

Chemische Stoffe in radioaktiven Abfällen und Bewertung ihrer Freisetzung

Wien, 2025

Impressum

Herausgeber: Österreichischer Beirat für die Entsorgung radioaktiver Abfälle - Entsorgungsbeirat

Medieninhaber: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Klima- und Umweltschutz, Regionen und Wasserwirtschaft, Stubenring 1, 1010 Wien

Autorinnen und Autoren: AGES Geschäftsfeld Strahlenschutz, Nuclear Engineering Seibersdorf

Wien, 2025. Stand: 29.04.2025

Copyright und Haftung:

Auszugsweiser Abdruck ist nur mit Quellenangabe gestattet, alle sonstigen Rechte sind ohne schriftliche Zustimmung des Medieninhabers unzulässig.

Es wird darauf verwiesen, dass alle Angaben in dieser Publikation trotz sorgfältiger Bearbeitung ohne Gewähr erfolgen und eine Haftung des Bundesministeriums und der Autorin / des Autors ausgeschlossen ist. Rechtausführungen stellen die unverbindliche Meinung der Autorin / des Autors dar und können der Rechtsprechung der unabhängigen Gerichte keinesfalls vorgreifen.

Rückmeldungen: Ihre Überlegungen zu vorliegender Publikation übermitteln Sie bitte an kontakt@entsorgungsbeirat.gv.at.

Inhalt

EXECUTIVE SUMMARY	5
1 EINLEITUNG.....	10
2 DARSTELLUNG DER ENTSORGUNG KONVENTIONELLER ABFÄLLE	12
2.1 Kriterien der Entsorgung nach Deponieverordnung	12
2.2 Kriterien der Entsorgung in Lagern für chemische Abfälle.....	15
3 GRUNDLAGEN ZUR ERMITTLUNG GRUNDWASSERGEFÄHRDENDER UND CHEMOTOXISCHER STOFFE	19
3.1 Grundlagen zur Erstellung der Liste grundwassergefährdender Stoffe bzw. chemotoxischer Stoffe	19
3.2 Grundwassergefährdende Stoffe - Stofffamilien und Stoffgruppen	20
3.2.1 Liste I der Stofffamilien und Stoffgruppen	20
3.2.2 Liste II der Stofffamilien und Stoffgruppen	20
3.3 Chemotoxische Stoffe.....	21
3.3.1 Organisch chemotoxische Stoffe	23
3.3.2 Anorganisch chemotoxische Stoffe	24
3.4 Materialien, Komponenten und Elemente im österreichischen Gesamtinventar (NES)	24
3.4.1 Konditionierung und Konditionierungsarten.....	24
3.4.2 Stoffliche Beschreibung der konditionierten Abfälle	28
3.4.3 Von stofflicher Beschreibung zu chemischen Daten	32
3.4.4 Chargen.....	35
4 MODELLBETRACHTUNGEN ZUR ERMITTLUNG VON KONZENTRATIONEN FÜR ALLE WASSERRECHTLICH RELEVANTEN INHALTSSTOFFE DES GESAMTINVENTARS	42
4.1 Grundlagen für die Ermittlung der Konzentrationen	42
4.1.1 Vorgehensweise bei der Ermittlung der Konzentrationen wasserrechtlich relevanter Wasserinhaltsstoffe.....	43
4.1.2 Hypothetische vollständige Lösung aller wasserrechtlich relevanten Wasserinhaltsstoffe	43
4.1.3 Reale Löslichkeit von wasserrechtlich relevanten Wasserinhaltsstoffen in reinem Wasser (minimale Salinität)	43
4.1.4 Reale Löslichkeit von wasserrechtlich relevanten Wasserinhaltsstoffen im Wasseranteil der gesättigten NaCl-Lösung (maximale Salinität).....	44
4.1.5 Konzentrationsänderungen bei abbaubaren organischen chemotoxischen Stoffen	44
4.1.6 Einfluss auf den pH-Wert infolge Wechselwirkung zutretender Wässer (Grundwasser) mit dem Verfüllmaterial	45

4.2 Bewertung und Bedeutung von Lösungskonzentrationen	47
5 VORSCHLAG FÜR EINE GESTUFTE NACHWEISFÜHRUNG	48
5.1 Kurzbeschreibung der vorgesehenen Nachweisschritte	48
5.2 Szenarienentwicklung und Szenarienanalyse.....	49
5.3 Beschreibung der Nachweisführung	51
5.3.1 Vollständiger Einschluss bei der wahrscheinlichen Entwicklung des Endlagers ...	52
5.3.2 Vollständiger Einschluss bei weniger wahrscheinlichen Entwicklungen des Endlagers.....	53
5.3.3 Geringfügigkeit des chemotoxischen Inventars	53
5.3.4 Geringfügigkeit des Stoffeintrags in das Grundwasser	54
6 SCHLUSSFOLGERUNGEN UND AUSBLICK	56
6.1 Überlegungen zu Transportmodellierung	57
6.2 Überlegungen zur Beurteilung der Geringfügigkeit von Feststoffkonzentrationen	58
6.3 Überlegungen zum Nachweiszeitraum.....	58
6.4 Überlegungen zu mineralischen Endlagerkomponenten	59
6.5 Überlegungen zur Inventarisierung der Abfallgebinde	60
TABELLENVERZEICHNIS	62
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	63
LITERATURVERZEICHNIS.....	64
ABKÜRZUNGEN.....	66

EXECUTIVE SUMMARY

Der Schutz von Mensch und Umwelt ist oberster Grundsatz bei der Entsorgung und Einlagerung radioaktiver Abfälle. Das Gesamtinventar eines Endlagers für radioaktive Abfälle setzt sich aus einer Vielzahl von organischen und anorganischen radioaktiven und nichtradioaktiven Stoffen zusammen. Die dabei unter Umständen enthaltenen chemotoxischen Stoffe sind Bestandteile der Abfälle selbst, ihrer Konditionierung und der Abfallbehälter, der Materialien zur Verfüllung der Einlagerungsbereiche sowie der Schächte und Zugänge, der Verschlussbauwerke und der im Endlager verbleibenden Infrastruktureinrichtungen. Im Rahmen einer Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP) und eines Genehmigungsverfahrens für ein solches Endlager muss nachgewiesen werden, dass diese Stoffe keine schädlichen Verunreinigungen des Grundwassers oder andere nachteilige Veränderungen seiner Eigenschaften verursachen.

Ziel dieses Berichtes ist es, die wesentlichen zu berücksichtigenden Stoffgruppen chemischer Substanzen, die zu einer Beeinträchtigung führen können, zu identifizieren und ein systematisches, endlagertypunabhängiges Nachweiskonzept für den Schutz des Grundwassers vor chemotoxischen Stoffen in einem solchen Endlager zu entwickeln. Für die möglichen zukünftigen Entwicklungen eines solchen Endlagers wird in abgestufter Form aufgezeigt, wie dieser Nachweis erbracht werden kann. Soweit quantitative Nachweise eine Rolle spielen, werden die dafür zur Verfügung stehenden Instrumente vorgestellt. Verbleibende offene Punkte werden hervorgehoben.

Ausgangspunkt des Nachweises zum Schutz des Grundwassers vor chemotoxischen Stoffen ist, dass für die wahrscheinliche und die zu betrachtenden weniger wahrscheinlichen Entwicklungen des Endlagers zu zeigen ist, dass entweder keine chemotoxischen Stoffe aus dem Endlager freigesetzt werden (vollständiger Einschluss) oder dass andernfalls die Veränderung des Grundwassers so geringfügig ist, dass eine schädliche Verunreinigung des Grundwassers oder sonstige nachteilige Veränderung seiner Eigenschaften nicht zu erwarten ist. Der Nachweis des Grundwasserschutzes vor im Endlager enthaltenen chemotoxischen Stoffen kann grundsätzlich auf die Ergebnisse der Szenarienanalyse im radiologischen Langzeitsicherheitsnachweis zurückgreifen und erfordert keine zusätzlichen Szenarien.

BEGRIFFSBESTIMMUNGEN

Abfallbehälter	Der Behälter zur Aufnahme eines Abfallprodukts (z. B. Fass, Betonbehälter, Gussbehälter, Container).
Abfallgebinde	Die endzulagernde Einheit aus Abfallprodukt und Abfallbehälter.
Abfallmatrix	Das ausgehärtete Fixierungsmittel, in dem radioaktiver Abfall fixiert ist.
Abfallprodukt	Verarbeiteter radioaktiver Abfall ohne Verpackung oder unverarbeiteter radioaktiver Abfall in einem Behälter verpackt.
Aktivität (Radioaktivität)	Die Aktivität ist das Maß für die Anzahl der Kernumwandlungen eines Radionuklids oder mehrerer Radionuklide pro Zeiteinheit (i. A. Sekunde). Die Aktivität wird in Becquerel (Bq) angegeben. Die alleinige Angabe der Aktivität ohne Kenntnis des Radionuklids lässt keine Aussage über die Strahlenexposition zu.
Betriebsphase	Beginnt nach Erteilung der Betriebsbewilligung zur planmäßigen Einlagerung der Abfälle und endet mit dem Abschluss der Stilllegungsmaßnahmen des Endlagers einschließlich der Fertigstellung des Verschlusses.
Biosphäre	Jener Ausschnitt der Erdoberfläche, der von Organismen belebt und bewohnt wird. Sie reicht von den obersten Schichten des Tiefseebodens bis zur Sauerstoffgrenze.
BTEX	BTEX ist die zusammenfassende Abkürzung für die ersten Vertreter der homologen Reihe der aromatischen Kohlenwasserstoffe Benzol, Toluol, Ethylbenzol und Xylol. Sie sind flüchtige organische Verbindungen, die schon bei Raumtemperatur als Gas vorliegen. BTEX findet sich in allen Produkten wieder, die aus Erdöl hergestellt werden, wie z.B. Benzin, Lösungsmittel oder Kunststoff.

Eluat	Eluat bezeichnet die Flüssigkeit, die während des Auswasch- oder Elutionsprozesses von einem Feststoff getrennt wird. Im Zusammenhang mit Filter- oder Ionenaustauschverfahren handelt es sich beim Eluat um die Lösung, die gelöste Stoffe wie Ionen, Schwermetalle oder organische Verunreinigungen enthält und von einem Feststoffmedium (wie einem Ionenaustauscherharz, einem Aktivkohlefilter oder einem Bodenmaterial) ausgewaschen wurde. Die Zusammensetzung des Eluats liefert wichtige Informationen über die Art und Menge der Stoffe, die im Feststoffmedium gebunden waren.
Endlager	Einrichtung zur Lagerung nicht weiter verwertbarer radioaktiver Abfälle, deren spätere Entfernung aus dem Lager nicht vorgesehen ist. Das Endlager ist Teil des Endlagersystems, in dem radioaktive Abfälle eingelagert werden.
Endlagersystem	Umfasst das Endlager sowie seine Umgebung, die alle Bereiche einschließt, die für den Nachweis der Einhaltung der Sicherheitsprinzipien und Schutzziele der Endlagerung betrachtet werden müssen.
Szenario	Gesamtheit der Bedingungen und Annahmen zu Quellen, Expositionspfade und Mengen bzw. Konzentrationen relevanter Schadstoffe, der Art, Anzahl bzw. Charakteristika belasteter Organe, Personen oder Personengruppen, die zur Modellierung und Abschätzung von Expositionen in einer gegebenen oder einer zukünftigen Situation herangezogen werden.
FEP	FEP steht für Features, Events und Processes, die im Rahmen der Sicherheitsbewertung der Nachverschlussphase von Endlagern betrachtet werden.
Freisetzung	Das Entweichen radioaktiver Stoffe aus den vorgesehenen Umschließungen in die Anlage oder Umgebung.
Geosphäre	Den gesamten festen Erdkörper umfassender Bereich und seine bis zur Exosphäre reichende gasförmige Hülle (Atmosphäre).

Ionisierende Strahlung	Elektromagnetische- oder Teilchenstrahlung (z. B. Alphastrahlung, Betastrahlung, Gammastrahlung, Röntgenstrahlung), welche die Bildung von Ionen bewirken können.
Kohlenwasserstoffe KW	Kohlenwasserstoffe, Abk. KW-Stoffe, Gruppe von organischen Verbindungen, die im Erdöl und Steinkohlen-Teer vorkommen und ausschließlich aus einem Kohlenstoffgerüst (Kohlenstoff) mit gebundenen Wasserstoffatomen (Wasserstoff) bestehen
Merkmale (Features)	Merkmale sind Bedingungen oder Gegebenheiten, durch die ein bestimmtes System oder Teilsystem zu einem Zeitpunkt (i. d. R. Ausgangszustand einer betrachteten Entwicklung) charakterisiert ist, wie z. B. das Radionuklidinventar oder die Porosität des Versatzes.
Nahfeld (Near Field)	Die Gebiete eines Endlagers, die in der Nähe bzw. im Kontakt mit den eingelagerten Abfällen stehen, werden als Nahfeld bezeichnet. Dazu gehören z.B. versetzte Teile des Endlagers mit ihrem Versatz, Verschlussbauwerke sowie die Teile der natürlichen Umgebung, deren Eigenschaften durch das Endlager verändert wurden bzw. verändert sein könnten.
Nuklid	Durch Protonenzahl (Ordnungszahl) und Massenzahl charakterisierte Atomkernart.
Prozesse (Processes)	Prozesse sind Vorgänge und Veränderungen, die über einen im Vergleich zum Nachweiszeitraum länger andauernden Zeitraum ablaufen, wie z. B. Konvergenz oder der Zerfall langlebiger Radionuklide. Prozesse beziehen sich i. A. auf die Entwicklung des Endlagersystems.
Porenwasser	Jener Wasseranteil, der in feinen Hohlräumen des Verfüllmaterials, des Bodens oder des oberflächennahen Gesteins enthalten ist.
Quellterm	Beschreibt die voraussichtlich oder tatsächlich freigesetzte Menge eines Stoffes und den zeitlichen Verlauf der Freisetzung.

Radioaktive Abfälle	Radioaktive Materialien, für die eine Weiterverwendung nicht vorgesehen ist und die als radioaktiver Abfall der behördlichen Kontrolle unterliegen.
Radioaktive Stoffe	Stoffe, die ionisierende Strahlung spontan aussenden.
Radioaktivität	Eigenschaft bestimmter chemischer Elemente bzw. Nuklide, ohne äußere Einwirkung Teilchen- oder Gammastrahlung aus dem Atomkern auszusenden.
Radionuklide	Instabile Nuklide, die unter Aussendung von Strahlung in andere Nuklide zerfallen.
Risiko	Qualitative und/oder quantitative Charakterisierung eines Schadens hinsichtlich der Möglichkeit seines Eintreffens (Eintrittswahrscheinlichkeit) und der Tragweite der Schadenswirkung. Dimensionslose Zahl.
Sicherheitsanalyse	Sicherheitsanalysen (Safety Analysis) sind Teile der Sicherheitsbewertung. Sicherheitsanalysen dienen zum Nachweis der Sicherheit für bestimmte Teilaspekte. Dazu gehören z. B. die Betrachtung der Eignung des Standortes, der Errichtung und des Betriebs des Endlagers und die Bewertung radiologischer Risiken. Hervorzuheben sind die Sicherheitsanalysen für die Bewertung der Sicherheit für die Betriebsphase und die Nachverschlussphase eines Endlagers.
Sicherheitsbewertung	Die Sicherheitsbewertung (Safety Assessment) umfasst die Gesamtheit aller Sicherheitsanalysen und darüber hinaus nötige wissenschaftlichen, technischen, administrativen und innerbetrieblichen Argumente und Nachweise die die Sicherheit eines Endlagers belegen (die Sicherheitsanforderungen erfüllen).
Sicherheitsnachweis	Der Sicherheitsnachweis (Safety Case) wird auf Grundlage einer Sicherheitsbewertung erbracht.
Total Organic Carbon TOC	Der gesamte organische Kohlenstoff oder TOC-Wert (englisch total organic carbon) ist gibt die Summe des gesamten organischen Kohlenstoffs in einer Probe an.

1 EINLEITUNG

In einem Endlager für radioaktive Abfälle geht das weit überwiegende Gefährdungspotenzial für die Umwelt vom radioaktiven eingelagerten Inventar der Abfälle aus. An diesem Gefährdungspotenzial richten sich die Planungen und Bewilligungsvoraussetzungen für das Endlager primär aus. Die Einhaltung der Bewilligungsvoraussetzungen bedingt, dass vorgesehene Barrieren die Stoffe soweit als möglich zurückhalten und allenfalls geringe Schadstoffanteile das Nahfeld verlassen können. Diese Eigenschaft eines Endlagers ist nicht auf die radioaktiven Abfälle beschränkt; sie gilt prinzipiell für alle in einem solchen Endlager eingebrachten Stoffe.

Die Schutzmechanismen der Endlagerung wirken also auch für die chemotoxischen Stoffe. Damit ist auch die Übertragbarkeit der Schutzprinzipien grundsätzlich gegeben:

- der Vorrang für den Einschluss der Schadstoffe,
- die Forderung nach ausschließlich passiv wirksamen Rückhaltesystemen und
- eine robuste Nachweisführung mit zuverlässigen Methoden.

Die zusätzliche Betrachtung chemotoxischer Aspekte ist erforderlich, um sowohl die direkt mit Abfällen und deren Verpackung eingebrachten grundwassergefährdenden bzw. chemotoxischen Stoffe angemessen und mit zuverlässigen Methoden zu beurteilen. Es ist dabei zu zeigen, dass damit entweder keine oder nur vernachlässigbare Veränderungen beim Schutzgut Grundwasser zu erwarten sind.

Ein wesentlicher Aspekt der Langzeitsicherheitsanalyse bei Endlagern für radioaktive Abfälle ist die Prognose von möglichen Schadstoffkonzentrationen im Nah- und Fernfeld. Der erste Schritt für eine solche Prognose ist die Frage, welche Stoffe sich in welchem Umfang auflösen, da sich nur diese Stoffe und Stoffmengen an der weiteren Ausbreitung beteiligen können (Quellterm). Kapitel 3 klassifiziert und bewertet die potentiell in den österreichischen radioaktiven Abfällen enthaltenen chemischen Stoffe nach ihrer Bedeutung. Die Lösungsvorgänge und die für die quantitative Ermittlung von Lösungskonzentrationen erforderlichen Werkzeuge sind in Kapitel 4 beschrieben.

Im zweiten Schritt muss dann mit dem ermittelten Quellterm eine Transportmodellierung folgen. Diese kann zunächst auf das Nahfeld bzw. den einschlusswirksamen Bereich beschränkt bleiben, da diesem Schritt die wesentliche sicherheitstechnische Bedeutung zukommt und die Ausbreitung von Schadstoffen außerhalb dieses Bereiches nur noch

standortspezifisch ermittelt und beschrieben werden kann und nur erforderlich ist, sofern eine Freisetzung von chemotoxischen Stoffen aus dem Nahfeld in relevanten Konzentrationen zu erwarten ist.

Berücksichtigt man in einer Ausbreitungsanalyse sowohl die Löslichkeitseigenschaften der chemotoxischen Bestandteile des radioaktiven Abfalls als auch die Einschluss- bzw. Diffusionseigenschaften des gesamten Endlagersystems sowie Art und Menge des zu schützenden Grundwassers, dann erhält man im Ergebnis Konzentrationsangaben für die chemotoxischen Stoffe im Grundwasser. Mit diesem Ansatz lässt sich der Nachweis einer Geringfügigkeit auch über eine Immissionsbetrachtung führen, indem der Stoffeintrag in das Grundwasser ermittelt und bewertet wird. Das dabei zu berücksichtigende Stoffspektrum ergibt sich aus den rechtlichen Rahmenbedingungen bezüglich grundwassergefährdender bzw. chemotoxischer Stoffe, die in Kapitel 2 und 3 dargestellt werden.

Hieraus ergibt sich ein abgestuftes Vorgehen, bei dem in insgesamt vier Nachweisschritten von den sicherheitsgerichteten Eigenschaften des Endlagers einerseits und von den Eigenschaften relevanter chemotoxischer Stoffe andererseits angemessen Kredit genommen wird.

2 DARSTELLUNG DER ENTSORGUNG KONVENTIONELLER ABFÄLLE

2.1 Kriterien der Entsorgung nach Deponieverordnung

Die Deponieverordnung 2008¹ löste mit Inkrafttreten am 1. März 2008 die Deponieverordnung 1996 (BGBl. I Nr. 164/1996 i.d.F. BGBl. II Nr. 49/2004) ab. Mit der Deponieverordnung 2008 wurden unter anderem die europäische Richtlinie über Abfalldeponien (RL EG/31/1999²) und die Ratsentscheidung 2003/33/EG³ (Kriterien und Verfahren für die Annahme von Abfällen auf Deponien) in nationales Recht umgesetzt. Gemäß der genannten Entscheidung des Rates ist zur Annahme von Abfällen auf Abfalldeponien ein dreistufiges Verfahren vorgesehen:

1. Grundlegende Charakterisierung
2. Übereinstimmungsuntersuchung
3. Kontrolle auf der Deponie

Das übergeordnete Ziel der Deponieverordnung 2008 ist es, negative Auswirkungen der Ablagerung von Abfällen auf die Umwelt – insbesondere die Verschmutzung von Oberflächenwasser, Grundwasser, Boden und Luft – und auf die globale Umwelt (einschließlich des Treibhauseffekts) und alle damit verbundenen Risiken für die menschliche Gesundheit weitestmöglich zu vermeiden oder zu vermindern. Die Deponieverordnung 2008 legt dafür u. a. den Stand der Technik für Deponien fest.

Anhang 1 der Deponieverordnung 2008 listet die Grenzwerte auf, die Abfälle bei der Ablagerung in den einzelnen Deponie(unter)klassen einhalten müssen. Darüber hinaus kann die Behörde in begründeten Einzelfällen entsprechend den Bedingungen des § 8 höhere Grenzwerte genehmigen. Die Kriterien für die Einhaltung der Grenzwerte sind in Anhang 4 festgelegt, der Umfang der zu bestimmenden Parameter ist in Anhang 4 Teil 1 geregelt.

Die Ablagerung von Abfällen kann entsprechend Deponieverordnung 2008 auf folgenden Deponieklassen und -unterklassen erfolgen:

1. Bodenaushubdeponie

¹ Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft über Deponien (Deponieverordnung 2008 – DVO 2008), BGBl II Nr. 39/2008

² Richtlinie 1999/31/EG des Rates vom 26. April 1999 über Abfalldeponien, Amtsblatt Nr. L 182 vom 16/07/1999 S. 0001 – 0019 (Dokument 31999L0031).

³ 2003/33/EG: Entscheidung des Rates vom 19. Dezember 2002 zur Festlegung von Kriterien und Verfahren für die Annahme von Abfällen auf Abfalldeponien gemäß Artikel 16 und Anhang II der Richtlinie 1999/31/EG

Die Grenzwerte für Bodenaushubdeponien entsprechen weitgehend jenen der Wertungskategorie BA des Bundes-Abfallwirtschaftsplan 2011 (ausgenommen BTEX, TOC und KW im Eluat).

2. Inertabfalldeponie

Die Parameter und Höhe der Grenzwerte entsprechen der Umsetzung der EU-Vorgaben (2003/33/EG3). Für die Begrenzung der Gehalte im Feststoff (auch für Gehalte anthropogenen Ursprungs) wurde grundsätzlich die Spalte II der Bodenaushubdeponie herangezogen. Auf der Inertabfalldeponie können jedoch bei geogen bedingt höheren Feststoffgehalten (anorganische Stoffe) Bodenaushubmaterial, Bodenbestandteile und technisches Schüttmaterial ohne Begrenzung abgelagert werden, siehe § 5 Absatz 2 iVm Anhang 4 Teil 2 Tabelle 2.

3. Deponie für nicht gefährliche Abfälle:

a. Baurestmassendeponie

Auf der Baurestmassendeponie können Bodenaushubmaterial, Bodenbestandteile und technisches Schüttmaterial mit höheren geogen bedingten Feststoffgehalten (anorganische Stoffe) ohne Begrenzung abgelagert werden, siehe § 5 Abs. 3 Z 3 und 4 iVm Anhang 4 Teil 2 Tabelle 2.

b. Reststoffdeponie

Das Konzept der Reststoffdeponie lässt die Ablagerung von Abfällen zu, die hohe Schwermetallgehalte aufweisen können – nur die besonders giftigen Stoffe Arsen, Cadmium und Quecksilber sind begrenzt –, sofern diese wenig auslaugbar sind und sofern weiters die organischen Parameter niedrig sind.

Die Ablagerung stark alkalischer Rückstände aus thermischen Prozessen erfordert vor allem wegen der hohen anorganischen Restaktivitäten besondere Aufmerksamkeit. Einerseits kommt es typischerweise zu Wasserstoff- und eventuell Ammoniak-Gasbildung, andererseits ist wegen der exothermen Reaktionen mit einer relevanten Wärmeentwicklung im Deponiekörper zu rechnen. Dies geschieht insbesondere dann, wenn rasch ein großes Deponievolumen aufgebaut wird, sodass über große Zeiträume hohe Temperaturen (bis 70 und 80 °C) entstehen und deponietechnische Einrichtungen wie Basisdichtung und -entwässerung gefährdet werden können.

Sollen frische, reaktive Rückstände aus thermischen Prozessen abgelagert werden, sind die besonderen Bestimmungen des § 9, gegebenenfalls unter Berücksichtigung der gemäß § 8 genehmigten höheren Grenzwerte für bestimmte Parameter, einzuhalten. Da insbesondere frische MVA-Schlacken oft zu hohe Eluatwerte bei Blei, Kupfer, Zink u.a.

aufweisen, diese Eluatwerte jedoch innerhalb kurzer Zeit zurückgehen, darf zur Beurteilung, ob die Eluatgrenzwerte eingehalten werden, der Zustand nach einer versuchsweisen Vor-Alterung gemäß Anhang 5 Kapitel 1.2 herangezogen werden

c. Massenabfalldeponie

Das Charakteristikum der Massenabfalldeponie ist die Begrenzung der Feststoffgehalte an anorganischen Stoffen. Die organischen Summenparameter sind selbstverständlich auch begrenzt, jedoch nicht so streng wie in der Reststoffdeponie, siehe Kohlenwasserstoffindex und gesamten organischen Kohlenstoff (Total Organic Carbon TOC) im Eluat. Darüber hinaus ist die Ablagerung von mechanisch-biologisch behandelten Abfällen auf dieser Deponieunterklasse vorgesehen, daher finden sich die Stabilitätsparameter für diese Abfälle in Tabelle 9.

4. Deponie für gefährliche Abfälle (nur als Untertagedeponie)

Eine Untertagedeponie kann nach Maßgabe des Anhangs 6 als Inertabfalldeponie, als Deponie für nicht gefährliche Abfälle oder als Deponie für gefährliche Abfälle betrieben werden. In einer Untertagedeponie für gefährliche Abfälle ist ausschließlich die Ablagerung von gefährlichen Abfällen zulässig.

Auch Abfälle, deren Anteil an gesamten organischen Kohlenstoff (TOC) im Feststoff mehr als fünf Masseprozent beträgt (u. a. unbehandelte gemischte Siedlungsabfälle), dürfen nicht deponiert werden. Ausgenommen davon sind unter anderem Abfälle aus der mechanisch-biologischen Behandlung, die in einer Massenabfalldeponie unter Einhaltung der Grenzwerte für die Annahme (u. a. Brennwert von weniger als 6.600 kJ/kg TM⁴ sowie die Stabilitätsparameter Atmungsaktivität von weniger als 7 mg O₂/g TM und Gasspendensumme (bzw. alternativ dazu die Gasbildung) von weniger als 20 NL⁵/kg TM) und der spezifischen Annahmekriterien abgelagert werden (siehe Anhang 4 der Deponieverordnung 2008: Abfallannahme). Die Vermischung eines Abfalls aus mechanisch-biologischer Behandlung mit heizwertarmen Materialien oder Abfällen mit der Zielsetzung, Grenzwerte zu unterschreiten, ist unzulässig.

Unter Berücksichtigung einiger Ausnahmen (u. a. Inertabfälle) sind Abfälle vor der Deponierung einer Behandlung zuzuführen. Sofern Kriterien und Anforderungen für die Zuordnung von Abfällen zu den unterschiedlichen Deponieklassen erfüllt sind, können auf Reststoffdeponien u. a. Rückstände aus thermischen Prozessen und auf Massenabfalldeponien u. a. Rückstände aus mechanisch-biologischen Prozessen abgelagert werden. Für die Ablagerung von stark alkalischen Rückständen (pH-Wert größer 12) aus thermischen Prozessen in Reststoffdeponien werden spezifische Bedingungen definiert (z. B. Ablagerung in einem eigenen Kompartimentsabschnitt).

⁴ TM....Trockenmasse

⁵ NL.....Normliter

Als wesentliche Schwerpunkte werden in der Deponieverordnung 2008 Anforderungen an nachfolgende Bereiche festgeschrieben:

- **Abfallannahmeverfahren**, welches generell aus einer grundlegenden Charakterisierung und einer Eingangskontrolle auf der Deponie besteht. Bei Abfallströmen und bei wiederkehrend anfallenden Abfällen sind zusätzlich Übereinstimmungsbeurteilungen durchzuführen.
- **Deponiestandort**, wobei Anforderungen an den Untergrund, die Standorterkundung und -untersuchung sowie die Deponiesickerwasservorflut definiert werden.
- **Deponietechnik**, wobei Anforderungen an die Standsicherheit, das Deponierohrplanum, die Deponiebasisabdichtung, die Basisentwässerung, die Deponieoberflächenabdeckung und Zwischenabdeckung, den Wasserhaushalt, die Deponiegasbehandlung sowie die Qualitätssicherung definiert werden.
- **Deponiebetrieb**, wobei Anforderungen an die Deponieeinrichtungen und andere Anlagen innerhalb des Deponiebereichs, das Deponiepersonal, den Abfalleinbau, die Mess- und Überwachungsverfahren, die Emissions- und Immissionskontrolle, die Kontrolle des Deponiekörpers, die Registrierung im Stammdatenregister, die Aufzeichnungs- und Meldepflichten, die Deponieaufsicht, die Untertagedeponierung sowie die finanziellen Sicherstellungen definiert werden.

2.2 Kriterien der Entsorgung in Lagern für chemische Abfälle

Die europäischen abfallrechtlichen Regularien enthalten keine konkreten Vorgaben zum Grundwasserschutz vor den Gefahren durch chemotoxische Stoffe wie Stofflisten, Prüf-, Richt- oder Grenzwerte. Um trotzdem einen Anhaltspunkt zu haben, wird hier ein kurzer Überblick über die deutsche Untertage-Deponie Herfa-Neurode gegeben:

Die K+S Gruppe betreibt am Standort Herfa-Neurode seit 1972 Europas älteste Untertagedeponie, eine von vier in Deutschland zugelassenen Untertagedeponien. In etwa 800 m Tiefe werden gefährliche Abfälle unter Tage in versatzfrei genehmigten Hohlräumen aus dem Kalisalzgewinnungsbergbau beseitigt, mit dem Ziel des dauerhaften Abschlusses der Abfälle von der Biosphäre. Geologisch handelt es sich bei der Formation um eine flach liegende (söhlige) Schichtung aus Kalium-, Magnesium- und Natriumsalzen.

Aufgrund der Ausweisung als Deponie der Deponieklasse IV kommen in Herfa-Neurode die unterschiedlichsten gefährlichen Abfälle zur Ablagerung. Beispiele hierfür sind Rückstände aus Verbrennungsanlagen für Sonderabfälle und Hausmüll, Galvanik- und Härtesalzlückstände, arsen- und quecksilberhaltige Abfälle, chemische Destillationsrückstände, PCB-verunreinigte Transformatoren, Filtrations- und Klärfilterrückstände, kontaminierte Böden und Bauschutt oder Eindampfungsrückstände von Deponiesickerwässern.

Die Abfälle werden in der Regel verpackt eingelagert. Als Standard wird hier das 200-l Stahlblechfass mit einem eingelegten starkwandigen Polyethylensack verwendet. Außerdem kommen Big Bags oder Stahlblechcontainer zum Einsatz. Sperrige Sonderabfälle, wie ausgediente Transformatoren, werden nach vorheriger Entleerung des PCB-haltigen Öles und anschließendem Einfüllen von Aufsaugmitteln unverpackt eingelagert. Unterschiedliche Abfälle werden nach Stoffgruppen getrennt voneinander eingelagert, um gefährliche Reaktionen verschiedener Stoffe untereinander auszuschließen.

Die Untertagedeponie ist auf Grundlage des Abfallrechts (KrW-/AbfG)⁶ genehmigt. §§ 31 Abs. 2 und 32 KrW-/AbfG sehen hierfür ein Planfeststellungsverfahren vor. Für die Anforderungen an die Entsorgung gefährlicher Abfälle sind zum Zeitpunkt der Zulassung die „Zweite allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz“ (TA Abfall 1991)⁷ und die sich auf die TA Abfall stützende „Verordnung über Deponien und Langzeitlager“ (DepV 2006)⁸ ausschlaggebend. (Inzwischen wurde die TA Abfall 1991 in die Deponieverordnung (DepV 2009)⁹ integriert).

Als Untertagedeponie im Salzgestein gehört die Untertagedeponie Herfa-Neurode zum Untertagedeponie-Typ 1 nach TA-Abfall⁷. Für die Sicherheit bei Errichtung und Betrieb unter Tage gelten außerdem die bergrechtlichen Vorschriften des BergG 2006¹⁰ und seines untergesetzlichen Regelwerks. Die Betriebsplanpflicht ergibt sich aus den bergrechtlichen Anforderungen¹⁰ und wird im Fall der Untertagedeponie durch abfallrechtliche Bestimmungen (TA-Abfall 1991, Nr. 10.6)⁷ ergänzt.

Als Untertagedeponie im Salzgestein musste für die Deponie Herfa-Neurode nach TA Abfall 1991 eine standortbezogene Sicherheitsbeurteilung, bestehend aus geotechnischem Standsicherheitsnachweis, dem Sicherheitsnachweis für die Betriebsphase und einem Langzeitsicherheitsnachweis vorgelegt werden. Die Deponieverordnung DepV 2006 formulierte diesbezüglich in §3(5) und Anhang 2 Anforderungen an die Inhalte des Langzeitsicherheitsnachweises.

Wasserrechtliche Belange wurden im Rahmen der Genehmigung nicht gesondert behandelt, sondern über das Abfallrecht abgedeckt. Nach Angabe des Betreibers folgt der heute gültige Langzeitsicherheitsnachweis streng der Anlage 2 der DepV 2009 „Anforderungen an den

⁶ Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen („Kreislaufwirtschaftsgesetz vom 24. Februar 2012 (BGBl. I S. 212), das zuletzt durch Artikel 5 des Gesetzes vom 2. März 2023 (BGBl. 2023 I Nr. 56) geändert worden ist“ – KrW-/AbfG)

⁷ Zweite allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz (TA Abfall) Teil 1: Technische Anleitung zur Lagerung, chemisch/physikalischen, biologischen Behandlung, Verbrennung und Ablagerung von besonders überwachungsbedürftigen Abfällen vom 12. März 1991 (GMBl. I S. 139, ber. S. 467; BAnz 27.04.2009 S. 1577 aufgehoben zum 15.7.2009)

⁸ Verordnung über Deponien und Langzeitlager (Deponieverordnung - DepV), vom 24. Juli 2002 (BGBl. I S. 2807), zuletzt geändert durch Artikel 2 der Verordnung vom 13. Dezember 2006 (BGBl. I S. 2860)

⁹ Verordnung über Deponien und Langzeitlager (Deponieverordnung – DepV) vom 27. April 2009 (BGBl. I S. 900), die zuletzt durch Artikel 3 des Gesetzes vom 3. Juli 2024 (BGBl. 2024 I Nr. 225) geändert worden ist.

¹⁰ Bundesberggesetz vom 13. August 1980 (BGBl. I S. 1310), zuletzt geändert durch Artikel 11 des Gesetzes vom 9. Dezember 2006 (BGBl. I S.2833)

Standort, geologische Barriere, Langzeitsicherheitsnachweis und Stilllegungsmaßnahmen von Deponien der Klasse IV im Salzgestein“⁹. Diese sind für Untertagedeponien im Salzgestein im Anhang 2 und für den untertägigen Versatz in Salzformationen in der Anlage 4 der Versatzverordnung (VersatzV) „Hinweise zur Durchführung des Langzeitsicherheitsnachweises im Rahmen der standortbezogenen Sicherheitsbeurteilung für Bergwerke im Salzgestein, die Abfälle verwerten“¹¹ nahezu ident festgelegt. Der Nachweis der Langzeitsicherheit erfolgt dabei über die Barriereintegrität und den sicheren Einschluss der eingelagerten Abfälle.

Auf Grundlage des geotechnischen Standsicherheitsnachweises wird die Barriereintegrität im Rahmen gebirgsmechanischer Modellrechnungen für die Normalentwicklung (Konvergenz) nach Abschluss der Deponie prognostiziert. Die Berechnungen werden bis zur Erreichung der vollständigen Konvergenz der Hohlräume fortgeführt, wofür ein Zeitraum in der Größenordnung von ca. 10.000 Jahren rechnerisch erforderlich ist.

Das Barrieregestein Salz wird im Langzeitsicherheitsnachweis der Untertagedeponie als allein ausschlaggebende Barriere gesehen. Im Hinblick auf die Langzeitsicherheit hat die Abfallverpackung der einzelnen Gebinde keine Barrierefunktion. Sie dient lediglich dem sicheren Transport und der sicheren Handhabung während der Betriebsphase. Auch die physikalischen und chemischen Eigenschaften der Abfälle sind lediglich im Hinblick auf die sichere Handhabung festgelegt.

Alle gemäß Anhang 2, Nr. 2.1.5 DepV 2009 zu betrachtenden Ereignisse wurden insgesamt verbal-argumentativ behandelt, numerische Modellierungen waren ausschließlich für die Konvergenz und den Nachweis der Integrität der Barrieren erforderlich. Bei dabei zu berücksichtigenden Schadstofffreisetzung wurde über die standorttypischen Verdünnungsraten im Deckgebirge der Nachweis geführt, dass die entstehenden Konzentrationen im Grundwasser unter den jeweiligen Grenzwerten liegen. Eine Unterscheidung nach Szenarien mit unterschiedlichen Eintrittswahrscheinlichkeiten war nicht erforderlich.

Zentrales Worst Case Szenario ist der „Wassereinbruch während der Betriebsphase“. Bei der Betrachtung wird der Zutritt von Wasser bzw. Lauge als solcher rein hypothetisch betrachtet und unterstellt, mögliche Ursachen für einen Wassereinbruch werden nicht diskutiert. Im Langzeitsicherheitsnachweis wurde verbal-argumentativ der Nachweis geführt, dass die zutretenden Fluide gesättigte Salzlösungen sind, die mit der Salzzusammensetzung im Grubengebäude im Gleichgewicht stehen und nicht zu Lösungserscheinungen an dem umschließenden Salz führen. Durch die Funktion der geotechnischen Barrieren (Streckendämme etc.) soll auch bei einem Wasserzutritt der Kontakt zu den Abfallgebinden minimiert und lokal begrenzt werden. Modellrechnungen zur Schadstoffausbreitung wurden nicht durchgeführt.

¹¹ Verordnung über den Versatz von Abfällen unter Tage (Versatzverordnung - VersatzV), vom 24. Juli 2002 (BGBl. I S. 2833), zuletzt geändert durch Artikel 5 Abs. 25 G. v. 24.02.2012 BGBl. I S. 212, Geltung ab 30.10.2002; FNA: 2129-27-2-18

Für die Nachbetriebsphase gilt, dass bis zum Abschluss der Konvergenz das Szenario „Wasser-einbruch“ Bestand hat. Nach Abschluss der Konvergenz und vollständigem Einschluss der Abfälle ist nicht mehr mit einem maßgeblichen Laugenzutritt und einer daraus resultierenden Schadstofffreisetzung zu rechnen. Durch den Nachweis der langfristigen Integrität des Barrieregesteins und den vollständigen Einschluss der Abfälle konnte auf Grundlage der Deponieverordnung auf Modellrechnungen zu „nicht planbaren Ereignisabläufen“ bzw. zur Schadstoffausbreitung im Deckgebirge verzichtet werden.

Die Annahmebedingungen für die Untertagedeponie Herfa-Neurode¹² richten sich primär nach den Erfordernissen der Betriebssicherheit. Sie folgen damit den Anforderungen der TA Abfall und der Deponieverordnung und sind Bestandteil der Zertifizierung als Entsorgungsfachbetrieb¹³.

Die Abfälle dürfen unter Einlagerungsbedingungen

- nicht flüssig sein
- müssen eine mindestens stichfeste Konsistenz aufweisen,
- nicht explosibel, selbstentzündlich oder selbstgänglich brennbar sein,
- keine Reaktionen zeigen, die zu Ausgasung oder Gasbildung im Abfallbehälter führen,
- nicht penetrant riechen,
- nicht in schädlicher Weise mit dem Salzgebirge reagieren,
- keine Erreger übertragbarer Krankheiten enthalten oder hervorbringen,
- nicht radioaktiv sein,
- nicht volumenvergrößernd sein, d.h. sie dürfen nicht zur Quellung neigen.

Abfälle, die diesen Anforderungen nicht entsprechen, werden nicht angenommen und müssen ggf. einer Vorbehandlung unterzogen werden.

Grundsätzlich wäre es möglich, aus den vom Betreiber bei der Annahme der Abfälle erhobenen Informationen ein Inventar der eingelagerten chemotoxischen Schadstoffe zu erstellen. Eine systematische Inventarisierung wird aber nicht praktiziert, da es keine entsprechenden rechtlichen Anforderungen an den Deponiebetreiber gibt.

¹² Untertage-Deponie Herfa-Neurode, Standortbroschüre

¹³ Zertifikat Entsorgungsfachbetrieb, K + S Kali GmbH, D341431 Kassel, am Standort Werk Werra, Untertage-Deponie Herfa-Neurode, In der Aue 1, 36266 Heringen-Werra, mit Anhang

3 GRUNDLAGEN ZUR ERMITTLUNG GRUNDWASSERGEFÄHRDENDER UND CHEMOTOXISCHER STOFFE

3.1 Grundlagen zur Erstellung der Liste grundwassergefährdender Stoffe bzw. 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 Anlagen 2 und 3 zur Qualitätszielverordnung Chemie Grundwasser – QZV Chemie GW¹⁴
- Verordnung des Bundesministers für soziale Sicherheit und Generationen über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch (Trinkwasserverordnung - TWV)¹⁵

Ergänzend werden auch internationale Empfehlungen und Regelwerke für Wasserinhaltsstoffe herangezogen, für die Grenzkonzentrationen, Prüfwerte bzw. Richtwerte

¹⁴ 98. Verordnung: Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft über den guten chemischen Zustand des Grundwassers (Qualitätszielverordnung Chemie Grundwasser – QZV Chemie GW), ausgegeben am 29. März 2010.

¹⁵ Verordnung des Bundesministers für soziale Sicherheit und Generationen über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch (Trinkwasserverordnung - TWV), BGBl. II Nr. 304/2001

vorliegen. Als Grundlage zur Erstellung der Liste chemotoxischer Bestandteile wurden zudem die im Kapitel 3.3 genannten Unterlagen verwendet.

3.2 Grundwassergefährdende Stoffe - Stofffamilien und Stoffgruppen

Im Hinblick auf den Schutz des Grundwassers gegen Verschmutzung durch bestimmte gefährliche Stoffe wurden diese Stoffe den Anlagen 2 und 3 der Qualitätszielverordnung Chemie Grundwasser – QZV Chemie GW zugeordnet.

3.2.1 Liste I der Stofffamilien und Stoffgruppen

Die Liste I umfasst entsprechend der Anlage 2 der QZV Chemie GW die einzelnen Stoffe der nachstehend aufgeführten Stofffamilien und -gruppen mit Ausnahme der Stoffe, die auf Grund 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 und Zubereitungen oder deren Abbauprodukte, deren karzinogene oder mutagene Eigenschaften bzw. steroidogene, thyreoide, reproduktive oder andere Funktionen des endokrinen Systems beeinträchtigenden Eigenschaften im oder durch das Wasser erwiesen sind;
5. Mineralöle und Kohlenwasserstoffe
6. Zyanide
7. Quecksilber und Quecksilberverbindungen
8. Cadmium und Cadmiumverbindungen

3.2.2 Liste II der Stofffamilien und Stoffgruppen

Die Liste II umfasst entsprechend der Anlage 3 der QZV Chemie GW 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 Pflanzenschutzmittel sowie davon abgeleitete Verbindungen, die nicht in der Liste I enthalten sind
3. Stoffe, die eine für den Geschmack und/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. Stoffe, die zur Eutrophierung beitragen (Stickstoff- und Phosphorverbindungen, die nicht in Tabelle 1 enthalten sind);
8. Schwebstoffe;
9. Stoffe mit nachhaltigem Einfluss auf die Sauerstoffbilanz (und die anhand von Parametern wie BSB, CSB usw. gemessen werden können).

Zusätzlich zur Anlage 3 der QZV Chemie GW werden hier auch

10. Ammoniak und Nitrite

in die Liste aufgenommen.

3.3 Chemotoxische Stoffe

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

Aufgenommen in die Liste chemotoxischer Stoffe werden 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:

- REACH Verordnung (insbesondere Anhang XVII)¹⁶
- Richtlinie 80/68/EWG des Rates vom 17. Dezember 1979 über den Schutz des Grundwassers gegen Verschmutzung durch bestimmte gefährliche Stoffe¹⁷
- Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik¹⁸
- 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“¹⁹
- Liste der kanzerogenen Stoffe der "International Agency for Research on Cancer" (IARC)²⁰
- Verordnung des Bundesministers für soziale Sicherheit und Generationen über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch (Trinkwasserverordnung - TWV)

¹⁶ Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 18. Dezember 2006 zur Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe (REACH), zur Schaffung einer Europäischen Chemikalienagentur, zur Änderung der Richtlinie 1999/45/EG und zur Aufhebung der Verordnung (EWG) Nr. 793/93 des Rates, der Verordnung (EG) Nr. 1488/94 der Kommission, der Richtlinie 76/769/EWG des Rates sowie der Richtlinien 91/155/EWG, 93/67/EWG, 93/105/EG und 2000/21/EG der Kommission; (02006R1907-20241010)

¹⁷ RICHTLINIE DES RATES vom 17. Dezember 1979 über den Schutz des Grundwassers gegen Verschmutzung durch bestimmte gefährliche Stoffe (80/68/EWG), *Amtsblatt Nr. L 020 vom 26/01/1980 S. 0043 – 0048; (31980L0068); aufgehoben durch 300L0060*

¹⁸ Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik, *Amtsblatt Nr. L 327 vom 22/12/2000 S. 0001 – 0073 (300L0060)*

¹⁹ United Nations, Department of Economic and Social Affairs: Products whose consumption and/ or sale have been banned, withdrawn, severely restricted or not approved by governments”, Fifteenth Issue, Chemicals, New York, 2009

²⁰ International Agency for Research on Cancer: IARC Monographs on the Identification of Carcinogenic Hazards to Humans, Agents Classified by the IARC Monographs, Volumes 1–136

- Österreichisches Lebensmittelbuch (Codex Alimentarius Austriacus) / B1 / Trinkwasser²¹
- WHO „Guidelines for drinking-water quality: fourth edition incorporating the first and second addenda“²²
- Abfallwirtschaftsgesetz 2002 – AWG 2002²³
- NÖ Klärschlammverordnung²⁴

3.3.1 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,

²¹ Bundesministerium für Soziales, Gesundheit, Pflege und Konsumentenschutz: Österreichisches Lebensmittelbuch, IV. Auflage, Codexkapitel / B1 / Trinkwasser, Veröffentlicht mit der Geschäftszahl BMGFJ-75210/0009-IV/B/7/2007 vom 15.6.2007

²² World Health Organization „Guidelines for drinking-water quality: fourth edition incorporating the first and second addenda“, Geneva: World Health Organization; 2022

²³ Bundesgesetz über eine nachhaltige Abfallwirtschaft (Abfallwirtschaftsgesetz 2002 – AWG 2002), BGBl I Nr. 102/2002

²⁴ NÖ Klärschlammverordnung, StF: LGBl. 6160/2-0, Stand der Gesetzgebung: 25.09.2017

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.

3.3.2 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.

3.4 Materialien, Komponenten und Elemente im österreichischen Gesamtinventar (NES)

3.4.1 Konditionierung und Konditionierungsarten

Die Nuclear Engineering Seibersdorf GmbH (NES) deckt den gesamten, bisher in Österreich erschlossenen Bereich des Managements radioaktiver Abfälle ab – von der Abholung beim Abfallverursacher über die Bearbeitung und Konditionierung bis zur Transferlagerung (Zwischenlagerung). In diesem Zusammenhang bedeutet Konditionierung, die Abfälle in eine chemisch und physikalisch stabile Form zu überführen und in ein Gebinde (in der Regel 200-Liter-Fässer) einzuschließen. Dadurch wird eine sichere Zwischenlagerung über lange Zeiträume gewährleistet und eine spätere Endlagerung ermöglicht.

Bereits bei der Annahme der Abfälle müssen Übernahmebestimmungen eingehalten werden, wie sie auf der Website der NES einsehbar sind. Bei der Übernahme der Abfälle in die Anlagen der NES erfolgen erste Charakterisierungen des eingehenden Abfalls (z.B. Kontrollmessungen an den Gebinden, Beprobung von flüssigen Abfällen, ...) und es erfolgt die Aufnahme in die Abfalldatenbank der NES. Nach erfolgter Sortierung werden die entsprechenden Konditionierungsschritte eingeleitet (siehe auch Abbildung 1).

Größere, sperrige Abfälle wie beispielsweise kontaminierte Anlagen- oder Gebäudeteile, müssen vor der eigentlichen Konditionierung zerlegt und zerkleinert werden. Um das Volumen der radioaktiven Abfälle zu minimieren, wird versucht, kontaminierte Teile, Gegenstände oder Materialien so weit wie möglich zu dekontaminieren, um sie nach Freimessung wieder in den konventionellen Stoffkreislauf überführen zu können. Hilfreich ist auch, dass Metalle bei externen Firmen eingeschmolzen werden können. Lediglich die danach radioaktiv angereicherte Schlacke muss fachgerecht entsorgt, sprich endgelagert, werden. Bei der NES direkt wird in der Regel brennbares Material der Verbrennungsanlage zugeführt und nicht brennbares unter Hochdruck verpresst.

In der Verbrennungsanlage werden alle brennbaren festen und flüssigen radioaktiven Abfälle verascht (überdies können auch nicht brennbare Flüssigkeiten verdampft werden). Die Radioaktivität wird dabei in der Asche aufkonzentriert, die dann weiter konditioniert wird (z.B. Einschweißen in Edelstahlkartuschen). Die Abluft wird über ein mehrstufiges Verfahren gereinigt. Geringere Anteile finden sich daher im Wasser des Rauchgaswäschers und auch in den Abluftfiltern. Auch diese werden in den Anlagen der NES weiterbearbeitet und konditioniert.

Nicht brennbare Abfälle werden mit einer Hochdruckpresse (1.500 t Presskraft) zu Pellets verdichtet. Dafür wird der Abfall in Presskartuschen aus dünnwandigem Stahlblech eingebracht, die in der Hochdruckpresse kompaktiert werden. Durch die Verpressung wird neben der Volumenreduktion auch eine Immobilisierung und Fixierung des Abfalls erreicht und es entsteht ein mechanisch extrem stabiles und widerstandsfähiges Produkt. In der Regel können etwa 3-4 Pellets in ein 200-Liter-Fass eingebracht werden.

Ausgediente umschlossene radioaktive Stoffe (Strahlenquellen), die nicht an den Hersteller rückgeführt werden konnten, werden im Quellenbearbeitungszentrum der NES aus ihrem Schutz- bzw. Arbeitsbehälter ausgebaut, dokumentiert, nuklidspezifisch sortiert und je nach Radionuklid und Aktivität weiter aufgearbeitet/konditioniert. Typischerweise werden diese dann in einem 200-Liter-Fass gesammelt.

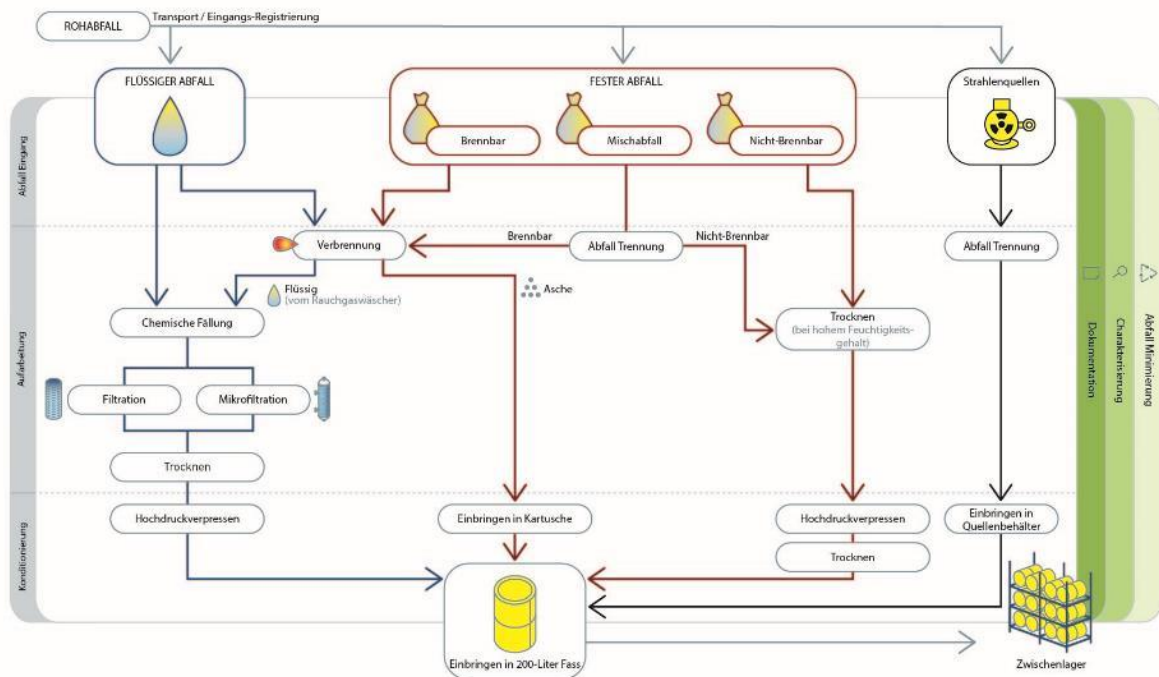


Abbildung 1: Materialflussdiagramm der NES (©NES)

In Fällen, wo ein Verbrennen oder Verpressen der Abfälle nicht möglich ist, kann zur Einbettung des Materials in eine feste Matrix eine Zementierung erfolgen. Die radioaktiven Abfälle werden dabei im Beton homogen verteilt und in ein 200 Liter-Fass eingebracht.

Bei den Tätigkeiten der NES sowie in weiteren Anlagen am Standort Seibersdorf, in denen mit radioaktiven Stoffen umgegangen wird, fallen radioaktiv kontaminierte Abwässer an. Diese werden in eigenen Leitungssträngen gesammelt und der Wasserreinigungsanlage der NES zugeführt. Dort erfolgt die Reinigung überwiegend durch Filtration, bei Bedarf unter Einsatz geeigneter Chemikalien für die Dekontaminierung. Der dabei entstehende radioaktive Schlamm wird weiterverarbeitet, in der Regel getrocknet und unter Hochdruck verpresst. Das gereinigte Abwasser wird nach einer abschließenden Freimessung in einen Vorfluter oder die öffentliche Kläranlage eingeleitet.

In der Regel werden Abfallfässer abschließend vor dem Verbringen ins Transferlager der NES in der Einzelfass- oder 32-Fass-Trocknungsanlage getrocknet. Dadurch werden die Abfälle auch chemisch stabilisiert, wodurch das Risiko von im Abfallfass entstehenden chemischen

Reaktionen, weiterführend auch Korrosion, während der Zwischenlagerung weitestgehend minimiert wird.

Am Ende des Konditionierungsprozesses liegen die radioaktiven Abfälle in stabiler Form in einem 200-Liter-Fass vor. Diese sind für eine längerfristige Zwischenlagerung, den Transport gemäß den Gefahrgutbeförderungsbestimmungen und nach heutigem Stand der Technik auch für eine spätere Endlagerung geeignet

Im Rahmen des Zukunftskonzeptes modernisierte NES ab 2009 die Entsorgungs- und Lagereinrichtungen – diese Modernisierung ist abgeschlossen. Ein zentraler Bestandteil ist die Nach- und Rekonditionierung, bei der alte Abfallgebinde neu aufbereitet und moderne Behandlungsmethoden angewandt werden. Dies verbessert nicht nur die Sicherheit, sondern reduziert auch das Abfallvolumen durch Verwendung der neuen Behandlungsanlagen erheblich. Dabei werden historische Abfälle aus alten Fässern entnommen, neu verpackt oder durch Verfahren wie Verbrennung und Hochdruckverpressung weiterverarbeitet. Anzumerken ist auch, dass die Radioaktivität des – teils seit Jahrzehnten – gelagerten Abfalls in vielen Fällen schon abgeklungen ist, was eine weitere Reduktion durch die Freigabe als nicht radioaktiver Abfall eröffnet.

Bereits seit den 1970er-Jahren werden radioaktive Abfälle im Forschungszentrum Seibersdorf gesammelt und aufgearbeitet. Viele der älteren Abfallgebinde entsprechen nicht mehr den heutigen internationalen Standards, einige weisen Korrosionsschäden, die auf eine äußere Korrosion hinweisen, auf, und oft fehlt eine lückenlose Dokumentation. Das Re- und Nachkonditionierungsprojekt der NES ist aber nicht nur aus Sicherheitsgründen essenziell für die Zwischen- und Endlagerung radioaktiver Abfälle, sondern auch aus technischer, finanzieller und rechtlicher Sicht: Abfallvolumen soll reduziert werden, Abfälle sollten definierte Akzeptanzkriterien erfüllen, die Lagerung soll den aktuellen Erdbeben- und Brandschutzbestimmungen entsprechen, und außerdem sollen sowohl Abfälle als auch Lagerhallen für eine verlängerte Zwischenlagerung geeignet sein.

Im Rahmen des Re- bzw. Nachkonditionierungsprojekts werden Fässer, die nach früheren Standards behandelt wurden, überprüft und nach heutigem Stand der Technik neu konditioniert. Die betroffenen Fässer werden kontrolliert (u.a. auf Oberflächenkontamination), aus den derzeitigen Lagerhallen ausgelagert und in Chargen für die weitere Aufarbeitung (die Re- bzw. Nachkonditionierung) nach dem Stand der Technik eingeteilt. Zusätzlich werden die in den Fässern befindlichen Abfälle radiologisch charakterisiert und die Eigenschaften jedes Fasses dokumentiert. Nach Abschluss der Re- und Nachkonditionierung werden die aufgearbeiteten Fässer in die neuen Zwischenlagerhallen (Transferlagerhallen) der NES eingelagert.

Zum Zeitpunkt des Beginns der Umsetzung der Kampagne zur neuerlichen Konditionierung im Jahr 2009 lagerten ca. 10.000 historische Fässer mit radioaktiven Abfällen im Zwischenlager. Das Re- und Nachkonditionierungsprojekt wurde in drei Phasen unterteilt:

1) Bereits verpresste Pellets: Diese werden einfach in ein neues, technisch aktuelles 200-Liter-Fass überführt, getrocknet und einer Gamma-spektrometrischen Messung unterzogen.

2) Homogen zementierte Abfälle: Hier wird das Fass zuerst in der Fasszerlegeanlage entmantelt und der Betonzylinder abgefräst. Der entstandene Zementblock wird in einem zweiten Schritt in ein neues Fass eingestellt. Der entstandene Frässtaub wird radiologisch und chemisch untersucht und der resultierende Betonzylinder Gamma-spektrometrisch gemessen.

3) Inhomogen zementierte Abfälle: Ähnlich wie bei homogen zementierten Abfallfässern wird zunächst die äußere Fassschale und zusätzlich auch die inaktive, das 100-Liter Fass einhüllende, Betonschale entfernt, um jenes 100-Liter-Innenfass freizulegen. In dieses Innenfass wird anschließend ein Fenster (ca. 10x10cm) geschnitten, um den Inhalt kontrollieren sowie dokumentieren zu können, und einer entsprechenden Konditionierung (typischerweise Verbrennung oder Hochdruckverpressung) zuzuführen.

3.4.2 Stoffliche Beschreibung der konditionierten Abfälle

Um eine lückenlose Dokumentation sicherzustellen, werden alle Informationen in einer bei der NES erstellten Datenbank erfasst. DOKURAD (Dokumentation radioaktiver Abfälle) ist eine selbst entwickelte Softwarelösung zur Erfassung, Verwaltung und Dokumentation von radioaktiven Abfällen. Mit der Einführung von DOKURAD 2.0 wurde das System so weiterentwickelt, dass mehrere Nutzer gleichzeitig darauf zugreifen können. Dafür wird eine zentrale Datenbank (SQL-Server) genutzt, auf der alle Informationen gespeichert werden. Die Nutzer greifen über spezielle Programme, beispielsweise Microsoft Access 365, auf die Daten zu. Zusätzlich steht ein separater Speicherort (ein Fileserver) zur Verfügung, auf dem Dokumente, wie Protokolle und Fotos, zur weiteren Verarbeitung und Nachverfolgbarkeit abgelegt werden.

Um eine strukturierte und spezialisierte Datenhaltung zu gewährleisten, wurden innerhalb von DOKURAD mehrere Datenbanken implementiert, darunter:

- Kundendatenbank zur Verwaltung von Kundeninformationen
- Transportdatenbank für die Dokumentation der Abfalltransporte

- Behandlungs- und Konditionierungsdatenbank zur Erfassung der Prozessschritte der Abfallbehandlung
- Lagerdatenbank zur Bestandsführung von radioaktiven Abfällen
- Messdatenbank zur Speicherung und Analyse von Messwerten
- Prozessmanagement-Datenbank zur Steuerung und Überwachung der gesamten Abfallverarbeitung

Die Dokumentation von stofflichen Informationen zu radioaktiven Abfällen gegenüber der radiologischen Dokumentation galt weltweit lange als zweitrangig, weshalb stoffliche Fragen erst in den letzten zwei Jahrzehnten immer mehr beachtet werden. Zumeist handelt es sich auch um inhomogene Abfälle, was – ganz besonders bei historischen Abfällen – eine Herausforderung für die Repräsentativität der Probenahme schafft, z.B. können Fässer mit Glasabfällen auch Kunststoff- oder Metallteile in geringen Mengen beinhalten (als Referenz siehe Abbildung 2). Sowohl für Beprobung als auch für die nachfolgenden Behandlungsschritte gilt, die wünschenswerte stoffliche Dokumentation mit dem für das Personal bei der Handhabung und Bearbeitung verbundenen Risiko immer abzuwägen.



Abbildung 2: Beispiele von inhomogen zementierten Abfallfässern (links: Mischung aus Glas, Kunststoffe, Spritzen, Kanülen; rechts: Metalle Glasflaschen, Kabel, Kunststoffe, Sand), anhand derer die Schwierigkeit einer repräsentativen und v.a. risikofreien Probenahme ersichtlich ist.

Weitere Beispiele in Abbildung 3 zeigen, dass manche inhomogen zementierten (IZ) Fässer doch auch sehr homogenen Inhalt aufweisen können (z.B. wie hier Beton, aber auch ausschließlich Kunststoffe, Metalle, Holz, etc.). Außerdem wird ein entmanteltes homogen zementiertes (HZ) Fass dargestellt.



Abbildung 3: links: Beispiel eines IZ-Fasses ausschließlich mit Betonbruch gefüllt; rechts: Beispiel eines HZ-Innenfasses.

Die Klassifizierung radioaktiver Abfälle hat sich im Laufe der Zeit weiterentwickelt. Ursprünglich erfolgte eine allgemeine Einteilung in **Abfallkategorien**, die nach Aggregatzustand und zwischen brennbaren und nicht brennbaren Abfällen oder umschlossenen radioaktiven Stoffen (Quellen) unterschied (siehe Tabelle 1). Seit 2012 wurde die Systematik durch eine detailliertere Klassifizierung nach spezifischen **Abfalltypen** (Tabelle 2) ergänzt, um die stoffliche Beschreibung zu verbessern. Neben der strukturierten Erfassung dieser Abfalltypen sind chemische Gutachten in Form von PDF-Dateien mit den jeweiligen Abfällen verknüpft, um eine umfassende Dokumentation zu gewährleisten. Die chemischen Gutachten sind an Material durchgeführt worden, das im Zuge von Dekommissionierungsprojekten einer Freigabe zugeführt wurde. In einem zweiten Schritt wurden und werden die so entstandenen Gutachten mit den radioaktiven Abfällen der gleichen Herkunft verknüpft.

Tabelle 1: Die bis 2012 verwendeten Abfallkategorien der NES.

Kurzbezeichnung	Abfallkategorie
SB	fest brennbar
SN	fest nicht-brennbar
ZU	LSC-Fläschchen
LB	flüssig brennbar
LN	flüssig nicht-brennbar
BA	organische Abfälle
QU	Quellen
FI	Filter
RM	Rauchmelder
ASB	brennbarer, sehr kurzlebiger Abfall ($t_{1/2} < 100$ d)

Tabelle 2: Seit 2012 erfolgt die stoffliche Beschreibung bei der NES nach diesen Abfalltypen.

Abfalltypen		
Asche ¹⁾	Graphit	Nicht brennbarer Laborabfall
Asphalt	Kabel	Quellen
Bauschutt ²⁾	Keramik	Schamott
Beton	Kunststoff (nicht brennbar) ⁴⁾	Schlacke
Bitumen	Metall Aluminium	Schlamm
Elektroschrott	Metall Blei	Schotter/Sand
Erde	Metall Eisen ⁵⁾	Schrott
Filter	Metall verzinkt ⁵⁾	Sonstiges nicht brennbar
Filterzubehör ³⁾	Metall sonstige	Staub ⁷⁾
Glas	Mineralwolle ⁶⁾	Ziegel

¹⁾ Falls es sich um Flugasche bzw. Asche-Filterkerzen handelt, ist dies anzugeben.

²⁾ Asbesthaltige Baumaterialien müssen gesondert beschrieben werden.

³⁾ Hier ist ausschließlich Zubehör der Kategorie „Fest nicht Brennbar“ gemeint, z.B. Metallrahmen. Falls die Metallart bekannt ist, ist diese zu spezifizieren.

⁴⁾ Hierbei handelt es sich hauptsächlich um PVC, aber auch Gummi (die Art ist jedenfalls zu spezifizieren).

⁵⁾ Falls bekannt, ist zu spezifizieren, ob es sich um Eisen oder Stahl handelt.

⁶⁾ Falls bekannt, ist zu spezifizieren, um welche Art es sich handelt.

⁷⁾ Staubsaugersäcke und Kehricht fallen unter diesen Abfalltyp.

Diese Abfalltypen sind zusätzlich mit Angaben von Massenteilen (in Kilogramm) verknüpft. Ebenfalls verknüpft werden alle zur Verfügung stehenden Analysen zu den jeweiligen Abfällen. Hierbei sei angemerkt, dass radioaktive Abfälle aufgrund fehlender strahlenschutzrechtlicher Bewilligungen nicht zur Charakterisierung in externen Laboratorien geeignet sind. Für radioaktive Abfälle erfolgt die Charakterisierung in den Labors der NES. Chemische Gutachten für freigabefähiges, d.h. nicht radioaktiv kontaminiertes Material können hingegen von externen Labors durchgeführt werden.

Chemische Gutachten werden für alle Chargen aus Dekommissionierungsprojekten erstellt, für die – für einen Teil des anfallenden Materials – eine Freigabe und spätere Deponierung auf einer konventionellen Deponie vorgesehen sind. Daher wird gemäß Deponieverordnung beprobt (siehe hier auch Kapitel 2.1

Seit 2022 bietet DOKURAD erweiterte Funktionen zur Materialbeschreibung. Eine bedeutende Neuerung ist die Integration von Abfallfotos in Materialflussapplikationen, wodurch die visuelle Nachverfolgbarkeit verbessert wird. Zudem wurde die Möglichkeit geschaffen,

chemische Charakterisierungsdaten direkt in der Datenbank zu speichern. Während zuvor die Speicherung dieser Daten nur über PDF-Verlinkungen oder XML-Dateien möglich war, können sie nun strukturiert und durchsuchbar in DOKURAD hinterlegt werden.

Im Zuge des oben bereits ausführlich beschriebenen Re- und Nachkonditionierungsprojektes kann auch der Fassinhalt neu bewertet und gegebenenfalls können Proben genommen und charakterisiert werden. Bei den homogen zementierten Abfallfässern werden vorrangig Frässtaubproben untersucht. Diese entstehen beim Abfräsen der homogenen zylindrischen Betonabfallmatrix, wobei ein Fräsmodul verwendet wird, um den Durchmesser so zu reduzieren, dass es ins neue, dem Stand der Technik entsprechenden, 200-Liter-Fass passt.

Ganz besonders bei inhomogen zementierten Abfällen erfolgt eine aufwendigere Verarbeitung und Dokumentation. Im 100-Liter-Innenfass wird ein, meist ca. 10x10 cm, Fenster in die Fassschale geschnitten, um den Inhalt zu analysieren. Sofern das Material nicht direkt zugeordnet werden kann, werden auch Proben gezogen und im Labor analysiert. Sowohl Probe als auch Fassinhalt (dem geöffneten Fenster) werden fotografisch dokumentiert. Unter einem Mehraugenprinzip wird der Inhalt der inhomogen zementierten Fässer anhand der Fotos bewertet und für jedes Fass die weiteren Schritte – zumeist Beprobung, Hochdruckverpressung oder Verbrennung – festgelegt.

Der Materialfluss beinhaltet den gesamten Entsorgungsweg: vom Entstehen des Abfalls beim Verursacher über die Anlieferung bei der NES als Entsorger, die dortige Behandlung und Konditionierung bis zur Zwischenlagerung, und schlussendlich auch Transport und Einlagerung in ein Endlager (letzteres ist noch nicht angelaufen). Zur besseren Nachverfolgung besitzt jedes Eingangs- und Zwischengebinde ebenso wie jedes fertig konditionierte Abfallfass eine eindeutige Nummer bzw. einen QR-Code, die über DOKURAD nachweisbar sind. Damit können jederzeit alle Informationen und Daten im System abgerufen werden. Es ist möglich, einerseits ausgehend vom Eingangsgebinde den gesamten Konditionierprozess bis zum fertigen, eingelagerten Fass nachzuvollziehen und andererseits den Weg der Abfälle vom fertigen Fass bis zum Eingangsgebinde und Abfallverursacher zurückzuverfolgen.

3.4.3 Von stofflicher Beschreibung zu chemischen Daten

Die stoffliche Beschreibung sowie die chemische Charakterisierung radioaktiver Abfälle sind zwei klar voneinander abzugrenzende, aber eng miteinander verknüpfte Aspekte der Abfallbewertung. Beide spielen eine entscheidende Rolle bei der Entwicklung sicherer Behandlungs- und Entsorgungsstrategien.

Die **stoffliche Beschreibung** konzentriert sich auf die physikalischen und materiellen Eigenschaften der radioaktiven Abfälle. Dazu gehören Angaben zum Aggregatzustand (fest, flüssig oder gasförmig), zu Materialarten (z.B. Metalle, Kunststoffe, Beton) sowie zur Abfallmenge. Dies sind wesentliche Informationen für Dokumentation und Logistik der Abfallbehandlung.

Die **chemische Charakterisierung** hingegen erfasst die detaillierte chemische Zusammensetzung der Abfälle. Dabei werden chemische Elemente und Verbindungen bestimmt, die Reaktivität der Stoffe untersucht (z.B. Korrosionsverhalten) sowie eine Löslichkeitsbewertung vorgenommen. Letztere sind insbesondere für die Langzeitsicherheit in einem Endlager von hoher Bedeutung.

Ein entscheidendes Instrument zur Verknüpfung dieser beiden Bereiche sind Stoffvektoren, die als Brücke zwischen stofflichen und chemischen Daten dienen. Sie ermöglichen eine systematische Überführung der physikalischen Merkmale in chemische Kenngrößen. Ein Beispiel hierfür sind kontaminierte Metallteile aus der Dekommissionierung: Während die stoffliche Beschreibung angibt, dass es sich um feste metallische Abfälle handelt, liefert die chemische Charakterisierung Informationen über enthaltene Elemente wie Eisen, Aluminium oder radioaktive Isotope. Stoffvektoren sind somit ein entscheidendes Instrument für eine wissenschaftlich fundierte und sicherheitsorientierte Handhabung radioaktiver Abfälle.

Die Daten hierfür stammen sowohl aus historischen als auch aktuellen Quellen. Altdaten (siehe Beschreibung oben zu Abfalltyp/-kategorie) werden laufend aktualisiert, bei Dekontaminationsprojekten werden chemische Gutachten erstellt, aufgrund des Re- und Nachkonditionierungsprojekts sind Proben vorhanden (Stichproben aus IZ-Fässern, Frässtaub von HZ-Fässern). Zukünftig sollen zusätzlich Vor-Ort bei der Rekonditionierung mittels handgehaltenem Röntgenfluoreszenzspektrometer (RFA) chemische Elemente ermittelt werden, um die Dokumentation weiter zu verbessern und rascher als bei der herkömmlichen Beprobung Entscheidungen zur weiteren Bearbeitung treffen zu können.

Analytische Verfahren

Analytische Methoden zur Bestimmung der stofflichen Zusammensetzung von beprobtem Material werden in zerstörungsfreie und zerstörende Verfahren eingeteilt. Bei zerstörungsfreien Verfahren wird die chemische Struktur des Stoffes erhalten und bei zerstörenden Verfahren verändert. Diese Veränderung kann beispielsweise durch Lösen des Stoffes in einem Lösungsmittel geschehen oder durch Überführen des Stoffes in die Gasphase mittels Verbrennung. Ziel dieses Vorgehens ist es, den relevanten Stoffbestandteil (z. B. ein chemisches Element) in eine chemische Form zu bringen, die mit einem geeigneten

Analyseverfahren erfasst werden kann. Dazu zählen alle Methoden der klassischen analytischen Chemie, wie z. B. die Titration, aber auch Methoden der neueren instrumentellen Analytik, wie z. B. die Atomabsorptions- und Emissionsspektrometrie.

In der modernen chemischen Analytik geht der Trend jedoch immer mehr zu zerstörungsfreien Verfahren. Diese Verfahren haben den großen Vorteil, dass die chemische Struktur der Probe erhalten bleibt und dass somit auch Informationen über die chemische Struktur des Stoffes gewonnen werden können. Meist sind solche Verfahren auch mit einer enormen Zeitersparnis im Analyseablauf verbunden, jedoch sind sie apparativ aufwendig und erfordern vom Anwender eine große Sachkenntnis und viel Erfahrung.

Standardmäßig werden bei der NES als zerstörende Analyseverfahren die Elementaranalyse und die optische Atomemissionsspektrometrie angewandt. Bei der Elementaranalyse wird der Stoff verbrannt und aus den Verbrennungsgasen Kohlenstoff und Schwefel bestimmt. Weiters kann durch Zersetzung der Probe mit Säure der Anteil an Carbonat bestimmt werden. Bei der optischen Atomemissionsspektrometrie wird der Stoff zunächst in Wasser gelöst bzw. durch Aufschluss in Lösung gebracht und anschließend mittels eines Argon-Plasmas verdampft. Dabei werden die sich in Lösung befindlichen Metallionen zur Emission einer charakteristischen elektromagnetischen Strahlung angeregt, welche optisch detektiert wird. Aus dem Messsignal kann dann die Konzentration der Metallionen berechnet werden.

Als zerstörungsfreies Analyseverfahren wird bei der NES gegenwärtig nur die Röntgenfluoreszenzanalyse eingesetzt. Dieses Verfahren ist eigentlich ein Verfahren der Elementaranalyse, bei dem chemische Elemente durch Röntgenstrahlung zur Fluoreszenz angeregt werden, und ist auch nur bedingt zerstörungsfrei. Für eine Quantifizierung in guter Qualität ist eine Probenvorbehandlung notwendig, entweder Vermischen mit einem Bindemittel und Pressen zu einer Tablette oder Schmelzen mit Lithiumborat unter Ausbildung eines Glases. Strukturinformationen über den Stoff werden mit diesem Verfahren nicht erhalten, dafür können aber viele chemische Elemente gleichzeitig analysiert werden. Um jedoch Strukturinformationen zu erhalten, das heißt Informationen, wie die chemischen Elemente gebunden sind und welche chemischen Verbindungen überhaupt vorliegen, wären ergänzende Analyseverfahren notwendig, so könnte man z. B. Versuche mit Röntgendiffraktometrie machen, bei der chemische Verbindungen über deren Kristallstruktur bestimmt werden können. Erst die Kenntnis der chemischen Verbindungen charakterisiert einen Stoff vollständig.

Beprobung von Abfallstoffen

Proben von Abfallstoffen können aus unterschiedlichen Prozessen stammen. Hier sollen jedoch nur solche betrachtet werden, die bereits im konditionierten Zustand vorliegen und somit endlagerrelevant sind. Diese Proben können aus der Rekonditionierung der inhomogen oder homogen zementierten Fässer stammen. Homogen zementierte Fässer wurden in der Vergangenheit mit Asche aus der Verbrennungsanlage, Schlamm aus der Abwasserbehandlung und einigen flüssigen Abfällen sowie Salzen hergestellt. Durch den Mischprozess wurde ein homogenes Produkt hergestellt, sodass der im Zuge der Rekonditionierung gewonnene Frässtaub eine repräsentative Probe darstellt.

Schwieriger ist die Probenahme von inhomogen zementierten Fässern, denn darin liegen meist mehrere Abfallsorten vermischt vor (wie bereits in Abbildung 2 ersichtlich). In dem Fall kann die Probenahme nur von einer Abfallsorte erfolgen, die auch als solche analysiert wird. Typische Bestandteile sind Bauschutt, Erde, Gläser, Kunststoffe etc. Meist ist eine Vorcharakterisierung dieser Abfälle durch Sichtung möglich. Die genaue chemische Zusammensetzung kann jedoch nur eine chemische Analyse bringen.

3.4.4 Chargen

Seit 2022 können bei größeren Abfallmengen (z.B. Aushubmaterial) Chargen in DOKURAD angelegt werden. Dies ermöglicht eine einfachere Zuweisung der stofflichen Beschreibung. Dabei können für jede Charge spezifische stoffliche Daten hinterlegt werden, die mit chemischen Gutachten verknüpft sind. Hier werden nicht nur chemische Analysen nach Elementgehalt durchgeführt, sondern z.B. auch pH-Wert oder Kohlenstoffanteil (TOC) bestimmt.

Umgekehrt können Abfälle auch den bereits definierten Chargen zugeordnet werden. Die Einteilung in Chargen geschieht üblicherweise nach

- chemischen Gutachten für die Freigabe von Material aus Dekommissionierungsprojekten,
- homogen zementierten Fässern (HZ), wenn radioaktives Material in der gleichen Zementmatrix verarbeitet, jedoch in mehreren Fässern abgefüllt wurde, und
- Abfalltypen (z.B. Metalle für Einschmelzkampagnen).

Eine weitere Möglichkeit die Abfälle zuzuordnen bezieht sich auf die Phasen des Nach- und Rekonditionierungsprojektes. Die Aufteilung nach Gebinden ermöglicht zugleich auch eine Zuweisung zur stofflichen Beschreibung (siehe hierfür auch **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Bei der NES werden dabei die Abfallgebinde grundsätzlich in drei Arten unterschieden, und zwar in

- homogen zementierte (HZ) Abfälle wie Schlämme und Aschen,
- inhomogen zementierte (IZ) Abfälle, welche sehr unterschiedliche Materialien wie Glas, Metall aber auch brennbare Anteile enthalten können, und
- Pellets, also verpresste Abfälle.

Die stoffliche Beschreibung der Pellets aus den Altabfällen entspricht der bereits existierenden Dokumentation, die vor der Pressung vorlag und noch vorhanden ist. Eine neuerliche Zuordnung oder Charakterisierung ist aufgrund der eingesetzten Presskraft oft nicht mehr einfach möglich.

Bei homogen zementierten Abfallfässern können anhand der Frässtaubproben repräsentative Analysen durchgeführt werden und bei übereinstimmenden Analyseergebnissen Chargen gebildet werden. Die Schlämme entstehen bei der Filtrierung (Filterschlamm) oder stammen aus den Auffangbecken. Manchmal wurde auch Harz als Abfall beigemischt. Die Asche stammt aus der Verbrennungsanlage. Uran- und Thoriumsalze wurden ebenfalls homogenisiert zementiert.

Bei inhomogen zementierten Abfällen erfolgt die stoffliche Beschreibung anhand der Fotodokumentation, wobei zusätzlich Stichproben genommen werden. Die stoffliche Charakterisierung ist hier häufig schon aufwendiger, da neben Probenahme und Charakterisierung auch die erforderlichen Konditionierungsschritte definiert und durchgeführt werden müssen. Der Inhalt der IZ-Fässer kann sehr unterschiedlich sein, z.B. Baumaterialien, Glas, Erde, u.v.m.

Zusätzlich wurde die Bezeichnung Varia für sogenannte variable Fässer eingeführt. Bei diesen bereits bestehenden Fässern handelt es sich typischerweise um HZ-, IZ- oder Pellet-Fässer. Die genaue Zuordnung kann jedoch erst aufgrund der Nach- bzw. Rekonditionierung erfolgen.

Hinzu kommen neu zu konditionierende Abfälle, die noch heutzutage aus Medizin, Industrie, Forschung (MIF-Abfälle) und Dekommissionierungsarbeiten anfallen und bei der NES fachgerecht entsorgt werden. Je nach Abfallkategorie (brennbar oder nicht brennbar nach Tabelle 1) erfolgt die Konditionierung und Einteilung der Gebindeart (HZ, IZ, Pellets).

In Abbildung 4 sind diese Informationen zusammengefasst dargestellt.

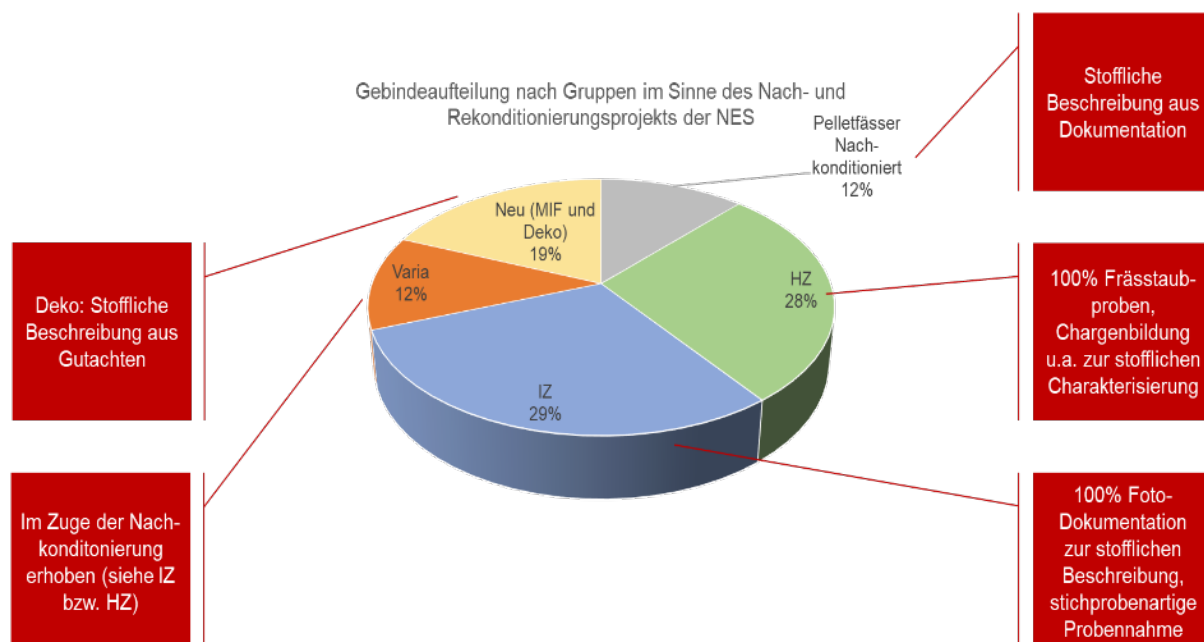


Abbildung 4: Aufteilung der Gebinde in Chargen sowie hinsichtlich ihrer Konditionierungsart sowie Beschreibung der stofflichen Informationen.

Die Bezeichnung „Neu“ beinhaltet Abfälle aus Medizin, Industrie und Forschung (MIF) sowie aus der Dekommissionierung (Deko). Hierbei handelt es sich fast ausschließlich um Pellet-Fässer. Bei den in Abbildung 4 in Grau dargestellten „Pelletfässer Nachkonditioniert“ handelt es sich um ca. 1500 im Zuge der Nachkonditionierung umgehobene Pellet-Fässer. Bei den HZ- und IZ-Fässern wurden mit Stand April 2025 schon viele rekonditioniert, jedoch laufen diese beiden Phasen noch. Gesamtinventar – Gebindeaufteilung und stoffliche Beschreibung

Die Informationen zum Gesamtinventar, hinsichtlich Konditionierungsart und stofflicher Beschreibung der Gebinde, werden – mit fortschreitendem Nach- und Rekonditionierungsprojekt – immer ausführlicher. Mit Stand April 2025 handelt es sich einerseits um neue Abfälle sowie um Abfälle, die schon Nach- und Rekonditioniert wurden als auch um Abfälle, die sich noch in Fässern befinden, die noch nicht Nach- bzw. Rekonditioniert worden sind. In Tabelle 3 sind die Abfalltypen (gemäß Tabelle 2) von ersteren Gebinden dargestellt. Des Weiteren warten auch noch Gebinde auf ihre Bearbeitung im Zuge des Nach- und Rekonditionierungsprojekts. Diese Gebinde sind in Tabelle 4 dargestellt.

Tabelle 3: Abfalltypen von Fässern mit Neuem sowie schon Nach- und Rekonditioniertem Inhalt (Stand April 2025)

Abfalltyp	Anzahl sortenreiner Gebinde [1]	Effektive Anzahl nicht sortenreiner Gebinde [1]	Summe [1]	Anteil [%]
Beton	1810	380	2190	31%
Erde	1070	470	1540	22%
Schlamm	270	280	550	8%
Filter	320	70	390	6%
Glas	210	110	320	5%
Asche	240	0	240	3%
Noch nicht zugeordnet	130	90	220	3%
Bauschutt	130	90	220	3%
Schotter/Sand	50	170	220	3%
Mischabfall	110	50	160	2%
Metall Eisen	50	90	140	2%
Sonstiges nicht brennbar	30	90	120	2%
Metall sonstige	20	70	90	1%
Schlacke	20	70	90	1%
Metall Aluminium	20	40	60	1%
Asphalt	10	50	60	1%
Schamott	30	30	60	1%
Staub	10	40	50	1%
Keramik	20	20	40	1%
Nicht brennbarer Laborabfall	10	30	40	1%
Metall Blei	10	30	40	1%
Kunststoff (nicht brennbar)	10	20	30	0%
Bitumen	10	10	20	0%
Sonstiges	10	0	10	0%
Kunststoff	10	0	10	0%
Laborabfall	0	10	10	0%
Graphit	10	0	10	0%
Elektroschrott	0	10	10	0%
Medizinischer Abfall	0	10	10	0%
Ziegel	0	10	10	0%
Summe	4620	2340	6960	100%

Da z.B. Pellet-Fässer Pellets mit unterschiedlichen Abfalltypen beinhalten können, wird hier von „nicht sortenreinen Gebinden“ gesprochen. Für diese Gebinde wurde daher eine „effektive Anzahl“ berechnet. Die Tabelle beinhaltet auch Fässer, die sich derzeit in Bearbeitung befinden (daher gibt es u.a. Gebinde, denen noch kein Abfalltyp zugeordnet worden ist).

Tabelle 4: Beschreibung der noch nicht Nach- und Rekonditionierten Gebinde (Stand April 2025, Fasszahlen gerundet)

Art	Beschreibung	Anmerkung	Fasszahl [1]	Anteil [%]
IZ und Varia	Anlagenteile	Anlagenteile von Anlagen und Einrichtungen am Standort in Seibersdorf aus Dekommissionierung, Dekontamination oder Umbau (u.a. mit ca. 100 Fässer mit Teilen der Ofenausmauerung der Verbrennungsanlage)	300	5%
HZ/IZ/Varia	Asche	Produkt der Verbrennungsanlage	100	2%
IZ	Asphalt, Bauschutt, Beton		100	2%
IZ	Baritsand		300	5%
IZ und Varia	Biologisch	Tierkadaver	<50	0%
IZ und Varia	Diverses	Noch nicht zugeordnete Fässer (d.h. derzeit keine Beschreibung vorhanden) oder Einzelfässer, die keine spezielle Zuordnung zu den genannten Kategorien aufweisen	950	16%
IZ und Varia	Eisen, Erde, Filter	zumeist Anlagenfilter, sowie kontaminierte Eisenteile	200	3%
IZ und Varia	Glas, Harz		<50	1%
Varia	Quellen	z.B. Fässer mit Rauchmeldern	200	3%
IZ	Mit Radium kontaminiertes Material	Zumeist Holz, das im Zuge der Rekonditionierung verbrannt wird	900	16%
IZ und Varia	Abfälle aus den Laborationen der IAEA in Seibersdorf	Sekundärabfälle sowie kontaminiertes Material aus den Handschuhboxen	<50	1%
HZ und Varia	Salze	Homogen zementierte Salze oder Granulat getrockneter Flüssigkeiten	<50	1%
HZ	Schlamm	Einbetonierte Schlämme	2000	32%
IZ	Schlamm	Schlamm als Rohabfall in Fässern einbetoniert	800	13%
	Summe		5800	100%

Es sei nochmals angemerkt, dass es sich hier auch oft um Mischabfälle in den IZ-Fässern handelt. Zusätzlich werden z.B. biologische Abfälle oder organisches Material (wie das mit Radium kontaminierte Holz) im Zuge des Rekonditionierungsprojektes verbrannt werden. Dies wird einerseits zu einer Abfall-Minimierung und andererseits den Abfall auch in Hinblick auf seine chemischen Eigenschaften verbessern. Unter den als „Diverses“ Material kategorisierten Abfallgebinden sind 4 Gebinde inkludiert, deren Inhalt in der Dokumentation als „Toxisch“ markiert wurde. Weiters beinhaltet die Dokumentation von 21, in obiger Tabelle inkludierten Gebinde, die Information, dass sich darin Batterien befinden. In jedem Fall wird im Zuge der Rekonditionierung auf solche Fässer speziell geachtet.

Bezugnehmend auf die vorhergehenden Kapitel, die die (Re-)Konditionierung der (Alt-)Abfälle bei der NES definieren, gestaltet sich eine eindeutige Zuweisung der Abfallbestandteile in der Praxis oft als herausfordernd. Dies liegt unter anderem an den bereits beschriebenen Schwierigkeiten, die bei einer repräsentativen Probenahme beginnen und sich durch den erforderlichen Zeitaufwand für chemische Analysen fortsetzen. Eine präzise Identifikation ist jedoch essenziell für eine sichere und nachhaltige Abfallentsorgung. Um diesem Anspruch gerecht zu werden, wird eine möglichst detailreiche Datenaufbereitung mittels Mehraugenprinzip verfolgt. Dies geschieht durch eine umfassende fotografische Dokumentation sowie die gezielte Überleitung von Stoffvektoren. Künftig sollen weiterführende Analysemethoden, wie der Einsatz handgehaltener Röntgenfluoreszenzanalysegeräte (RFA), die Genauigkeit und Effizienz der Klassifizierung weiter verbessern. Auch der Einsatz von künstlicher Intelligenz und von bisher nicht verwendeten Analysemethoden könnte für die Unterstützung bzw. Optimierung von Charakterisierung und Klassifizierung radioaktiver Abfälle besonders interessant sein.

Die Erhebung und Aufbereitung relevanter Informationen ist ein wichtiger Bestandteil der sicheren Entsorgung radioaktiver Abfälle. Dies bildet die Grundlage für Sicherheitsanalysen und die Planung eines geeigneten Endlagerkonzepts.

Die von der NES zu behandelnden Abfälle stammen von unterschiedlichen Abfallverursachern und sind zu einem großen Teil historisch bedingt. Dadurch sind sie oft sehr unterschiedlich zusammengesetzt und teilweise unzureichend dokumentiert. Ihre stoffliche Zusammensetzung ist häufig heterogen, umfasst sowohl organische als auch anorganische Bestandteile und kann theoretisch ein chemotoxisches Potenzial aufweisen. Die genaue Zusammensetzung hängt jeweils stark von der Herkunft der Abfälle ab. Forschungs-, Entwicklungs- und Demonstrationstätigkeiten (FE&D) tragen maßgeblich zur kontinuierlichen Verbesserung der Abfallbeschreibung und -konditionierung bei. Sie ermöglichen präzisere chemische Analysen, eine verbesserte Dokumentation des Abfallinventars und eine bessere Einschätzung des Langzeitverhaltens der konditionierten Abfälle. Auch

Abfallmanagementprozesse können dadurch optimiert werden. Chemotoxische Stoffe, wie die in Kapitel 3.3 beschriebenen, unterliegen besonderen Bewertungsverfahren. Chemische Gutachten leisten einen wichtigen Beitrag, um eine Freigabe oder Endlagerung zu ermöglichen – vorausgesetzt, Grenzwerte werden eingehalten.

4 MODELLBETRACHTUNGEN ZUR ERMITTLUNG VON KONZENTRATIONEN FÜR ALLE WASSERRECHTLICH RELEVANTEN INHALTSSTOFFE DES GESAMTINVENTARS

4.1 Grundlagen für die Ermittlung der Konzentrationen

Als Werkzeuge für die Beschreibung der Löslichkeit von Stoffen im unmittelbaren Umfeld der Behälter stehen thermodynamische Modelle zur Verfügung. Mit Ihnen lassen sich, ausgehend von einem vorgegebenen Inventar und unter sorgfältig gewählten geo-/hydrochemischen Randbedingungen (z. B. Menge und Zusammensetzung zutretender Lösung) in einer Analyse die chemischen Abläufe betrachten.

Für die Reaktionen, die zur Stofffreisetzung führen, sind vier Arten von Informationen von Bedeutung:

- Kenntnis der im System möglicherweise auftretenden Festphasen und aller relevanten Lösungsspezies,
- Löslichkeitskonstanten der Festphasen,
- Gleichgewichtskonstanten zur Beschreibung der verschiedenen in Lösung ablaufenden Komplexbildungs- und Redoxreaktionen; durch die Ausbildung stabiler Komplexe (mit Liganden wie z.B. OH^- , CO_3^{2-} , NO_3^- , SO_4^{2-} , ...) wird die Mobilität vieler Stoffe erheblich beeinflusst,
- ionen- oder systemspezifische Modell-Parameter, aus denen in einem, dem vorherrschenden geochemischen Milieu angepassten Modell die Speziation und Ionenaktivitätskoeffizienten ermittelt werden können.

Berücksichtigt man in einer Ausbreitungsanalyse sowohl die Löslichkeitseigenschaften der chemotoxischen Bestandteile des Abfalls als auch die Einschluss- bzw. Diffusionseigenschaften der das Endlager umgebenden Formation sowie Art und Menge des zu schützenden Grundwassers, dann erhält man im Ergebnis Konzentrationsangaben für die chemotoxischen Stoffe im Grundwasser. Im Folgenden werden die Lösungsvorgänge dargestellt und die für eine modellbasierte quantitative Ermittlung von Lösungskonzentrationen erforderlichen Werkzeuge vorgestellt.

4.1.1 Vorgehensweise bei der Ermittlung der Konzentrationen wasserrechtlich relevanter Wasserinhaltsstoffe

Das Vorgehen bei der Ermittlung der wasserrechtlich relevanten Stoffe des Inventars gliedert sich in 2 Schritte für die Lösungen in Ton, unter Tonüberdeckung oder in kristalliner Umgebung. Es werden unterstellte Resthohlräume von 100 m³, 500 m³ und 1000 m³ sowie unterstellte Verdünnungsfaktoren von 5000, 50.000 und 500.000 verwendet. Die Lösungsszenarien und das weitere Vorgehen im Einzelnen:

4.1.2 Hypothetische vollständige Lösung aller wasserrechtlich relevanten Wasserinhaltsstoffe

Im ersten Schritt wird die hypothetische vollständige Löslichkeit der wasserrechtlich relevanten Stoffe in reinem Wasser unterstellt. Dabei werden minimal 500.000 m³ (aus 100 m³ x Verdünnung 5000) und maximal 500 Mio. m³ (aus 10.000 m³ x Verdünnung 500.000) 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.

4.1.3 Reale Löslichkeit von wasserrechtlich relevanten Wasserinhaltsstoffen in reinem Wasser (minimale Salinität)

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.

4.1.4 Reale Löslichkeit von wasserrechtlich relevanten Wasserinhaltsstoffen im Wasseranteil der gesättigten NaCl-Lösung (maximale Salinität)

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 bzw. Renaturierungsmaterialien) wird bei keinem der Wasserinhaltsstoffe Kredit genommen.

4.1.5 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 und Pb betreffen. Dies soll im Folgenden anhand einiger Beispiele näher dargestellt 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 wechselte²⁵. Unter

²⁵ 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)

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 Brüscheiler²⁶ erläutert. Bei nichtionogenen Tensiden findet eine Hydrolyse der Polyglykolethergruppen und damit ein Abbau der waschaktiven Substanz statt, so z.B. beim Dodecylpolyglykolether 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 waren²⁶.

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.

4.1.6 Einfluss auf den pH-Wert infolge Wechselwirkung zutretender Wässer (Grundwasser) mit dem Verfüllmaterial

Der pH-Wert ist definiert als negativer Logarithmus der Wasserstoffionenkonzentration. Er ist die Maßzahl für den sauren oder alkalischen Charakter einer wässrigen Lösung. Chemische und biologische Prozesse werden zu großen Teilen durch den pH-Wert gesteuert.

Reines Wasser hat einen pH-Wert von 7, das Niederschlagswasser ist im Allgemeinen durch das aus der Atmosphäre aufgenommene CO₂ leicht sauer mit einem pH-Wert um 5,6²⁷. Stickoxid- und Schwefeldioxidemissionen aus Verbrennungsprozessen, Wald- und Steppenbränden

²⁶ H. Brüscheiler, „Eigenschaften und biologisches Abbauverhalten von grenzflächenaktiven Verbindungen (Tensiden)“, *Chimia* 29 (1975), Nr. 1 (Januar)

²⁷ Kölle, W., *Wasseranalysen – richtig beurteilt. Grundlagen, Parameter, Wassertypen, Inhaltsstoffe*. Vierte Auflage. Wiley-VCH, Weinheim. (2017)

oder vulkanischen Aktivitäten können den pH-Wert weiter absenken. Atmosphärische Einträge von sauren Niederschlagswässern durch Industrieemissionen, landwirtschaftliche Aktivitäten wie die Nitrat- oder Kalkdüngung oder Bergbauaktivitäten können zu erheblichen Änderungen der natürlichen pH-Werte führen.

Waschmittel und Laugen sind im Gegensatz stark alkalisch mit pH-Werten zwischen 10 und 14. In der Bodenzone verstärkt sich diese Tendenz durch den Abbau organischer Bodensubstanz zu Humin- und Fulvosäuren. Mit dem mikrobiellen Abbau der organischen Substanz zu Kohlendioxid – während des vertikalen Transports des Sickerwassers und dem folgenden lateralen Transport im Grundwasserleiter – nimmt der pH-Wert in Abhängigkeit von der Verweilzeit und der Reaktivität der anstehenden Gesteine im Allgemeinen wieder zu.

Karbonatische Grundwasserkörper weisen im Allgemeinen neutrale bis alkalische pH-Werte auf. Grundwasser, das durch silikatisches Material beeinflusst wird, zeigt niedrigere pH-Werte. Auch die Pyritoxidation kann zum Absinken von pH-Werten führen. Diese kann durch den Eintrag von Sauerstoff durch Grundwasserabsenkung oder durch den Eintrag von Nitrat als Oxidationsmittel in pyrithaltige Schichten ausgelöst werden. Versauerung bewirkt die Mobilisierung zahlreicher Schwermetalle, da deren Löslichkeit mit abnehmenden pH-Wert ansteigt. Dies gilt beispielsweise für Blei, Cadmium, Chrom, Eisen, Kupfer, Nickel, Quecksilber und Zink. Die pH-Werte in natürlichen Wässern liegen im Allgemeinen zwischen 5 und 8. Hohe pH-Werte (> 8,5) sind in Natriumkarbonat-haltigen Wässern zu erwarten, sehr niedrige (< 4,0) beispielsweise in sauren Grubenwässern²⁸.

Der Anfangs-pH-Wert in einem Endlager passt sich sehr schnell dem dominierenden Einfluss des verdünnenden Grundwassers an (Equilibrierung). Zur Frage der Equilibrierung von Grundwasser in Granit mit Bentonitverfüllung schreiben Karnland und Muurinen et al²⁹:

“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.”

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.

²⁸ Matthess, G.,: Lehrbuch der Hydrogeologie. Band 2: Die Beschaffenheit des Grundwassers. Gebrüder Bornträger, Berlin, Stuttgart (1990)

²⁹ 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.

Im Bericht Jül-4104³⁰ 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 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.

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.

4.2 Bewertung und Bedeutung von Lösungskonzentrationen

Mit geochemischen Rechen-Codes können unter Verwendung geeigneter thermodynamischer Daten, die oben beschriebenen zu erwartenden Lösungskonzentrationen und damit die Mobilisierbarkeit der zu betrachtenden Stoffe berechnet werden. Die sich einstellenden Konzentrationen können hier bereits mit Geringfügigkeitsschwellenwerten oder Orientierungswerten verglichen werden. Daraus resultieren Angaben darüber, welche Stoffe vom Quellterm her

- als so gering- oder schwerlöslich eingestuft werden können, dass sich für diese eine Transportmodellierung erübrigt,
- im Lösungsgleichgewicht nah genug an die Schwellenwerte heranreichen und sicherheitshalber in der Transportmodellierung mitzubetrachten sind,
- auf jeden Fall in der Transportmodellierung zu betrachten sind, da sie im Nahfeld die Schwellenwerte überschreiten.

Für eine Reihe von Stoffen ergibt sich bei Variationen (Änderungen des verfügbaren Wasservolumens, Parameteränderungen (Aktivitätskoeffizienten und Löslichkeitskonstanten) etc.), dass diese sensitiv reagieren. Auch für diese Stoffe empfiehlt es sich, diese in der Transportmodellierung mitzubetrachten, da diese unter geringfügig veränderten Bedingungen ebenfalls Schwellenwerte überschreiten können. Die hier vorgestellte Art der Analyse geht damit weit über das in den eingangs charakterisierten Sicherheitsanalysen vieler Länder verwendete sehr vereinfachte Löslichkeitsmodell hinaus.

Die daraus gewinnbaren Aussagen hinsichtlich des sich entwickelnden Quellterms einer Stofffreisetzung sind entsprechend belastbarer.

³⁰ H. Brücher et al., Untersuchungen zur Radionuklidfreisetzung und zum Korrosionsverhalten von bestrahltem Kernbrennstoff aus Forschungsreaktoren unter Endlagerbedingungen, Bericht Jül-4104 (2003), S. 105/106

5 VORSCHLAG FÜR EINE GESTUFTE NACHWEISFÜHRUNG

5.1 Kurzbeschreibung der vorgesehenen Nachweisschritte

Das Nachweiskonzept geht von einer im Rahmen der Langzeitsicherheitsanalyse für das Endlager zu erarbeitenden Gesamtheit an Szenarien aus. Diese Szenarien werden üblicherweise nach ihrer Eintrittswahrscheinlichkeit in wahrscheinliche, weniger wahrscheinliche und wegen ihrer äußerst gering wahrscheinlichen Eintrittswahrscheinlichkeit in nicht zu betrachtenden Szenarien gegliedert. Wahrscheinliche und weniger wahrscheinliche, aber an einem konkreten Standort nicht auszuschließende Szenarien, werden im Rahmen des Nachweises darauf geprüft, inwiefern chemotoxische Stoffe in relevantem Umfang aus dem Endlager freigesetzt werden können.

In einem ersten Nachweisschritt werden die Szenarien der wahrscheinlichen Entwicklung des Endlagers daraufhin untersucht, ob sie im Nachweiszeitraum mit Freisetzungen chemotoxischer Stoffe in das Grundwasser verbunden sind. Ist dies nicht der Fall, ist für diese Entwicklungen der Nachweis des vollständigen Einschlusses geführt. Eine Veränderung des Grundwassers durch chemotoxische Stoffe kann damit für diese Entwicklung des Endlagers ausgeschlossen werden, quantitative Betrachtungen und Analysen für die damit verbundenen Szenarien erübrigen sich.

Im zweiten Nachweisschritt werden die zu betrachtenden Szenarien der weniger wahrscheinlichen Entwicklungen des Endlagers auf Freisetzungen von chemotoxischen Stoffen in das Grundwasser hin untersucht. Erfolgt innerhalb des Nachweiszeitraums weder bei den wahrscheinlichen noch bei den weniger wahrscheinlichen Entwicklungen eine Freisetzung, ist der vollständige Einschluss abschließend nachgewiesen. In diesem Fall ist keine schädliche Verunreinigung des Grundwassers oder sonstige nachteilige Veränderung seiner Eigenschaften zu erwarten, weitere quantitative Betrachtungen und Analysen sind daher nicht erforderlich.

Im dritten Nachweisschritt werden für diejenigen Szenarien, die im Nachweiszeitraum bei den wahrscheinlichen und weniger wahrscheinlichen Entwicklungen Freisetzungen aufweisen, diejenigen Stoffe identifiziert, die freigesetzt werden und es werden diejenigen Stoffe identifiziert, deren Beitrag zu einer schädlichen Verunreinigung des Grundwassers oder sonstigen nachteiligen Veränderung seiner Eigenschaften führen kann. Bei Materialien, für die im Rahmen der Inventarermittlung bzw. durch Vorgabe von Qualitätskriterien anderweitig der Nachweis der Unbedenklichkeit geführt werden kann, und bei Stoffen, die nicht zu relevanten Freisetzungen beitragen, wird die Notwendigkeit einer quantitativen Analyse in diesem Schritt ausgeschlossen.

Für die Szenarien, für die eine Freisetzung von Stoffen im ersten und zweiten Schritt nicht ausgeschlossen werden kann, und für die Materialien und Stoffe, deren Inventar im dritten Schritt nicht als geringfügig eingeordnet werden können, sind im vierten Nachweisschritt modellrechnerische Untersuchungen erforderlich, um ihren Eintrag in das Grundwasser quantitativ zu bewerten. Für die zu berücksichtigenden Szenarien werden diese Stoffe in den Transportmodellierungen berücksichtigt und ihre Konzentrationen im Grundwasser ermittelt. Durch den Vergleich der Konzentrationswerte mit den Geringfügigkeitsschwellenwerten ist zu zeigen, dass der Eintrag der Stoffe in das Grundwasser zu keiner schädlichen Verunreinigung oder sonstigen nachteiligen Veränderung der Eigenschaften des Grundwassers führen kann.

Im Rahmen einer Nachweisführung ist grundsätzlich immer auch das Ergebnis möglich, dass nach Durchlaufen der vier Nachweisschritte für einzelne Stoffe eine Grundwasserverunreinigung nicht ausgeschlossen werden kann. Dann wären je nach Ursache für die Überschreitung beispielsweise Untersuchungen mit dem Ziel der Verringerung von Konservativitäten in der Nachweisführung oder planerische Maßnahmen denkbar.

5.2 Szenarienentwicklung und Szenarienanalyse

Zur Demonstration der Langzeitsicherheit eines Endlagers ist ein Nachweis über den Einschluss der eingelagerten Stoffe von der Biosphäre - unabhängig davon, um welche Stoffe es sich handelt - zu führen. Wesentliches Instrument des radiologischen Langzeitsicherheitsnachweises für ein Endlager für radioaktive Abfälle ist dabei die Langzeitsicherheitsanalyse.

„Nach allgemeinem Verständnis ist die Langzeitsicherheitsanalyse die Untersuchung des zukünftigen Verhaltens eines verschlossenen Endlagers mit radioaktiven Abfällen innerhalb eines vorgegebenen Nachweiszeitraums. Dabei werden alle Entwicklungsmöglichkeiten des Endlagersystems und alle dabei stattfindenden Ereignisse und Prozesse betrachtet, sofern diese eine mögliche oder denkbare Radionuklidenausbreitung beeinflussen können.“³¹

Hierzu bedient sich die radiologische Langzeitsicherheitsanalyse der Entwicklung und Analyse von Szenarien. Eine Szenarienentwicklung wird dadurch charakterisiert, dass sie die Identifizierung, ausführliche Beschreibung und Auswahl von möglichen Szenarien des Endlagersystems beinhaltet, die für eine verlässliche Beurteilung der Sicherheit von Endlagern für radioaktive Abfälle relevant sind³².

³¹ Fein, E.; Müller-Lyda, I.; Rübel, A.: Anhang Langzeitsicherheitsanalyse – Die Methodik zur Durchführung von Langzeitsicherheitsanalysen für geologische Endlager. – Braunschweig/Darmstadt 2008, http://www.grs.de/module/layout_upload/anhang_langzeitsicherheitsanalyse.pdf

³² International Atomic Energy Agency, Near Surface Disposal Facilities for Radioactive Waste, Specific Safety Guide SSG-29, IAEA Safety standard series, Vienna, 2014

Ziel der Szenarienentwicklung ist es, aus der Vielzahl der denkbaren Entwicklungsmöglichkeiten des Endlagersystems diejenigen auszuwählen, die die wahrscheinlichen Entwicklungen sowie die Bandbreite der weniger wahrscheinlichen Entwicklungen repräsentieren.

Die Szenarienanalyse, die im Rahmen einer Langzeitsicherheitsanalyse durchgeführt wird, ist definierbar als die qualitative Analyse des Endlagersystems zur Ermittlung aller vernünftig denkbaren Entwicklungen des Systems (Szenarien). Auf Grundlage aller für die zeitliche Entwicklung eines Endlagersystems relevanten Eigenschaften, Ereignisse und Prozesse (den so genannten FEP³³ und der Eigenschaften eines konkreten Standorts wird zunächst unabhängig von konkreten Standorteigenschaften zu Beginn jeder Szenarienanalyse die Liste der FEP zusammengestellt, die so vollständig wie möglich sein und alle denkbaren Einzelaspekte enthalten muss.

Die einzelnen Einträge der FEP-Liste werden anschließend auf dem Hintergrund von Standorteigenschaften und Erkundungsergebnissen analysiert und bewertet. So werden FEP mit niedriger Relevanz, d. h. mit geringer Eintrittswahrscheinlichkeit und/oder geringer Konsequenz, ausgeschlossen. Alle FEP, deren Relevanz nicht abgeschätzt werden kann, müssen weiter berücksichtigt werden. Der Ablauf der in der FEP-Liste enthaltenen Ereignisse wird dann in Szenarien abgebildet, die die Entwicklung des Gesamtsystems Endlager - Geosphäre - Biosphäre beschreiben. Ähnliche Szenarien werden dabei nach Möglichkeit zu Gruppen zusammengefasst und für jede Gruppe wird jeweils nur ein repräsentatives, abdeckendes Szenario betrachtet³².

Wahrscheinliche Entwicklungen decken die erwarteten Entwicklungen eines Endlagers und die dabei zu erwartenden Einflüsse ab. Alle Prozesse und Einwirkungen, die am Standort in der geologischen Vergangenheit stattfanden und die im Laufe des geforderten Nachweiszeitraums wahrscheinlich eintreten werden (z. B. Eiszeiten, Warmzeiten, Hebungen, Senkungen, Erosion) sind nach Art, Umfang und Häufigkeit bei der Herleitung von Szenarien, die die wahrscheinliche Entwicklung des Endlagers abbilden sollen, einzuschließen. Ein Endlagerstandort für radioaktive Abfälle muss für diese Prozesse und Entwicklungen zwingend den dauerhaften Einschluss der eingelagerten Abfälle von der Biosphäre gewährleisten, sei es unter den Bedingungen des vollständigen oder des sicheren Einschlusses.

Weniger wahrscheinliche Entwicklungen decken Entwicklungen ab, auf die in der geologischen Vergangenheit keine Hinweise vorliegen und die daher im Verlauf des Nachweiszeitraums am Standort nicht grundsätzlich zu erwarten sind, die aber an anderen vergleichbaren Standorten bei gleichen oder ähnlichen Formationen selten beobachtet wurden. Deren Eintreten ist zwar weniger wahrscheinlich, aber auch nicht völlig auszuschließen. Auch für diese Szenarien ist im radiologischen Langzeitsicherheitsnachweis zu

³³ FEP = Features, Events and Processes; Zustände, Ereignisse, Prozesse

zeigen, dass das Endlagersystem die eingelagerten Radionuklide weit überwiegend zurückhält. Hierzu ist es unabdingbar zu zeigen, dass die das Endlager bildenden Barrieren auch bei Eintreten der weniger wahrscheinlichen Entwicklungen weitgehend intakt bleiben. Entsprechend der geringeren Eintrittswahrscheinlichkeit ist im radiologischen Langzeitsicherheitsnachweis eine zehnfach höhere Freisetzungsrates zulässig.

Unwahrscheinliche Entwicklungen beinhalten grundsätzlich denkbare Ereignisse und Prozesse, für die weder am konkreten Standort noch an anderen Standorten mit vergleichbaren geologischen Verhältnissen Hinweise oder Anhaltspunkte aus der geologischen Vergangenheit vorliegen. Sie sind daher nach allen Regeln der praktischen Vernunft nicht zu erwarten.

Es wird vorgeschlagen, den Nachweis zum Schutz des Grundwassers vor chemotoxischen Stoffen für die wahrscheinlichen und die weniger wahrscheinlichen Entwicklungen zu führen.

Beim radiologischen Langzeitsicherheitsnachweis ist die Zielgröße die Berechnung des Risikos bzw. der Dosis, denen Personen in der Zukunft auf Grund der identifizierten Szenarien ausgesetzt sein können. Beim Nachweis zum Schutz des Grundwassers vor chemotoxischen Stoffen ist die Zielgröße die Stoffkonzentration im zu schützenden Grundwasserbereich. Die Szenarien, die konzeptuellen Modelle und die erforderlichen Rechenmodelle unterscheiden sich daher im räumlichen Kernbereich (Einlagerungsbereich, Nahfeld, einschusswirksamer Bereich) praktisch nicht. In Bezug auf die bei den Berechnungen berücksichtigten Stoffe sind einige chemisch identisch (Beispiele: Bor, Nickel, Uran, Thorium), die meisten chemotoxischen Stoffe sind aber spezifisch für den Nachweis zum Schutz des Grundwassers vor chemotoxischen Stoffen zu ergänzen (z. B. Arsen, Antimon, Vanadium). Bezüglich des Lösungs- und Transportverhaltens bedarf es bei den chemotoxischen Stoffen keiner eigenen grundlegenden Konzeption im Rahmen der Modellierung, lediglich müssen die Parameter der Stoffe ergänzt werden. In der Regel wird es für die chemotoxischen Stoffe also ausreichen,

- die Inventare der Stoffe und ihre Löslichkeits- und Transportparameter zu ergänzen sowie ihre Zerfallskonstante auf Null zu setzen,
- Stoffströme in den Grundwasserbereich und erreichte Konzentrationen im zu schützenden Grundwasser aus der Berechnung auszukoppeln.

5.3 Beschreibung der Nachweisführung

Ausgangspunkt des Nachweises zum Schutz des Grundwassers vor chemotoxischen Stoffen ist, dass für die wahrscheinliche und die zu betrachtenden weniger wahrscheinlichen

Entwicklungen des Endlagers zu zeigen ist, dass dabei entweder keine chemotoxischen Stoffe aus dem Endlager freigesetzt werden (vollständiger Einschluss) oder dass andernfalls die Veränderung des Grundwassers so geringfügig ist, dass eine schädliche Verunreinigung des Grundwassers oder sonstige nachteilige Veränderung seiner Eigenschaften nicht zu erwarten ist.

Die Ermittlung und Untersuchung der denkbaren und künftig möglichen Entwicklungen des Endlagers und ihre Einteilung in die Kategorien wahrscheinlich, weniger wahrscheinlich und unwahrscheinlich erfolgt im Rahmen des radiologischen Lang-zeitsicherheitsnachweises. Sie führt dort zu einem Satz an Szenarien, für die Freisetzungsart und –umfang im Hinblick auf radioaktive Stoffe charakterisiert werden. Bezüglich der chemotoxischen Stoffe ergibt sich insgesamt eine Analogie zur Vorgehensweise bei der Untertagedeponierung oder dem untertägigen Versatz gefährlicher Abfälle.

5.3.1 Vollständiger Einschluss bei der wahrscheinlichen Entwicklung des Endlagers

In diesem Schritt werden die für einen gegebenen Endlagertyp identifizierten wahrscheinlichen Entwicklungen daraufhin untersucht, ob diese im Nachweiszeitraum zu einer Freisetzung von Stoffen nach außerhalb des Nahfeldes bzw. des einschlusswirksamen Bereichs führen. Kann für Stoffe oder Stoffgruppen gezeigt werden, dass diese im Endlager eingelagerten Stoffe das Nahfeld bzw. den einschlusswirksamen Bereich im Nachweiszeitraum nicht verlassen können, gilt der Nachweis des vollständigen Einschlusses als geführt.

Da sich mobile Radionuklide und mobile chemotoxische Stoffe hinsichtlich ihrer Ausbreitungseigenschaften praktisch nicht unterscheiden, gilt der Nachweis für alle im Endlager enthaltenen Stoffe, sowohl für die radioaktiven als auch für die chemotoxischen Bestandteile.

Ziel des ersten Nachweisschritts ist es, für die wahrscheinliche Entwicklung des Endlagers und die dabei zu betrachtenden Szenarien diejenigen Verläufe zu identifizieren, für die der Nachweis des vollständigen Einschlusses zumindest für einige Stoffe bzw. Stoffgruppen geführt werden kann. Diese müssen dann im weiteren Nachweisverfahren nicht mehr betrachtet werden, da der Nachweis des vollständigen Einschlusses automatisch den Nachweis des Grundwasserschutzes vor chemotoxischen Stoffen einschließt.

5.3.2 Vollständiger Einschluss bei weniger wahrscheinlichen Entwicklungen des Endlagers

Ziel dieses zweiten Schrittes im Nachweis ist die Feststellung, welche Stoffe bzw. Stoffgruppen in welchen Szenarien der weniger wahrscheinlichen Entwicklungen des Endlagers mit Freisetzungen aus dem Nahfeld bzw. einschlusswirksamen Bereich des Endlagers verbunden sind und bei welchen Szenarien ein vollständiger Einschluss der chemotoxischen Stoffe vorliegt. Dieser Schritt wird nur durchlaufen, wenn im Rahmen der Szenarienanalyse weniger wahrscheinliche Entwicklungen identifiziert wurden, die auch im radiologischen Langzeitsicherheitsnachweis zu betrachten sind.

Ergibt wenigstens eines der in den Schritten 5.3.1 und 5.3.2 zu untersuchenden Szenarien, dass eine Freisetzung von Schadstoffen aus dem Nahfeld erfolgt, dann ist das betreffende Szenario (bzw. sind die betreffenden Szenarien) in den nachfolgenden weiteren Nachweisschritten zu berücksichtigen.

5.3.3 Geringfügigkeit des chemotoxischen Inventars

Grundlage einer Geringfügigkeitsuntersuchung ist die Ermittlung des beurteilungsrelevanten chemotoxischen Inventars. Das beurteilungsrelevante Inventar chemotoxischer Stoffe ist dabei auf einfache Weise und unter Anwendung bestehender Richtlinien auf diejenigen Materialien eingrenzbar, die tatsächlich zum chemotoxischen Inventar beitragen.

Für die in den Schritten 5.3.1 und 5.3.2 identifizierten Szenarien, die mit Freisetzungen aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich verbunden sind, ist eine Quantifizierung der damit verbundenen Veränderungen in der chemischen Zusammensetzung des Grundwassers vorzunehmen. Aus den nachfolgend angeführten Gründen ist es aber sinnvoll, diese Quantifizierung nur für solche Stoffe vorzunehmen, die ein Mindestpotential für eine schädliche Verunreinigung oder nachteilige Veränderung des Grundwassers aufweisen:

- Eine Reihe von Materialien im Endlager (z.B. Baustoffe oder bestimmte Verfüllmaterialien) enthalten chemotoxische Stoffe nur in solchen geringen Konzentrationen, dass von diesen keine Verunreinigung oder nachteilige Veränderung des Grundwassers ausgehen kann. Typischerweise werden solche Materialien im Alltag oder in der Technik daher ohne Weiteres gehandhabt und verwendet, ohne dass damit Gefährdungen des Schutzguts Grundwasser einhergehen oder zu erwarten sind. Es ist daher zunächst zu unterscheiden, welche Materialien nach welchen Kriterien zum chemotoxischen Inventar zu zählen sind und

welche, erforderlichenfalls unter zusätzlichen Auflagen, als in wasserrechtlicher Hinsicht unbedenklich eingeordnet werden können.

- Manche Materialien (beispielsweise Infrastruktureinrichtungen wie z. B. Kabel) können zwar ggf. im Endlager verbleiben, sind aber von der Menge her so gering, dass von ihnen ebenfalls keine Verunreinigung oder nachteilige Veränderung ausgehen kann. Hierfür sind nachvollziehbare Kriterien zu definieren.
- Die Materialien, die in ein Endlager gelangen, enthalten neben den Hauptbestandteilen stets geringfügige Spurenanteile. Definiert man die Grenze, bis zu der solche Spuren noch zu berücksichtigen sind, einerseits zu grobmaschig, werden eventuell für das Grundwasser relevante Stoffe übersehen. Fasst man diese Grenze andererseits zu weit, ist ein erheblicher Teil des Periodensystems der chemischen Elemente vertreten und muss erfasst und quantifiziert werden.

In diesem Schritt werden daher

- die Materialien, die in ein Endlager gelangen, daraufhin untersucht, ob sie zum chemotoxischen Inventar beitragen; für nicht oder, nach begründeten Kriterien, nur vernachlässigbar hierzu beitragende Materialien können andere Nachweismöglichkeiten gewählt werden.
- Kriterien für die Festlegung hergeleitet, welche Inventare an Schadstoffen in keinem Fall, oder unter bestimmten weiteren Bedingungen nicht, zu einer schädlichen Verunreinigung oder nachteiligen Veränderung des Grundwassers führen können,
- Kriterien für Untergrenzen der Erfassung von Spurenbestandteilen hergeleitet.

Ziel dieses Schrittes ist die Fokussierung des nachfolgenden Nachweisschrittes auf diejenigen Materialien und Stoffe, die tatsächlich das Potential für relevante Veränderungen des Grundwassers haben können, und das begründete außer Betracht lassen der Materialien und Stoffe, die nur ein geringfügiges Potential aufweisen.

5.3.4 Geringfügigkeit des Stoffeintrags in das Grundwasser

Für die

- Szenarien der wahrscheinlichen Entwicklungen (Nachweisschritt 5.3.1) und der weniger wahrscheinlichen Entwicklungen des Endlagers (Nachweisschritt 5.3.2), bei denen kein vollständiger Einschluss nachgewiesen werden konnte, und für die

- Materialien, die nicht aus dem Endlager entfernt werden und gemäß Nachweisschritt 5.3.3 nicht bei der Inventarisierung vernachlässigt werden können, und für die
- Stoffe, für die nach den drei Geringfügigkeitskriterien in Nachweisschritt 5.3.3 nicht gezeigt werden kann, dass sie nach Art, Menge und Löslichkeitseigenschaften als geringfügig außer Betracht gelassen werden können,

ist in diesem Nachweisschritt zu zeigen, dass der im Nachweiszeitraum zu erwartende Stoffeintrag in das zu schützende Grundwasser allenfalls zu geringfügigen Veränderungen führen kann. Gelingt dies, ist der Nachweis zum Schutz des Grundwassers vor chemotoxischen Stoffen vollständig und abschließend geführt.

6 SCHLUSSFOLGERUNGEN UND AUSBLICK

Die im ersten und zweiten Schritt des vorgeschlagenen Nachweises betrachteten Szenarien der wahrscheinlichen und der weniger wahrscheinlichen Entwicklungen des Endlagers orientieren sich am Vorgehen beim radiologischen Langzeitsicherheitsnachweis. Der Nachweis des Grundwasserschutzes vor im Endlager enthaltenen chemotoxischen Stoffen kann grundsätzlich auf die Ergebnisse der Szenarienanalyse im radiologischen Langzeitsicherheitsnachweis zurückgreifen und erfordert keine zusätzlichen Szenarien. Entsprechend sind die beim Nachweis zu untersuchenden Szenarien aus einem umfassenden FEP-Katalog, den standortspezifischen Verhältnissen und den Bewertungen hinsichtlich der Wahrscheinlichkeit von Entwicklungen herzuleiten.

Für radioaktive Abfälle führt der radioaktive Zerfall zu einer Verringerung des Gefährdungspotenzials der Radionuklide mit der Zeit. Für die im Endlager enthaltenen chemotoxischen Stoffe gilt dies praktisch nicht. Im Hinblick auf den ersten Nachweisschritt ist daher für chemotoxische Stoffe festzustellen, dass für ein Endlager der hier geforderte Nachweis des vollständigen Einschlusses nach derzeitigem Wissenstand nur dann geführt werden kann, wenn diese überaus mächtig sind. Liegen geringere Schichtdicken vor sind daher in jedem Fall differenzierte Betrachtungen der elementspezifischen Stofffreisetzung erforderlich, die dann auch die Untersuchung und Bewertung der Freisetzung hochmobiler chemotoxischer Stoffe umfassen müssen. Es ist daher zu erwarten, dass der Nachweisschritt 5.3.1 bei einem Endlager nicht zum Ausschluss aller Stoffgruppen von allen Szenarien aus dem weiteren Nachweis führt.

Die vorgeschlagenen Nachweismethoden ermöglichen es jedoch, sich im Rahmen des Nachweises auf die relevanten Szenarien und die dabei wichtigen Stoffe mit ihren Lösungs- und Ausbreitungsmechanismen zu konzentrieren. Materialien, von denen keine schädliche Verunreinigung des Grundwassers oder nachteilige Veränderung seiner Eigenschaften ausgehen kann, wie z. B. Stoffe ohne Potenzial für solche Grundwasserveränderungen oder solche bei denen die Diffusion über Bentonit- und Tonsteinstrecken aufgrund der Sorption zu einer vollständigen Rückhaltung dieser Stoffe führt, können begründet und nachvollziehbar außer Betracht gelassen werden, ohne dass das Risiko besteht, für das Grundwasser wesentliche Auswirkungen zu übersehen.

6.1 Überlegungen zu Transportmodellierung

Als Werkzeuge für die Beschreibung der Mobilität der betrachteten Stoffe stehen analytische und numerische Transportmodelle zur Verfügung. Darunter ist im Sinne dieses Berichts ausschließlich der Transport innerhalb des Nahfeldes zu verstehen. Transportvorgänge nach außerhalb dieses abgegrenzten Bereichs in den Grundwasserbereich, der den eigentlichen Nachweisort darstellt, sind hier nicht behandelt, da solche Berechnungen nur standortspezifisch durchgeführt werden können. Die auf dem Transportweg innerhalb des Nahfeldes ablaufenden chemischen Reaktionen (reaktiver Stofftransport) werden im Allgemeinen durch gekoppelte Modelle beschrieben.

Für die Transportmodellierung chemotoxischer Stoffe wichtige Größen sind

- die Ausgangskonzentration und –menge (resultiert aus der Lösungsmodellierung des Quellterms (siehe Kapitel 4),
- die Salinität des Porenwassers,
- die Sorptionseigenschaften.

Im Hinblick auf das vorgeschlagene Nachweiskonzept lassen sich demzufolge folgende Kernaussagen festhalten:

- Das mathematische Instrumentarium für die modellrechnerische Untersuchung der Stofffreisetzung und des Stofftransports aus einem Endlager für radioaktive Abfälle steht grundsätzlich zur Verfügung.
- Die Ausbreitung von chemotoxischen Stoffen über Diffusion mit verfügbaren Modellen und Eingangsgrößen quantitativ gut abschätzbar ist, die erhaltenen Schadstoffkonzentrationen liegen in Bereichen, die die Führung eines Nachweises zulassen.
- Es bestehen in allen vorhandenen Codes zum Stofftransport Lücken in der thermodynamischen Datenbasis bezüglich Löslichkeits- und Sorptionsparametern chemotoxischer Stoffe, die durch sicherheitsgerichtete konservative Annahmen zu überbrücken sind. Zukünftige Weiterentwicklungen der Datenbasis wären ggf. im konkreten Nachweisverfahren zu berücksichtigen.
- Aus einem vorgegebenen Stoffinventar und einer Zutrittslösung bekannter Zusammensetzung lässt sich mit dem vorhandenen Instrumentarium ein plausibler, hinsichtlich der vorhandenen Kenntnislücken konservativer Quellterm für in Lösung gehende Stoffanteile aus dem Endlagerinventar ableiten.

6.2 Überlegungen zur Beurteilung der Geringfügigkeit von Feststoffkonzentrationen

Der Nachweis eines vollständigen Einschlusses beschreibt in letzter Konsequenz das Vertrauen in die Eigenschaften eines Endlagers, dass keine der eingelagerten Stoffe im Nachweiszeitraum das Nahfeld bzw. den einschlusswirksamen Lagerbereich verlassen. Eine Beurteilung eines Stoffeintrags in das Grundwasser wäre bei geführtem Nachweis daher obsolet. Hingegen erfordert der Nachweis des sicheren Einschlusses Kriterien für die Beurteilung, ob die Veränderung des Grundwassers durch freigesetzte Stoffanteile geringfügig ist.

Aus den folgenden drei Überlegungen lassen sich Kriterien ableiten, unterhalb derer ein chemotoxischer Stoff oder sein Inventar bereits als solches als geringfügig bezeichnet werden kann:

- Das Endlager muss ein hohes Maß an Rückhaltung der eingelagerten Radionuklide aufweisen, um strahlenschutzrechtlich bewilligungsfähig zu sein. Ist sichergestellt, dass diese in gleicher Weise auch für chemotoxische Stoffe wirksam ist, kann von dieser Rückhaltung Kredit genommen werden.
- Verteilt sich eine vorhandene Schadstoffmenge homogen in Materialien in ihrem unmittelbaren Umfeld innerhalb des Endlagers bzw. im Nahfeld und unterschreitet die sich einstellende Feststoffkonzentration Richtwerte des Bodenschutzes, kann die Schadstoffmenge als geringfügig bezeichnet werden.
- Löst sich ein Stoff im Nahfeld bei unterstelltem Wasser- bzw. Lösungszutritt nicht oder nur in solchen Lösungskonzentrationen auf, die den festzulegenden Geringfügigkeitsschwellenwert unterschreiten, dann kann davon ausgegangen werden, dass von diesem Stoff *per se* am eigentlichen Nachweisort keine schädlichen Verunreinigungen oder sonstigen nachteiligen Veränderungen der Grundwasserbeschaffenheit ausgehen. Unabhängig vom Inventar kann eine Ausbreitungsrechnung für diesen Stoff unterbleiben.

6.3 Überlegungen zum Nachweiszeitraum

Sowohl der Nachweis eines vollständigen wie des sicheren Einschlusses erfordert die Definition eines Nachweiszeitraums, über den die Entwicklung des Endlagersystems hinreichend sicher vorhergesagt werden kann. Für beide Nachweise ist der Erhalt der Eigenschaften des einschlusswirksamen Gebirgsbereich im Nachweiszeitraum plausibel darzulegen. Darüber hinaus ist für den sicheren Einschlusses nachzuweisen, dass die aus dem Endlager freigesetzten und

in das Grundwasser eingetragenen Stoffe im Nachweiszeitraum keine relevante Grundwasser-
verunreinigung erwarten lassen.

Das toxikologische Gefährdungspotenzial als Stoffeigenschaft bleibt bei chemotoxischen Stoffen über die Zeit praktisch unverändert. Hinsichtlich des Nachweiszeitraums gibt es also im Gegensatz zu den Radionukliden in den radioaktiven Abfällen keine Zeitspanne, ab der von vorneherein ein bestimmter Stoff als nicht mehr toxisch angesehen werden kann. Hinsichtlich der chemotoxischen Stoffe ist ein grundsätzlich kürzerer Nachweiszeitraum daher nicht begründbar. Letztlich ist daher, wie für einige sehr langlebige radioaktive Schadstoffe im radiologischen Langzeitsicherheitsnachweis auch, der zeitliche Horizont durch die Prognosefähigkeit begrenzt, die nicht beliebig weit in die Zukunft reicht.

Für den radiologischen Langzeitsicherheitsnachweis ist dieser Zeitraum derzeit nicht festgelegt. Geht man davon aus, dass sich an einem für die Endlagerung günstigen Standort und für den jeweiligen Endlagertyp der Erhalt der Eigenschaften eines einschlusswirksamen Bereichs für einen bestimmten Zeitraum mit hinreichender Zuverlässigkeit nachweisen lässt, so wäre dieser Zeitraum ein möglicher Nachweiszeitraum.

Außerhalb des Nahfeldes des Endlagers kann es im Laufe dieses Zeitraums zu vielfältigen Veränderungen kommen, z. B. durch glazigene Beeinflussungen. Diese Veränderungen können sich auch auf Grundwasservorkommen und deren Eigenschaften auswirken. Der Schutz hat sich daher auf ein mögliches Grundwasservorkommen außerhalb des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs zu erstrecken. Es ergibt sich letztendlich die Empfehlung, für den Nachweis zum Schutz des Grundwassers vor chemotoxischen Stoffen einen Nachweiszeitraum festzulegen.

6.4 Überlegungen zu mineralischen Endlagerkomponenten

Zu den mineralischen Endlagerkomponenten zählen Versatzmaterial, Zemente und Betone, Bentonite und Schotter, die als Werkstoffe im Endlager verwendet werden sollen und nach dessen Schließung dort verbleiben sollen. Für diese Materialien, deren Art und Zusammensetzung meist vom Wirtsgestein abhängt, gibt es in der konventionellen Technik ein abdeckendes Instrumentarium an bewährten Verfahren, die dazu genutzt werden können, die erforderliche chemische Zusammensetzung im Hinblick auf die Geringfügigkeit der chemotoxischen Bestandteile der verwendeten Materialien bereits in der Planungsphase zu definieren und ihre Einhaltung im Rahmen der Qualitätssicherung nachzuweisen.

Betone, bestehend aus Zement und Zuschlagstoffen, sind als mineralische Komponenten auf Basis bestehender Regelwerke und Normen in gleicher Weise charakterisierbar wie die silikatischen Verfüllmaterialien. Salzbetone, Magnesiabinder und Gips-/Anhydritbinder, die speziell in einem Endlager im Salzgestein zum Einsatz kommen sollen, lassen sich dabei unter

den gleichen Voraussetzungen beurteilen wie klassische Betone. Als Besonderheit dieser Materialien muss berücksichtigt werden, dass diese hohe Gehalte an Chlorid und ggf. Sulfat enthalten, deren Gehalt aber im Kontext des geogenen vorhandenen Chlorids bzw. Sulfats als unkritisch zu bewerten ist.

Schließlich sind die gleichen Kriterien auch auf Bentonit und basische Schotter (Basalt, Diabas o.ä.) als mineralische Baustoffe natürlichen Ursprungs anwendbar. Für granitische Gesteine hingegen sind aufgrund der hier häufiger anzutreffenden Vererzungen ggf. zusätzliche Untersuchungen seltenerer Schwermetalle und Actiniden hinsichtlich deren Mineralvorkommen und Freisetzungsverhalten erforderlich.

Insgesamt ergibt sich also für die mineralischen Endlagerkomponenten eine einheitliche Vorgehensweise, die im Ergebnis dazu führt, dass mit Einhaltung definierter Eigenschaften der Werkstoffe hinsichtlich ihres Gehalts an chemisch toxischen Stoffen diese im beurteilungsrelevanten chemotoxischen Inventar nicht berücksichtigt werden müssen.

6.5 Überlegungen zur Inventarisierung der Abfallgebinde

Die in den Abfallgebinden, d.h. in den Behältermaterialien und radioaktiven Abfällen, enthaltenen chemotoxischen Stoffe sind grundsätzlich beurteilungsrelevant. Für die Abfallgebinde ist daher ein Inventar aufzustellen, anhand dessen die Untersuchungen zur Relevanz dieser Stoffe für den Grundwasserschutz durchgeführt werden können.

Stoffe, die nicht als Schadstoff im Sinne einer chemotoxischen Relevanz anzusehen sind (z.B. Silizium (Si), Kohlenstoff (C), Wasserstoff (H)) können dabei aus der Bilanz des Abfallgebindeinventars ausgeklammert werden. Materialbestandteile wie Sulfat und Chlorid sind dabei nicht chemotoxisch im engeren Sinne. Entscheidend für ihre Inventarrelevanz ist, ob ihr Gehalt im Grundwasser vorhabensbezogen erhöht wird oder auf einem ohnehin geogen vorgeprägtem Niveau verbleibt.

Im Inventar auftretende selten verwendete Stoffe, für die es aus den bestehenden wasserrechtlichen Regelwerken keine Geringfügigkeitsschwellenwerte zur Bewertung ihrer Relevanz im Schutzgut Grundwasser gibt, sind nicht per se als ungefährlich zu betrachten. Ihr Inventaranteil ist also ebenfalls zu ermitteln bzw. aufgrund der Angaben in den vorliegenden Typanalysen zu schätzen. Bietet der öko- und human-toxikologische Kenntnisstand hinsichtlich der Stoffbeurteilung keine Information, sind stoffspezifische Geringfügigkeitsschwellenwerte abzuleiten.

Die Nachweisschritte und -methoden des vierstufigen Nachweiskonzeptes enthalten Hinweise für die folgenden, dem Nachweis teilweise vorausgehenden Entscheidungen:

- Erarbeitung von Annahmebedingungen für Abfälle: Welche chemotoxischen Stoffe in den Abfällen sind mit welchem Detaillierungsgrad zu charakterisieren, zu spezifizieren und im Rahmen der Qualitätssicherung zu erfassen und zu dokumentieren?
- Verpackungskonzept: Welche Stoffbestandteile in Verpackungsmaterialien für die Endlagerung sind zu typisieren, zu charakterisieren und bis zu welchem Detaillierungsgrad zu erfassen?
- Einlagerungs-, Verfüll- und Verschlusskonzept: Für welche verwendeten Materialien kommt welcher Nachweistyp bzw. welche Nachweismethode in Frage, welche Materialparameter sind hierfür festzulegen und ihre Einhaltung im Rahmen der Qualitätssicherung während des Baus und Betriebs des Endlagers zu verifizieren.

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Die bis 2012 verwendeten Abfallkategorien der NES.	30
Tabelle 2: Seit 2012 erfolgt die stoffliche Beschreibung bei der NES nach diesen Abfalltypen.	31
Tabelle 3: Abfalltypen von Fässern mit Neuem sowie schon Nach- und Rekonditioniertem Inhalt (Stand April 2025)	38
Tabelle 4: Beschreibung der noch nicht Nach- und Rekonditionierten Gebinde (Stand April 2025, Fasszahlen gerundet)	39

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Materialflussdiagramm der NES (©NES)	26
Abbildung 2: Beispiele von inhomogen zementierten Abfallfässern (links: Mischung aus Glas, Kunststoffe, Spritzen, Kanülen; rechts: Metalle Glasfläschen, Kabel, Kunststoffe, Sand), anhand derer die Schwierigkeit einer repräsentativen und v.a. risikofreien Probenahme ersichtlich ist.....	29
Abbildung 3: links: Beispiel eines IZ-Fasses ausschließlich mit Betonbruch gefüllt; rechts: Beispiel eines HZ-Innenfasses.	30
Abbildung 4: Aufteilung der Gebinde in Chargen sowie hinsichtlich ihrer Konditionierungsart sowie Beschreibung der stofflichen Informationen.	37

Literaturverzeichnis

- [1] Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft über Deponien (Deponieverordnung 2008 – DVO 2008), BGBl II Nr. 39/2008
- [2] Richtlinie 1999/31/EG des Rates vom 26. April 1999 über Abfalldeponien, Amtsblatt Nr. L 182 vom 16/07/1999 S. 0001 – 0019 (Dokument 31999L0031).
- [3] 2003/33/EG: Entscheidung des Rates vom 19. Dezember 2002 zur Festlegung von Kriterien und Verfahren für die Annahme von Abfällen auf Abfalldeponien gemäß Artikel 16 und Anhang II der Richtlinie 1999/31/EG
- [6] Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen („Kreislaufwirtschaftsgesetz vom 24. Februar 2012 (BGBl. I S. 212), das zuletzt durch Artikel 5 des Gesetzes vom 2. März 2023 (BGBl. 2023 I Nr. 56) geändert worden ist“ – KrW-/AbfG)
- [7] Zweite allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz (TA Abfall) Teil 1: Technische Anleitung zur Lagerung, chemisch/physikalischen, biologischen Behandlung, Verbrennung und Ablagerung von besonders überwachungsbedürftigen Abfällen vom 12. März 1991 (GMBL. I S. 139, ber. S. 467; BAnz :27.04.2009 S. 1577 aufgehoben zum 15.7.2009)
- [8] Verordnung über Deponien und Langzeitlager (Deponieverordnung - DepV), vom 24. Juli 2002 (BGBl. I S. 2807), zuletzt geändert durch Artikel 2 der Verordnung vom 13. Dezember 2006 (BGBl. I S. 2860)
- [9] Verordnung über Deponien und Langzeitlager (Deponieverordnung – DepV) vom 27. April 2009 (BGBl. I S. 900), die zuletzt durch Artikel 3 des Gesetzes vom 3. Juli 2024 (BGBl. 2024 I Nr. 225) geändert worden ist.
- [10] Bundesberggesetz vom 13. August 1980 (BGBl. I S. 1310), zuletzt geändert durch Artikel 11 des Gesetzes vom 9. Dezember 2006 (BGBl. I S.2833)
- [11] Verordnung über den Versatz von Abfällen unter Tage (Versatzverordnung - VersatzV), vom 24. Juli 2002 (BGBl. I S. 2833), zuletzt geändert durch Artikel 5 Abs. 25 G. v. 24.02.2012 BGBl. I S. 212, Geltung ab 30.10.2002; FNA: 2129-27-2-18
- [12] Untertage-Deponie Herfa-Neurode, Standortbroschüre
- [13] Zertifikat Entsorgungsfachbetrieb, K + S Kali GmbH, D341431 Kassel, am Standort Werk Werra, Untertage-Deponie Herfa-Neurode, In der Aue 1, 36266 Heringen-Werra, mit Anhang
- [14] 98. Verordnung: Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft über den guten chemischen Zustand des Grundwassers (Qualitätszielverordnung Chemie Grundwasser – QZV Chemie GW), ausgegeben am 29. März 2010.
- [15] Verordnung des Bundesministers für soziale Sicherheit und Generationen über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch (Trinkwasserverordnung - TWV), BGBl. II Nr. 304/2001
- [16] Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 18. Dezember 2006 zur Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe (REACH), zur Schaffung einer Europäischen Chemikalienagentur, zur Änderung der Richtlinie 1999/45/EG und zur Aufhebung der Verordnung (EWG) Nr. 793/93 des Rates, der Verordnung (EG) Nr. 1488/94 der Kommission, der Richtlinie 76/769/EWG des Rates sowie der Richtlinien 91/155/EWG, 93/67/EWG, 93/105/EG und 2000/21/EG der Kommission; (02006R1907-20241010)

- [17] RICHTLINIE DES RATES vom 17. Dezember 1979 über den Schutz des Grundwassers gegen Verschmutzung durch bestimmte gefährliche Stoffe (80/68/EWG), *Amtsblatt Nr. L 020 vom 26/01/1980 S. 0043 – 0048; (31980L0068); aufgehoben durch 300L0060*
- [18] Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik, *Amtsblatt Nr. L 327 vom 22/12/2000 S. 0001 – 0073 (300L0060)*
- [19] United Nations, Department of Economic and Social Affairs: Products whose consumption and/ or sale have been banned, withdrawn, severely restricted or not approved by governments”, Fifteenth Issue, Chemicals, New York, 2009
- [20] International Agency for Research on Cancer: IARC Monographs on the Identification of Carcinogenic Hazards to Humans, Agents Classified by the IARC Monographs, Volumes 1–136
- [21] Bundesministerium für Soziales, Gesundheit, Pflege und Konsumentenschutz: Österreichisches Lebensmittelbuch, IV. Auflage, Codexkapitel / B1 / Trinkwasser, Veröffentlicht mit der Geschäftszahl BMGFJ-75210/0009-IV/B/7/2007 vom 15.6.2007
- [22] World Health Organization „Guidelines for drinking-water quality: fourth edition incorporating the first and second addenda“, Geneva: World Health Organization; 2022
- [23] Bundesgesetz über eine nachhaltige Abfallwirtschaft (Abfallwirtschaftsgesetz 2002 – AWG 2002), BGBl I Nr. 102/2002
- [24] NÖ Klärschlammverordnung, StF: LGBl. 6160/2-0, Stand der Gesetzgebung: 25.09.2017
- [25] 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)
- [26] H. Brüscheiler, „Eigenschaften und biologisches Abbauverhalten von grenzflächenaktiven Verbindungen (Tensiden)“, *Chimia* 29 (1975), Nr. 1 (Januar)
- [27] Kölle, W., Wasseranalysen – richtig beurteilt. Grundlagen, Parameter, Wassertypen, Inhaltsstoffe. Vierte Auflage. Wiley-VCH, Weinheim (2017).
- [28] Mattess, G., Lehrbuch der Hydrogeologie. Band 2: Die Beschaffenheit des Grundwassers. Gebrüder Bornträger, Berlin, Stuttgart (1990)
- [29] 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.
- [30] H. Brücher et al., Untersuchungen zur Radionuklidfreisetzung und zum Korrosionsverhalten von bestrahltem Kernbrennstoff aus Forschungsreaktoren unter Endlagerbedingungen, Bericht Jül-4104 (2003), S. 105/106
- [31] Fein, E.; Müller-Lyda, I.; Rübel, A.: Anhang Langzeitsicherheitsanalyse – Die Methodik zur Durchführung von Langzeitsicherheitsanalysen für geologische Endlager. – Braunschweig/Darmstadt 2008, http://www.grs.de/module/layout_upload/anhang_langzeitsicherheitsanalyse.pdf
- [32] International Atomic Energy Agency, Near Surface Disposal Facilities for Radioactive Waste, Specific Safety Guide SSG-29, IAEA Safety standard series, Vienna, 2014

Abkürzungen

BGBI.	Bundesgesetzblatt
BTEX	Benzol, Toluol, Ethylbenzol und Xylol.
FM	Feuchtmasse
KW	Kohlenwasserstoffe
TM	Trockenmasse
TOC	Total Organic Carbon, gesamter organischer Kohlenstoff

