Abfällen

Inhaltsverzeichnis des separaten Bandes:

F.0 „Executive Summary“

F.1 Einleitung

F.2 Herkunft und Rahmenbedingungen der eingelagerten Stoffe

F.3 Chemotoxische Stoffe im Endlager

F.4 Chemische Abbaureaktionen

F.5 Hydrolysereaktionen

F.6 Zusammenfassende Beurteilung der Resultate

F.7 Reduktionsreaktionen

F.8 Mögliche Reaktionen zwischen Verbindungen verschiedener Verbindungsklassen

F.9 Wasserstoffbildung in Abfallgebinden

F.10 Verzeichnis der Abkürzungen

F.11 Verzeichnis der Abbildungen und Tabellen

F.12 Literaturverzeichnis