

Überprüfung der sicherheits- technischen Anforderungen des Endlagers Konrad nach dem Stand von Wissenschaft und Technik (ÜsiKo)

Unabhängige wissenschaftliche Begleitung
(UWB) der Phase 2
„Aktualisierung von Sicherheitsanalysen“

Klaus-Jürgen Röhlig,
Stephan Kurth, Thorsten Schäfer & Clemens Walther

Januar 2025

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung.....	5
Mitglieder des UWB-Teams	6
2. In Phase 1 identifizierte Deltas und Hinweise	8
3. Zum Prozess der unabhängigen wissenschaftlichen Begleitung.....	11
4. Nachweis der Unterkritikalität ($\Delta 1$-$\Delta 7$).....	12
4.1 Sachverhalt	12
4.2 Ergebnisse der UWB.....	13
5. Mensch-Technik-Organisation (MTO, $\Delta 8$-$\Delta 21$)	17
5.1 Sachverhalt	17
5.2 Ergebnisse der UWB.....	17
6. Brandschutz, Teil 1	20
6.1 Sachverhalt	20
6.2 Bewertung der UWB	22
7. Brandschutz, Teil 2	25
7.1 Brandschutztechnische Untersuchung elektrisch angetriebener Fahrzeuge (Fahrzeugbrand unter Tage) ($\Delta 22$).....	25
7.1.1. Sachverhalt	25
7.1.2. Bewertung der UWB	25
7.2 Erstellung einer geschlossenen Brandschutzunterlage (H 2)	26
7.2.1. Sachverhalt	26
7.2.2. Bewertung der UWB	26
7.3 Sicherheitstechnische Bewertung bezüglich des Explosionsschutzes beim Einsatz von Energiespeichern (H 8).....	27
7.3.1. Sachverhalt	27
7.3.2. Bewertung der UWB	27
8. Brand Ausbau ($\Delta 23$)	28

8.1	Sachverhalt	28
8.2	Ergebnisse der UWB.....	28
9.	Radionuklidausbreitung ($\Delta 24$-$\Delta 32$)	30
9.1	Sachverhalt	30
9.2	Ergebnisse der UWB.....	30
10.	Dosisberechnung ($\Delta 33$)	34
10.1	Sachverhalt	34
10.2	Ergebnisse der UWB.....	34
11.	Störfallplanungswerte ($\Delta 34$-$\Delta 35$).....	36
11.1	Sachverhalt	36
11.2	Ergebnisse der UWB.....	36
12.	Kollision ($\Delta 36$)	37
12.1	Sachverhalt	37
12.2	Ergebnisse der UWB.....	38
13.	Bodenverflüssigung (H 9)	40
13.1	Sachverhalt	40
13.2	Ergebnisse der UWB.....	40
14.	Biologische Einwirkungen (H 10)	42
14.1	Sachverhalt	42
14.2	Ergebnisse der UWB.....	42
15.	Zusammenfassung	43
16.	Abkürzungsverzeichnis.....	45
17.	Literaturverzeichnis	47
17.1	Berichte zu Phase 2 der ÜsiKo	47
17.2	Berichte zu Phase 1 der ÜsiKo	47
17.3	Planfeststellungsunterlagen	48
17.3.1.	Planfeststellungsbeschluss	48

17.3.2.Erläuternde Unterlage	48
17.4 Sonstige Literatur	48

1. Einleitung

In der Schachtanlage Konrad bei Salzgitter entsteht das erste nach Atomrecht genehmigte Endlager für schwach- und mittelradioaktive Abfälle in Deutschland. Hierzu wird das ehemalige Eisenerzbergwerk unter Leitung der Bundesgesellschaft für Endlagerung (BGE) zum Endlager umgebaut.

Dem Planfeststellungsbeschlusses (PFB) für das Endlager Konrad (NU 2002) zufolge war gewährleistet, dass die dem Stand von Wissenschaft und Technik (W&T) zum damaligen Zeitpunkt gemäße Schadensvorsorge getroffen wurde. Gegenwärtig führt die BGE eine freiwillige Überprüfung der sicherheitstechnischen Anforderungen des Endlagers Konrad nach dem Stand von W&T (ÜsiKo) durch. Hiermit soll der Stand von W&T zum Zeitpunkt der Planfeststellung (also im Jahr 2002) mit dem heutigen Stand verglichen und ggf. Schlussfolgerungen bzgl. eines Handlungsbedarfs abgeleitet werden.

Die ÜsiKo umfasst vier Phasen:

- In der ersten Phase „Ermittlung des Überprüfungsbedarfs“ (bis 2019) wurden zunächst festgestellt, ob sich angesichts des heutigen Standes von W&T sicherheitsrelevanter Überprüfungsbedarf ergibt. Dieser wurde durch BGE-externe Unternehmen (nachfolgend: Auftragnehmer AN) ermittelt und in Form von 36 so genannten „Deltas“ formuliert. Zusätzlich wurden auch weitere zehn „Hinweise“ gegeben.
- In der gegenwärtig laufenden zweiten Phase „ggf. Aktualisierung von Sicherheitsanalysen“ werden vertiefte Betrachtungen zu den Sicherheitsanalysen angestellt und diese gegebenenfalls aktualisiert.
- Falls notwendig, sollen in einer dritten Phase Planungsanpassungen für das Endlager erfolgen.
- Diese sollen ggf. in einer vierten Phase umgesetzt werden.

Die zweite Phase wurde von einem Unabhängigen Wissenschaftlichen Begleitteam (UWB-Team) begleitet. Der vorliegende Bericht fasst die Arbeit und die Ergebnisse des UWB-Teams zusammen.

Mitglieder des UWB-Teams

Prof. Dr. rer. nat. Klaus-Jürgen Röhlig

Institut für Endlagerforschung, Technische Universität Clausthal (Koordination)

- Mathematiker (Diplom und Promotion an der TU Bergakademie Freiberg)
- 1991-2007 Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH Köln, u. a. Ressortforschung und Beratung des Bundesumweltministeriums zur Entsorgung radioaktiver Abfälle, u. a. zu Sicherheitsanalysen und -anforderungen
- seit 2007 Professor für Endlagersysteme an der Technischen Universität Clausthal. Arbeits- und Forschungsschwerpunkte: Sicherheitsanalyse für Endlager, Schnittstellen technischer und gesellschaftlicher Aspekte bei der Entsorgung radioaktiver Abfälle. Lehrtätigkeit: Sicherheitsanalyse, Entsorgungsstrategien
- Mitglied der Entsorgungskommission (ESK) des BMUV, Beratungstätigkeit für französische, schwedische und Schweizer Behörden

Stephan Kurth

Öko-Institut e.V., Bereich Nukleartechnik und Anlagensicherheit

- Diplom-Ingenieur Verfahrenstechnik (Diplom Fachhochschule Köln)
- 1987–1993 Chemische Industrie, Anlagenplanung
- Seit 1995 Öko-Institut e.V.
Leiter der Gruppe Anlagensicherheit
- Arbeitsgebiete: Sicherheitsanalysen, Systemtechnik
- Mitglied der Kommission für Anlagensicherheit (KAS) bis 2024, von 2017 bis 2024
Leiter der KAS

Prof. Dr. rer. nat. Thorsten Schäfer

Institut für Geowissenschaften, Friedrich-Schiller-Universität (FSU) Jena

- Geologe (Diplom und Promotion an der Johannes-Gutenberg-Universität Mainz)
- 1999: Postdoc am Forschungszentrum Karlsruhe, Institut für Nukleare Entsorgungstechnik (Leitung Prof. J. I. Kim)
- 2000-2001 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Brookhaven National Laboratory (National Synchrotron Light Source), XRM-Gruppe (X-Ray Microscopy, Prof. J. Kirz & Prof. C. Jacobsen)
- 2002-2017 Institut für Nukleare Entsorgung (INE) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT), u.a. Stellvertretender Institutsleiter, Leiter der Abteilung Geochemie, Gruppenleiter für Kolloidchemie und Radionuklidmigration. (Leiter: Prof. J. I. Kim, Prof. Th. Fanghänel, Prof. H. Geckeis)
- 2008 Habilitation in den Geowissenschaften und *venia legendi* in Hydrogeologie, Freie Universität Berlin; Mentor: Prof. A. Pekdeger
- 2014-2017 Professor für Chemische Umweltgeologie, KIT
- seit 2017 Professor für Angewandte Geologie an der FSU Jena
- Mitglied im „ClayClub“ und im „Crystalline Club“ der OECD/NEA
- Mitglied der Expertengruppe Geologische Tiefenlagerung (EGT) des Eidgenössischen Nuklearsicherheitsinspektorats (ENSI), Schweiz

Prof. Dr. rer. nat. Clemens Walther

Institut für Radioökologie und Strahlenschutz, Leibniz Universität Hannover

- Physiker und Kernchemiker (Diplom und Promotion an der Universität Mainz)
- 1999-2012 Institut für nukleare Entsorgung, Forschungszentrum Karlsruhe (jetzt KIT), Stellv. Abteilungsleiter Aktinidenspeziation
- seit 2012 Professor für Radioökologie und Strahlenschutz an der Leibniz Universität Hannover. Arbeits- und Forschungsschwerpunkte: Physikalische und chemische Speziation von Radionukliden (insbesondere Actiniden), Spurendetektion von Radionukliden in der Umwelt. Lehrtätigkeit: Radioökologie, Strahlenschutz, Kernbrennstoffkreislauf
- Mitglied der Strahlenschutzkommission (SSK), Vorsitzender des KVSV (Kompetenzverbund Strahlenforschung), Präsident des deutsch-schweizerischen Fachverbandes für Strahlenschutz

Die Mitglieder des UWB-Teams versichern, dass sie die wissenschaftliche Begleitung unter Wahrung größtmöglicher Neutralität vorgenommen haben. Sie waren in der Vergangenheit nicht an der Erstellung von Sicherheitsanalysen für das Endlager Konrad beteiligt. Drei von ihnen waren Mitglieder des Review-Teams für Phase 1 der ÜSiKo.

2. In Phase 1 identifizierte Deltas und Hinweise

Die in der Einleitung genannten Deltas (nachfolgend: „ Δ “ mit Nummer) und Hinweise (nachfolgend: „H“ mit Nummer) lassen sich folgenden Themenbereichen zuordnen:

1. Nachweis der Unterkritikalität

- Δ 1 Spaltstoffkonzentration durch Ausfällung im Grubengebäude
- Δ 2 Spaltstoffkonzentration durch Ausfällung in der Geosphäre
- Δ 3 Nachweis der Kritikalitätssicherheit für alle höheren Aktinide
- Δ 4 Nachweis der Kritikalitätssicherheit bei der Anwesenheit spezieller Moderatormaterialien
- Δ 5 Neue Version von ANSI/ANS-8.15, Erweiterung der Spaltstoffliste
- Δ 6 Neue Version von ANSI/ANS-8.15, Änderung bei den kleinsten kritischen Massen
- Δ 7 Bewertung heterogener Spaltstoffanordnungen

Dabei betreffen Δ 1-4 die Nachbetriebsphase, Δ 5-7 die Betriebsphase. Das Thema „Nachweis der Unterkritikalität“ ist Gegenstand von Kapitel 4 des vorliegenden Berichts.

2. Mensch-Technik-Organisation (MTO)

- Δ 8 Durchführung einer ganzheitlichen, voreilenden MTO-Analyse: Ereignisspektrum
- Δ 9 Durchführung einer ganzheitlichen, voreilenden MTO-Analyse: Absturz einer Transporteinheit in der Pufferhalle
- Δ 10 Durchführung einer ganzheitlichen, voreilenden MTO-Analyse: Absturz einer Transporteinheit in der Umladehalle
- Δ 11 Durchführung einer ganzheitlichen, voreilenden MTO-Analyse: Absturz einer Transporteinheit im Sonderbehandlungsraum
- Δ 12 Durchführung einer ganzheitlichen, voreilenden MTO-Analyse: Absturz schwerer Lasten auf Abfallgebinde über Tage
- Δ 13 Durchführung einer ganzheitlichen, voreilenden MTO-Analyse: Kollision von Transportmitteln ohne Brand über Tage
- Δ 14 Durchführung einer ganzheitlichen, voreilenden MTO-Analyse: Absturz von Abfallgebänden bei der Beschickung des Förderkorbes
- Δ 15 Durchführung einer ganzheitlichen, voreilenden MTO-Analyse: Mechanische Einwirkungen auf Abfallgebinde bei der Förderung nach unter Tage

- Δ 16 Durchführung einer ganzheitlichen, voreilenden MTO-Analyse:
Absturz von Lasten auf Abfallgebände im Förderkorb
- Δ 17 Durchführung einer ganzheitlichen, voreilenden MTO-Analyse:
Absturz von Abfallgebänden bei der Handhabung unter Tage
- Δ 18 Durchführung einer ganzheitlichen, voreilenden MTO-Analyse:
Absturz schwerer Lasten auf Abfallgebände unter Tage
- Δ 19 Durchführung einer ganzheitlichen, voreilenden MTO-Analyse:
Kollision von Transportmitteln ohne Brand unter Tage
- Δ 20 Durchführung einer ganzheitlichen, voreilenden MTO-Analyse:
Kollision von Transportmitteln mit Brand über Tage
- Δ 21 Durchführung einer ganzheitlichen, voreilenden MTO-Analyse:
Kollision von Transportmitteln mit Brand unter Tage

Die MTO-Analyse ist Gegenstand von Kapitel 5.

2. Brandschutz

- Δ 22 Brandschutztechnische Untersuchung elektrisch angetriebener Fahrzeuge (Fahrzeugbrand unter Tage)
- H 1 Erstellung des betrieblichen Regelwerkes
(Vorgehensweise nach einem Brandereignis)
- H 2 Erstellung einer geschlossenen Brandschutzunterlage
- H 3 Einsatz von HRD-Löschanlagen und Prüfverfahren
- H 4 Grubenwehr
- H 5 Alternativen zum Einsatz von CO₂-Löschanlagen unter Tage
- H 6 Verringerung der Brandlast
- H 7 Beeinflussung der Wetterrichtung durch Brand eines Fahrzeuges
(unter Tage)
- H 8 Sicherheitstechnische Bewertung bezüglich des Explosionsschutzes
beim Einsatz von Energiespeichern

Entsprechend der Bearbeitung werden die Sachverhalte zum Brandschutz in den Kapiteln 6 (H 1, H 3-7) und 7 (Δ 22, H 2, H 8) behandelt.

3. Δ 23 Bewertung der Auswirkungen eines Brandes unter Tage auf die Integrität des Ausbaus. Dieses Thema ist Gegenstand von Kapitel 8.

4. Radionuklidausbreitung

- Δ 24 Radionuklidtransport in der Gasphase (Szenarien)
- Δ 25 Freisetzung von radioaktiven Gasen im Grubengebäude und Freisetzung der Gase aus dem Grubengebäude in die Geosphäre

- Δ 26 Radionuklidtransport in der Gasphase in der Geosphäre
- Δ 27 Untersuchung der Relevanz von Gas-Fracs für einen möglichen Radionuklidtransport in der Gasphase (Szenarien)
- Δ 28 Einfluss von Kolloiden auf den Transport von Radionukliden (Szenarien)
- Δ 29 Einfluss von Kolloiden auf den Transport von Radionukliden (Geosphäre)
- Δ 30 Überprüfung des Unterkreidepfades bezüglich des berücksichtigten Transportpfads
- Δ 31 Überprüfung des Unterkreidepfades bezüglich der Diffusion
- Δ 32 Überprüfung des Unterkreidepfades bezüglich der Sorption von Iod in der Oberkreide

Kapitel 9 des vorliegenden Berichts ist dem Thema Radionuklidausbreitung gewidmet.

5. Δ 33 Neuberechnung der Dosiskonversionsfaktoren (nach aktuell gültiger Strahlenschutzverordnung). Die Berechnung der Dosiskonversionsfaktoren ist Gegenstand von Kapitel 10.
6. Δ 34-35 Neuberechnung der Auswirkungen auf die Bevölkerung aufgrund geänderter Berechnungsgrundlagen (Störfallplanungswerte). Dieses Thema wird in Kapitel 11 behandelt.
7. Δ 36 Bewertung von zusätzlichen Systemen zur Vermeidung der Kollision eines Fahrzeuges mit einem Hindernis. Dies ist Gegenstand von Kapitel 12.
8. H 9 Bodenverflüssigung ist der Gegenstand von Kapitel 13.
9. H 10 Biologische Einwirkungen. Dieses Thema wird in Kapitel 14 behandelt.

3. Zum Prozess der unabhängigen wissenschaftlichen Begleitung

Im Zuge der unabhängigen wissenschaftlichen Begleitung sind dem UWB-Team Zwischenstände und Berichtsentwürfe der AN zugegangen. Diese wurden durch das UWB-Team kritisch kommentiert, u. a. mittels (ggf. vorläufiger) Prüfberichte. Austausche zu Arbeitsständen fanden auch in Meetings statt. Schlussendlich blieb es den AN überlassen, inwieweit sie sich Kritiken und Vorschläge des UWB-Teams zu eigen machten und in ihrer Arbeit berücksichtigten. Der vorliegende Bericht kann naturgemäß diesen Austausch und die Iterationen in Phase 2 der ÜSiKo nicht vollständig wiedergeben. In jedem Fall wird aber kenntlich gemacht, sofern unterschiedliche Auffassungen bis zum Ende des Arbeitsprozesses bestehen blieben und wie das UWB-Team die Ergebnisse der Bearbeitung durch die AN einschätzt.

Damit wurde auf Wunsch der BGE ein anderer Weg beschritten als in Phase 1 der ÜSiKo: In Phase 1 wurden fertige Berichte und abgeschlossene Arbeiten der AN einem unabhängigen Review und einer Bewertung unterzogen, ohne dass die AN auf diese Bewertung reagieren konnten. Die UWB der Phase 2 war dagegen auf eine Verbesserung der Qualität der Arbeitsergebnisse im laufenden Prozess ausgerichtet.

Der vorliegende Bericht bezieht sich auf die Arbeitsstände der Auftragnehmer (AN) und die entsprechenden Berichtsversionen zum Stichtag 24.10.2024 und berücksichtigt die Diskussionen beim ÜSiKo-Workshop am 23./24.10.2024. Änderungen, die in den Berichten der AN nach diesem Stichtag gegebenenfalls noch vorgenommen wurden, finden hier keine Berücksichtigung.

4. Nachweis der Unterkritikalität ($\Delta 1$ - $\Delta 7$)

4.1 Sachverhalt

Gegenstand der UWB ist der Bericht der AN (Rübel et al. 2023). Dieser befasst sich mit den Deltas $\Delta 1$ -7, die in den entsprechenden Berichten der Phase 1 (Rübel et al. 2019 für die Nachbetriebsphase, Pohl et al. 2019 für die Betriebsphase) folgendermaßen beschrieben wurden:

$\Delta 1$: Spaltstoffkonzentration durch Ausfällung im Grubengebäude

$\Delta 2$: Spaltstoffkonzentration durch Ausfällung in der Geosphäre

$\Delta 3$: Nachweis der Kritikalitätssicherheit für alle höheren Actinoide

$\Delta 4$: Nachweis der Kritikalitätssicherheit bei der Anwesenheit spezieller Moderator-materialien

$\Delta 5$: Neue Version von ANSI/ANS-8.15, Erweiterung der Spaltstoffliste

$\Delta 6$: Neue Version von ANSI/ANS-8.15, Änderung bei den kleinsten kritischen Massen

$\Delta 7$: Bewertung heterogener Spaltstoffanordnungen

Die AN kommen hinsichtlich von $\Delta 2$ zu dem Schluss, dass eine Kritikalität in allen Fällen ausgeschlossen werden kann, außer durch Bildung einer Ningyoit-Phase beim Übertritt uranhaltiger Lösungen aus dem direkten Lagerbereich in die Geosphäre (Rübel et al. 2023). Um auch diesen vermeiden zu können, wird eine Vorgabe für die Einlagerung (Stapelanweisung) vorgeschlagen.

Aus der Bearbeitung von $\Delta 3$ und $\Delta 4$ leiteten die AN Empfehlungen zur Einlagerung von Am-243 ab, die auf den Ausschluss einer kritischen Anordnung des daraus entstehenden U-235 hinwirken sollen.

Zu $\Delta 5$ empfehlen die AN eine niedrigere Begrenzung der Menge an Pu-244 in den Abfallgebänden, als sie derzeit in den Einlagerungsbedingungen vorgesehen ist.

$\Delta 1$, $\Delta 6$ und $\Delta 7$ wurden als nicht sicherheitsrelevant bewertet.

4.2 Ergebnisse der UWB

Sicherstellung der Unterkritikalität in der Nachbetriebsphase

Die Empfehlungen aus Phase 1 der ÜsiKo wurden vollständig umgesetzt. Im Rahmen der UWB wurden sowohl die Umsetzung der Empfehlungen aus Phase 1 überprüft, als auch neue Aspekte berücksichtigt, die sich bei Review des neuen Berichts (Rübel et al.2023) ergeben haben.

In Bezug auf $\Delta 1$ und auch $\Delta 2$ sollten nach Meinung des UWB-Teams soweit möglich realistische Modelle zur Löslichkeitslimitierung hinzugezogen werden und Konservativitäten in den Annahmen abgebaut werden. U. a. wird bei der Berechnung der Kritikalität von einer unendlichen Anordnung ausgegangen, was aber nicht der Realität entspricht.

Während in den meisten Fällen trotz der gewählten Konservativitäten eine Kritikalität ausgeschlossen werden kann, ist dies bei der Nachbildung von U-235 aus Pu-239 und der nachfolgenden Ausfällung von Ningyoit nicht mehr der Fall, ohne Bedingungen an die Art der Einlagerung (Stapelanweisung) zu stellen. Hier wäre ein Abbau von konservativen Annahmen hinsichtlich der gleichzeitigen Auflösung, Mobilisierung und Ausfällung sowie des Transports nur in eine Richtung in die Geosphäre zu prüfen. Auch ist die maximal zu erwartende Konzentration des Ningyoits in der Geosphäre mit einem Wert von 10 % Porosität gerechnet und ergibt daher 470 g/l_v.

Rübel et al. (2023) berechnen die minimal erforderliche relative Massenkonzentration von U-235 in einem (U-235/U-238)-Gemisch, die für eine Kritikalität bei Ausfällung einer Ningyoitphase notwendig ist. Bei ca. 470 g/l Festphase im Porenraum sind 5,3 % U-235 erforderlich. Bei noch kleineren Anreicherungen ist keine Kritikalität möglich.

Im Mittel enthalten die Abfälle nur einen relativen Massenanteil von etwas über 1% U-235. Jedoch, so argumentieren Rübel et al. (2023), können einzelne Gebinde einen Wert auch über 5,3% erreichen. Einen möglichen weiteren Beitrag kann nach langen Zeiten radiogenes U-235 (aus Pu-239) leisten. Hieraus wird gefolgert, dass eine Kritikalität nicht mit Sicherheit auszuschließen ist. Man solle daher vermeiden, mehrere Fässer mit einem Anreicherungsgrad von mehr als 5,3% (inklusive radiogenem U-235) dicht nebeneinander zu stapeln und somit Kredit von einer Vermischung mit niedriger angereichertem Uran in benachbarten Fässern nehmen, die nach einer Auflösung und Transport auftreten wird.

All diesen Berechnungen liegen noch die Annahmen (a) einer unendlich ausgedehnten Anordnung mit (b) der o.g. sehr hohen Festphasenkonzentration zugrunde. Es wäre zu prüfen, wie viele Fässer komplett desintegrieren, womit das gesamte Uran erst mobilisiert

und dann an einem scharfen pH-Gradienten ausgefällt werden müsste, um sowohl approximativ Annahme (a) und exakt Annahme (b) zu erfüllen. Die UWB schlägt eine realistischere Modellierung vor.

Diese sollte beinhalten:

(i) Eine Berechnung der Größe und zu erwartenden geometrischen Form der Ninygot-Phase. Diese wird räumlich begrenzt durch die endliche Ausdehnung des pH-Gradienten.

(ii) Da der Gradient senkrecht zur Ausbreitungsrichtung sein muss, wird die geometrische Form auch signifikant von der für Kritikalität günstigen Kugelform abweichen. Dies senkt den Neutronenmultiplikationsfaktor.

(iii) Eine solche realistische (endliche) Geometrie sorgt für Neutronenverluste an den Rändern und somit zu einer Senkung des Neutronenmultiplikationsfaktors gegenüber endlicher Ausdehnung.

Erst wenn aufgrund dieser realistischeren Modellierung das Erreichen einer Kritikalität immer noch nicht ausgeschlossen werden kann, ist eine Stapelanweisung zu empfehlen.

Zu $\Delta 1$ wird durch das UWB-Team angemerkt, dass hinsichtlich Reversibilität zwischen Physisorption und Chemisorption (out sphere / inner sphere / incorporation) zu unterscheiden ist. Speziell beim vierwertigen Pu ist die Sorption nicht unbedingt schnell reversibel. Es wird sicherlich strong sites geben, und daher hängt der K_D von der Konzentration ab. Es ist aber fraglich, ob man in die Bereiche sehr hoher Konzentration kommt, ohne dass Ausfällung stattfindet (Oberflächenpräzipitation). Die Löslichkeit von Pu(IV) ist sehr niedrig. Daher sollte eine Langmuir-Isotherme angewendet werden, die eine Sättigung der Sorptionsplätze berücksichtigt.

Für weitere Arbeiten zu $\Delta 2$ sollte die aktuelle thermodynamische Datenbank des Paul-Scherrer-Institut (PSI, Nagra 2023) genutzt werden. Es handelt sich um die vielleicht beste Referenzdatenbasis mit thermodynamischen Daten für 53 Elemente, 1'034 wässrige Spezies (und SIT-Ionen-Interaktionskoeffizienten für alle Spezies), 358 Feststoffe und 8 Gase.

Auch bei den Arbeiten zu $\Delta 3$ wurde überkonservativ gearbeitet: Bei einer Lösungsmenge von 0 g/l wird ein trockener Festkörper unterstellt, also von dem Fall ausgegangen, der bei der Bearbeitung von $\Delta 1$ bereits argumentativ ausgeschlossen wurde. Außerdem erschließt sich nicht intuitiv, wieso die vollständige Abwesenheit des Moderators Wasser den Neutronenmultiplikationsfaktor für U-235 erhöht. Das sollte plausibilisiert werden. Auch hier erfolgte die (unrealistische) Annahme hoher U-235 Isotope.

Alle Rechnungen wurden unter Annahme einer unendlich ausgedehnten Anordnung durchgeführt. Dies führt zu Bedingungen für die Konzentration, ist aber nicht auf beliebig kleine Massen skalierbar. Es wäre also zu zeigen, dass dieser Effekt einer nicht homogenen Verteilung innerhalb eines Containers bei vergleichsweise geringen absoluten Massen tatsächlich zu einer Kritikalität führt, auch bei einer in diesem Fall sehr kleinen und keinesfalls unendlich ausgedehnten Anordnung.

Bei $\Delta 4$ sollte beachtet werden, dass ein vollständiger Austausch des gebundenen leichten Wasserstoffs (H) durch schweren Wasserstoff (D) unter den vorliegenden Bedingungen chemisch völlig unmöglich ist, es widerspricht nicht nur der Thermodynamik, sondern auch dem Massenwirkungsgesetz.

Resümee: Das UWB-Team folgt den Einschätzungen der AN zu $\Delta 1-3$ mit den oben angegebenen Einschränkungen. $\Delta 4$ wurde extrem konservativ bearbeitet, indem z.B. unmögliche Austausch-Reaktionen gefordert wurden. Das UWB sieht bei der Betrachtung von Americium große Konservativitäten, so dass wohl kein ernsthaftes materielles Problem zu erwarten ist. Der Abbau der Konservativitäten, um dies tatsächlich zu zeigen, ist jedoch nicht trivial und herausfordernd. Der bei der Diskussion zentrale Punkt ist die Bildung einer Ningyoit-Phase beim Transport uranhaltiger Lösung aus dem Einlagerungsbereich in die Geosphäre. Hier wird ein auf kleinsten räumlichen Skalen ablaufender pH-Sprung unterstellt. Aus der Natur sind tatsächlich in einigen Fällen starke pH-Gradienten bekannt. Sollte tatsächlich das Ausfallen der U-haltigen Lösung und die Bildung des Festkörpers in einem sehr engen Bereich erfolgen und damit eine vergleichsweise hohe lokale Konzentration überschritten werden, so gilt die von den AN gemachte Annahme einer unendlich ausgedehnten Anordnung nicht mehr, was den Neutronenmultiplikationsfaktor senkt. Die UWB empfiehlt daher dringend eine realistische 3-dimensionale Modellierung sowohl des reaktiven Transports als auch der Neutronenmultiplikation in endlicher Geometrie. Weiterhin wäre eine Sensitivitätsanalyse zu erstellen bzgl. der Ausbreitungspfade, da nicht zwingend sowohl das gesamte Uran zu einem festen Zeitpunkt gleichzeitig gelöst und verfügbar ist und zudem noch in nur eine Richtung transportiert wird.

Sicherstellung der Unterkritikalität in der Betriebsphase

Zu $\Delta 5$ ist anzumerken, dass die im Bericht der AN geforderte Menge Pu-244 zum Erreichen der Kritikalität unrealistisch hoch ist. Zur Bearbeitung der $\Delta 6$ und 7 gibt es keine Hinweise des UWB.

Resümee: Das UWB folgt den AN hinsichtlich der Bearbeitung der Δ 5-7. Das Entstehen einer kritischen Anordnung ist also in der Betriebsphase des Endlagers Konrad bei Einhaltung der Endlagerbedingungen auch unter Berücksichtigung der Erweiterung der Spaltstoffliste der ANSI/ANS-8.15 (2014) oder bei Betrachtung einer Heterogenität der Anordnung nicht zu unterstellen.

5. Mensch-Technik-Organisation (MTO, Δ 8-Δ 21)

5.1 Sachverhalt

Gegenstand der Prüfung zum Thema „MTO“ ist der Bericht (Arnold et al. 2024a). Der Bericht umfasst die Analyse von 14 Deltas (Delta 8 bis 21) aus Phase 1 der ÜsiKo.

Das Delta 8 empfiehlt die Durchführung einer ganzheitlichen, voreilenden MTO-Analyse. Die übrigen Deltas empfehlen jeweils die Einbeziehung bestimmter Ereignisabläufe in die voreilende MTO-Analyse.

Der AN führt die MTO-Analyse mit dem HAZOP-Verfahren (Hazard and Operability) durch. Die Festlegung auf diese Methode basiert auf einer bereits abgeschlossenen Studie (Miller et al. 2021), in der unterschiedliche Methoden für eine voreilende MTO-Analysen untersucht wurden. „Die HAZOP-Methode wurde dabei als für diese Untersuchung am besten geeignete Methode bewertet“ (Arnold et al. 2024a).

Der AN hat für jede Analyse ein HAZOP-Team zusammengestellt, das die für die Bearbeitung benötigten Fachkenntnisse abdeckt. Die Durchführung der HAZOP-Sitzung ist jeweils stichwortartig in einem tabellarischen Überblick dokumentiert. Zur Erläuterung liegt ein ausführlicher Bericht vor. Es wurden insgesamt sieben HAZOP-Analysen durchgeführt. Der Aufteilung liegt die zeitliche und räumliche Abfolge der Abläufe im Endlager Konrad zugrunde. Ausgangspunkt sind die in der Sicherheitsanalyse im Planfeststellungsverfahren betrachteten Ereignisse. Der AN schließt die Ereignisse aus, die nach aktuellem Planungsstand der Abläufe im Endlager nicht mehr auftreten können sowie Vorgänge, welche nicht im regulären Einlagerungsbetrieb stattfinden.

Mittels HAZOP-Analyse werden denkbaren Abweichungen von den geplanten Abläufen untersucht und darauf bezogene sicherheitsgerichtete Maßnahmen abgeleitet. Eine Empfehlung wird schließlich nur für Maßnahmen abgegeben, die eine hohe Sicherheitsbedeutung haben. Diese Bewertung berücksichtigt auch die bereits vorhandenen Schutzvorkehrungen sowie die Wirkung der empfohlenen Maßnahme. Der AN hat drei Maßnahmen mit hoher Sicherheitsbedeutung identifiziert. Dabei handelt es sich um Maßnahmen, die ergänzend zu den bereits vorhandenen Schutzvorkehrungen nachgerüstet werden können.

5.2 Ergebnisse der UWB

Die Festlegung auf die HAZOP-Methode erfolgte in einer zuvor abgeschlossenen Studie (Miller et al. 2021). Die UWB hat diese Studie nicht geprüft, kann jedoch allgemein bestätigen, dass das HAZOP-Verfahren eine bewährte Methode für Sicherheitsanalysen ist. Der

AN setzt die HAZOP-Methode systematisch und mit einer an die vorliegende Fragestellung angepassten Vorgehensweise um. Den ganzheitlichen Ansatz einer MTO-Analyse, die Einflussfaktoren aus den Bereichen Mensch, Technik und Organisation einschließt, hat der AN in seiner Konzeption der HAZOP-Sitzungen berücksichtigt.

Die relevanten Abläufe im Endlager und deren räumliche Zuordnung sind vollständig und auf aktuellem Planungsstand berücksichtigt. Die Aufteilung der MTO-Analyse in Teilbereiche, für die jeweils separate HAZOP-Analysen durchgeführt werden, ist nachvollziehbar und sachgerecht. Diese Struktur hat zur Folge, dass die Umsetzung der Deltas nur in einer Gesamtschau aller HAZOP-Analysen nachvollzogen werden kann. Ein Anschluss an die Ergebnisse der Phase 1 der ÜsiKo ist aber anhand einer tabellarischen Zuordnung im Bericht möglich.

Die Qualität der mit dem HAZOP-Verfahren erzielten Ergebnisse wird maßgeblich durch die Zusammensetzung und die Zusammenarbeit des Expertenteams sowie durch die Moderation der HAZOP-Sitzungen beeinflusst. Die fachliche Kompetenz des Expertenteams ist entsprechend der Vorstellung der Mitglieder im AN-Bericht gegeben. Der Ablauf der Sitzungen und dessen Einfluss auf das Ergebnis können aber hier nicht im Detail beurteilt werden. Das UWB-Team war an der Planung und Durchführung der HAZOP-Sitzungen nicht beteiligt. Die Analyseschritte beruhen i. W. auf einer Einschätzung des HAZOP-Teams und sind daher nur eingeschränkt für eine externe Bewertung zugänglich. Im Rahmen der UWB lässt sich jedoch die Plausibilität der Ergebnisse unter Einbeziehung der insgesamt bekannten Informationen zu den Abläufen im Endlager Konrad bewerten.

Der AN bewertet nicht alle der in den Deltas aus Phase 1 der ÜsiKo zugeordneten Ereignisse. Der Ausschluss von Ereignissen einerseits aufgrund der zwischenzeitlich fortgeschrittenen Planungen und andererseits aufgrund der Berücksichtigung vorhandener und bereits bewerteter Sicherheitsvorkehrungen ist angemessen für die Zwecke der ÜsiKo. Vorgänge, welche nicht im regulären Einlagerungsbetrieb stattfinden, betrachtet der AN ebenfalls nicht. Dies ist dann gerechtfertigt, wenn damit kein relevantes Störfallpotential verbunden ist. Für die konkret erwähnten Abläufe im Sonderbehandlungsraum ist dies nachvollziehbar, da dort nach Aussagen der BGE inzwischen keine Konditionierungsarbeiten mehr vorgesehen sind. Weitere Abläufe, die nicht im regulären Einlagerungsbetrieb stattfinden, sind im AN-Bericht nicht erwähnt.

Insgesamt sind die Ergebnisse der HAZOP-Analysen plausibel und mit den vom AN zusätzlich beigetragenen Erläuterungen nachvollziehbar. Die Maßnahmenempfehlungen sind der Methodik entsprechend systematisch eingeordnet und zielgerichtet. Hinweise auf

Ereignisabläufe, die durch die vorhandene Sicherheitsbetrachtung nicht abgedeckt sind, haben sich aus der erweiterten Betrachtung, die die MTO-Aspekte einschließt, nicht ergeben. Die letztlich vom AN empfohlenen Maßnahmen könnten ergänzend zu den bereits vorhandenen oder geplanten Schutzvorkehrungen realisiert werden und punktuell einen zusätzlichen Beitrag zur Sicherheit leisten. Die UWB spricht keine Empfehlung bezüglich der weiteren Ausgestaltung und Umsetzung dieser Maßnahmen aus.

Zur Gewährleistung eines sicheren Betriebs ist u. a. ein integriertes Managementsystem, das der Sicherheit einen besonderen Stellenwert einräumt, einzuführen und kontinuierlich zu verbessern. Ein solches Managementsystem ist auch eine Voraussetzung für eine hohe Wirksamkeit der vom AN in der MTO-Analyse betrachteten vorhandenen, geplanten oder zusätzlich empfohlenen Maßnahmen und Vorkehrungen. Der Bericht des AN geht nicht auf die Integration in das Managementsystem ein. Im Text gibt es Verweise auf die Maßnahmen zur Verkehrslenkung unter Tage und das Zechenbuch/Betriebshandbuch (ZB/BHB). Diese Regelungen sind jedoch nicht abdeckend für den Gesamtumfang eines Managementsystems. Die UWB betont die Notwendigkeit der Implementierung eines integrierten Managementsystems für den Betrieb des Endlagers, das die besonderen Erfordernisse der nuklearen Sicherheit berücksichtigt. Diese Aufgabe bleibt als eine Voraussetzung für den sicheren Betrieb bestehen.

Anmerkung:

Von den in Phase 1 der ÜsiKo abgeleiteten Deltas betrifft auch das Delta 36 die MTO-Analyse. Dies ist durch die Aufgabenstellung für das AN-Gutachten nicht abgedeckt.

6. Brandschutz, Teil 1

Gegenstand der Prüfung zum Thema „Brandschutz“ ist die Stellungnahme der BGE (BGE 2022). Die Stellungnahme umfasst die Hinweise 1 und 3 bis 7 aus Phase 1 der ÜsiKo, die Brandschutzaspekte in der Betriebsphase des Endlagers Konrad betreffen.

6.1 Sachverhalt

Die BGE hat untersucht, ob aufgrund der Hinweise und unter Berücksichtigung des aktuellen Standes von Wissenschaft und Technik sowie der aktuellen Planungen Abweichungen von den Sicherheitsanalysen, die dem Planfeststellungsverfahren zugrunde lagen, bestehen. Insgesamt bewertet die BGE die Hinweise 1 sowie 3 bis 7 als nicht sicherheitsrelevant. Modifikationen von Anlagen, Betriebsweisen oder Sicherheitsmaßnahmen sind demnach nicht erforderlich.

Zu den Hinweisen im Einzelnen:

Hinweis 1: Erstellung des betrieblichen Regelwerkes (Vorgehensweise nach einem Brandereignis)

Die BGE hat ein Konzept zur Vorgehensweise bei der Bergung von Abfallgebinden nach einem Brandereignis erstellt. Die Grundzüge dieses Konzepts sind im BGE-Bericht erläutert. Das Konzept soll weiter ausgearbeitet und in dem noch zu erstellenden ZB/BHB für den Einlagerungsbetrieb umgesetzt werden.

Hinweis 3: Einsatz von HRD-Löschanlagen und Prüfverfahren

Die BGE verfolgt diesen Hinweis nicht weiter, da der Einsatz von alternativen Löschanlagen keinen sicherheitsrelevanten Vorteil bringt.

Löschanlagen mit High Rate Discharge (HRD) werden zur Bekämpfung von Entstehungsbränden unter Tage eingesetzt und entsprechen dem aktuellen angemessenen Stand von Wissenschaft und Technik. Sie sind im Land Niedersachsen durch das Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie anerkannt und haben sich auf Untertagefahrzeugen bewährt. Ein Nachweis der Löschwirksamkeit ist daher aus Sicht der BGE nicht notwendig. Das im Hinweis angesprochene Prüfverfahren zum Nachweis der Löschwirksamkeit wäre auch bei einem HRD-Löschanlagen grundsätzlich anwendbar, die Testszenarien sind jedoch nicht abdeckend für Wettergeschwindigkeiten in befahrenen Strecken unter Tage.

Als Löschmittel kommen grundsätzlich Wasser, Pulver, Schaum und (Inert-) Gas in Frage. Unter Berücksichtigung der spezifischen Eigenschaften und der Randbedingungen unter Tage ergeben sich aber keine eindeutigen Vorteile für ein alternatives Löschesystem.

Eine hohe Verfügbarkeit der vorhandenen Löschanlage ist durch einen Vertrag zur Prüfung und Wartung der Anlage sichergestellt, den die BGE mit dem Hersteller abgeschlossen hat.

Hinweis 4: Grubenwehr

Der Hinweis zielt auf eine Überprüfung der notwendigen Personalstärke und der Interventionszeit der Grubenwehr. Die BGE erläutert, dass sich die Vorgaben für Organisation, Ausstattung und Einsatz von Grubenwehren seit der Erstellung des Brandschutzmemorandums für das Endlager Konrad nicht verändert haben. Demnach besteht die Anforderung, die notwendige Personalstärke an die Anforderungen des jeweiligen Betriebs anzupassen. Eine Interventionszeit ist im Regelwerk nicht vorgegeben. Aktuell ist eine Ausstattung mit 35 Personen geplant, die über die im Brandschutzmemorandum genannte Mindestanforderung von 20 Personen hinausgeht.

In den jährlich durchgeführten Alarmübungen wurde die Alarmzeit von 30 Minuten bisher immer eingehalten. Die Einsatzbereitschaft der Grubenwehr ist aus Sicht der BGE dadurch nachgewiesen.

Ergänzend weist die BGE darauf hin, dass die Einhaltung der Vorgaben zur Grubenwehr den zuständigen Behörden gegenüber nachzuweisen ist. Eine Überprüfung erfolgt darüber hinaus im Rahmen der behördlichen Aufsicht.

Hinweis 5: Alternativen zum Einsatz von CO₂-Löschanlagen unter Tage

Aufgrund des Verbots FCKW-haltiger Löschmittel berücksichtigte die Planung der BGE seit 1991 in stationären Anlagen unter Tage ursprünglich nur CO₂ als Löschmittel. Die inzwischen verfügbaren FCKW-freien Löschmittel und Hochdruck-Wassernebel-Löschanlagen entsprechen dem heutigen Stand der Technik und sollen nach derzeitigem Planungsstand im Endlager Konrad als stationäre Löschanlagen eingesetzt werden. Die Umrüstung hat keine nachteilige Auswirkung auf die Wirksamkeit der Brandbekämpfung. Dem Änderungsantrag wurde von der zuständigen Behörde zugestimmt.

Hinweis 6: Verringerung der Brandlast

Die Verwendung kunststoffgefüllter Reifen sowie der Einsatz schwer entflammbarer Hydraulikflüssigkeiten sind mögliche Maßnahmen, die sich positiv auf das Brandverhalten

bzw. den Brandablauf auswirken würden (langsamerer Abbrand, geringere maximale Temperatur). Die Brandlast würde jedoch in beiden Fällen erhöht und die Branddauer würde verlängert. Der Einsatz schwer entflammbarer Hydraulikflüssigkeiten würde sich zudem nachteilig auf die Konstruktion und die Betriebssicherheit der Fahrzeuge auswirken und hätte einen erhöhten Bauteilverschleiß zur Folge. Nach Abwägung der Vor- und Nachteile kommt die BGE zu dem Ergebnis, die Vorschläge nicht umzusetzen. Die Sicherheit der Anlage würde durch die vorgeschlagenen Maßnahmen nicht erhöht werden.

Der außerdem vorgeschlagene Einsatz eines elektrobetriebenen Reservefahrzeugs ist in den aktuellen Planungen der BGE berücksichtigt. Die Einlagerungstransportfahrzeuge werden auf Elektroantrieb umgestellt.

Hinweis 7: Beeinflussung der Wetterrichtung durch Brand eines Fahrzeuges

Im Rahmen der wettertechnischen Planungen zur Errichtung des Endlagers Konrad wurden Wetternetzuntersuchungen für den Fall eines offenen Grubenbrandes angefertigt. Die Berechnungen wurden später an die auf Basis des Planfeststellungsbeschlusses veränderten Bedingungen bezüglich Abfallgebinderolumen und Einlagerungsraum angepasst. Basierend auf dem aktuellen Bewetterungszustand hat die BGE neue Berechnungen der wettertechnischen Auswirkungen eines offenen Brandes infolge einer Kollision eines Dieselfahrzeugs mit einem anderen Fahrzeug vorgelegt. Nach dem Ergebnis der Berechnungen hat das veränderte Grubengebäude eine weitaus günstigere Druckverteilung im Vergleich zu den Aussagen in der Genehmigungsunterlage. Die Auswirkungen des zu unterstellenden Brandereignisses auf die Wetterführung sind somit beherrschbar. Außerdem wird die genehmigungskonforme Bewetterungssituation in der Inbetriebsetzungsphase unter Hinzuziehung von Sachverständigen überprüft.

6.2 Bewertung der UWB

Die BGE hat alle durch die Aufgabenstellung vorgegebenen Hinweise bearbeitet. Die UWB bestätigt die Gesamteinschätzung der BGE, dass sich aus den Hinweisen unter Berücksichtigung des aktuellen Stands der Planungen keine für die Störfallbetrachtung relevante Abweichungen ergeben haben.

Zu den Hinweisen im Einzelnen

Hinweis 1

Das von der BGE beschriebene Konzept zur Vorgehensweise bei der Bergung von Abfallbinden nach einem Brand bewertet die UWB als grundsätzlich geeignet, den Hinweis

aus Phase 1 der ÜsiKo umzusetzen. Eine abschließende Bewertung ist erst nach Konkretisierung und Integration in die betrieblichen Regelungen möglich. Diesbezüglich verweist das UWB-Team auf den weiteren Ablauf des Verfahrens, in dem eine Prüfung des ZB/BHB durch den hinzugezogenen Sachverständigen erfolgt.

Hinweis 3

Ausgehend vom heutigen Stand der Technik hat die BGE schlüssig dargestellt, dass die für die Untertagefahrzeuge vorgesehenen HRD-Löschanlagen unter den dort gegebenen Bedingungen auch aus heutiger Sicht geeignet sind. Die als Alternativen betrachteten Löschmittel bringen unter Berücksichtigung der Gegebenheiten im Endlager Konrad keine wesentlichen bzw. keine ausschließlichen Vorteile. Ebenso ist schlüssig, dass das zur Prüfung der Löschwirksamkeit vorgeschlagene Verfahren unter den Bedingungen im Endlager Konrad nicht anwendbar ist.

Die UWB bestätigt, dass sich aus der vertraglich abgesicherten Festlegung auf das Löschesystem eines Herstellers über einen absehbaren Zeitraum keine Nachteile bezüglich der Verfügbarkeit des Systems ergeben. Der Hinweis 3 ist insoweit umgesetzt. Der Bericht der BGE geht aber nicht konkret auf die Frage nach der Flexibilität zur Umstellung eine zukünftig ggf. verfügbare Systemtechnik ein. Damit könnten die Voraussetzungen für eine langfristige Verfügbarkeit aufgezeigt werden.

Hinweis 4

Die BGE hat die Konformität der Planungen mit dem aktuellen Regelwerk zutreffend dargestellt. Bezüglich ggf. notwendiger Anpassungen bei einem fortgeschrittenen Planungsstand verweist die UWB auf die Prüfungen im weiteren Ablauf des Verfahrens und im Rahmen der Aufsicht über den Betrieb des Endlagers. Dabei wird der jeweils aktuelle Stand der Anforderungen berücksichtigt werden. Der Hinweis ist umgesetzt.

Hinweis 5

Ein Einsatz von CO₂-Löschanlagen unter Tage ist in den Neuplanungen für stationäre Löschanlagen nicht mehr vorgesehen. Der Ersatz bzw. die Umrüstung der vorhandenen CO₂-Löschanlagen soll bis zur Inbetriebnahme des Endlagers abgeschlossen sein. Mit dieser Umrüstung entfällt die Veranlassung für den Hinweis 5.

Hinweis 6

Die BGE übernimmt den Vorschlag zur Verringerung der Brandlasten nicht. Die betrachteten Maßnahmen (kunststoffgefüllte Reifen, schwer entflammbares Hydrauliköl) können

entsprechend der Darstellung im Bericht sowohl positive als auch negative Auswirkungen auf den Brandverlauf haben. Eine eindeutige Empfehlung zur Umrüstung der Fahrzeuge kann auch aus Sicht der UWB aus den dargestellten Sachverhalten nicht abgeleitet werden.

Hinweis 7

Die BGE hat eine Wetternetzuntersuchung vorgelegt, die auf dem aktuellen Bewetterungszustand basiert. Darin wird für das veränderte Grubengebäude eine im Vergleich zu den vorhergehenden Betrachtungen, weitaus günstigeren Druckverteilung ermittelt. Für die UWB ist plausibel dargestellt, dass das unterstellte Brandereignis durch die Störfallbetrachtung abgedeckt ist. Der Hinweis ist umgesetzt.

7. Brandschutz, Teil 2

Gegenstand der UWB ist die Stellungnahme der BGE (BGE 2023). Die Stellungnahme umfasst die Bearbeitung des Delta 22 sowie der Hinweise 2 und 8.

7.1 Brandschutztechnische Untersuchung elektrisch angetriebener Fahrzeuge (Fahrzeugbrand unter Tage) (Δ 22)

7.1.1. Sachverhalt

Der Fahrzeugbrand eines dieselbetriebenen Einlagerungstransportwagens ist ein Auslegungsstörfall. Die derzeitigen Planungen sehen den Einsatz eines elektrisch angetriebenen Transportwagens vor. Das in der aktuellen Untersuchung betrachtete Brandszenario berücksichtigt die material- und brandspezifischen Eigenschaften sowie weitere Randbedingungen im Endlager. Die Randbedingungen wurden mit großen Konservativitäten, insbesondere bezüglich der angenommenen Brandlasten, festgelegt. Im Vergleich zeigt sich, dass die Brandlast des Elektrofahrzeugs insgesamt deutlich niedriger als die des Dieselfahrzeugs ist.

Der Brandverlauf wurde in der Störfallbetrachtung in einer Modellkurve als Temperatur-Zeit-Verlauf (PTB-Kurve) dargestellt. Diesem Verlauf werden die mit den aktuellen Simulationsrechnungen ermittelten Temperaturen und Temperaturverläufe gegenübergestellt. Die gemittelten Gastemperaturen liegen nur in einem kleinen Zeitbereich und unter speziellen Randbedingungen oberhalb der Kurve für den Auslegungsstörfall. Bezüglich der Auswirkungen ist der berechnete Temperaturverlauf weiterhin durch die Annahmen der Störfallbetrachtung abgedeckt. Die Umrüstung auf das Elektrofahrzeug stellt für den thermischen Auslegungsstörfall unter Tage aus Sicht der BGE eine unwesentliche Veränderung dar und es ergeben sich keine erheblichen Auswirkungen auf das Sicherheitsniveau.

7.1.2. Bewertung der UWB

Die in Δ 22 empfohlene brandschutztechnische Untersuchung elektrisch betriebener Fahrzeuge hat die BGE durchgeführt und im Bericht (BGE 2023) dargestellt.

Die Randbedingungen für den Auslegungsstörfall werden zutreffend aus der vorhandenen Störfallanalyse übernommen. Aufgrund der Erläuterung der eingeführten Konservativitäten ist es plausibel, dass die Brandlasten in der aktuellen Untersuchung deutlich überschätzt werden. Darüber hinaus ist ersichtlich, dass die Randbedingungen unter Tage, die mit ungünstigen Annahmen angesetzt wurden, zusätzlich zur Konservativität der Ergeb-

nisse beitragen. Mit den Berechnungen der Wärmefreisetzung und des Temperaturverlaufs ist für die UWB nachgewiesen, dass die Auswirkungen des Szenarios durch den Auslegungsstörfall abgedeckt und keine zusätzlichen Betrachtungen erforderlich sind.

7.2 Erstellung einer geschlossenen Brandschutzunterlage (H 2)

7.2.1. Sachverhalt

Die BGE stellt, wie im Hinweis vorgeschlagen, die Brandschutzmaßnahmen für die Gebäude, die untertägigen Anlagen sowie die wesentlichen Brandschutzsysteme in einer geschlossenen Unterlage zusammen. Die Unterlage ist in Erstellung und wird bei Bedarf unter Einhaltung des aktuellen Standes des technischen Regelwerkes errichtungsbegleitend fortgeschrieben. Mit Bezug auf den ergänzenden Hinweis aus Formblatt 2.1.2.3 „Fahrzeugbrand über Tage“ bestätigt die BGE, dass zu diesen Unterlagen auch die Maßnahmen zum Brandschutz für bzw. an Fahrzeugen gehören.

In Phase 1 der ÜSiKo wurde gingen Campo et al. (2019) davon aus, dass eine Detailprüfung in den nachgeordneten Verfahren zur Erteilung der baurechtlichen Genehmigung sowie zur bergrechtlichen Genehmigung von Betriebsplänen erfolgt. Die BGE korrigiert diese Annahme insoweit, dass diesbezüglich keine nachgeordneten Verfahren stattfinden. Die BGE weist darauf hin, dass im laufenden Prozess die Planungsunterlagen unter Berücksichtigung der vorliegenden Genehmigung sowie auf Einhaltung des aktuellen Standes des technischen Regelwerkes von einem von der BGE beauftragten Sachverständigenbüro überprüft werden.

7.2.2. Bewertung der UWB

Die BGE hat den Vorschlag aus Hinweis 2 aufgegriffen und stellt alle Brandschutzmaßnahmen in einer geschlossenen Unterlage zusammen. Die Unterlage ist in Bearbeitung. Die Umsetzung des Hinweises muss zu gegebener Zeit für den abschließenden Stand dieser Unterlage bestätigt werden. Diese Prüfung wird jedoch nicht im weiteren Ablauf des Verfahrens von behördlicher Seite erfolgen, sondern soll durch einen von der BGE zugezogenen Sachverständigen vorgenommen werden. Aus fachlicher Sicht bestehen dagegen keine Einwände.

7.3 Sicherheitstechnische Bewertung bezüglich des Explosionsschutzes beim Einsatz von Energiespeichern (H 8)

7.3.1. Sachverhalt

Zum Zeitpunkt der Phase 1 der ÜsiKo lag keine Planung für den elektrisch angetriebenen Transportwagen vor. Dementsprechend erfolgte dort keine Bewertung hinsichtlich des Explosionsschutzes. Die weiter konkretisierten Planungen sehen jetzt den Einsatz eines elektrisch angetriebenen Transportwagens mit Li-Ionen-Batterien als Energiespeicher vor. Das BASE hat dem Änderungsantrag zu der geplanten Umrüstung zugestimmt. Im Bescheid ist festgelegt, dass vor der Abnahme- und Funktionsprüfung der Nachweis zu erbringen ist, dass die Li-Ionen-Batterien keine explosionsfähigen Bestandteile freisetzen und die Randbedingungen der Störfallanalyse, die dem Planfeststellungsverfahren zugrunde lag, eingehalten werden.

7.3.2. Bewertung der UWB

Der Einsatz eines batteriebetriebenen Transportwagens wurde von der BGE beantragt und zwischenzeitlich vom BASE genehmigt. Die Aspekte des Explosionsschutzes wurden in diesem Verfahren geprüft. Die Einhaltung der Erfordernisse des Explosionsschutzes ist durch entsprechende Nachweispflichten sichergestellt. Der Hinweis 8 ist umgesetzt.

8. Brand Ausbau (Δ 23)

Gegenstand der UWB ist der Bericht (TÜV SÜD 2024). Der Bericht umfasst die Bearbeitung des Delta 23 aus Phase 1 der ÜSiKo.

8.1 Sachverhalt

In der Störfallbetrachtung für das Planfeststellungsverfahren wurde für den Brand eines mit Abfallgebinden beladenen Transportfahrzeugs unter Tage eine Modellkurve für den Temperatur-Zeit-Verlauf (PTB-Kurve) an der Oberfläche des Abfallgebindes festgelegt. Die Temperatureinwirkung auf den Ausbau wurden nicht betrachtet.

TÜV SÜD (2024) hat in der aktuellen Untersuchung für die drei Ausbausysteme den Temperaturverlauf an den Firsten im Ausbau in einem dreidimensionalen Modell abgebildet und die Auswirkungen bewertet. Die Ansätze und die Herleitungen des Temperaturverlaufs basieren auf der vorhandenen Störfallbetrachtung und wurden nach aktuellem Kenntnis- bzw. Planungsstand ergänzt. Die Berechnungen ergeben beim Ausbau in Beton bis in eine Tiefe von ca. 11 cm (Beton einschalig) bzw. 7,3 cm (Beton zweischalig) Druckspannungen, die größer als die Betondruckfestigkeiten sind. Mit oberflächlichen Abplatzungen von ca. 20 cm Durchmesser und einer Masse in der Größenordnung von 4 kg auch über dem transportierten Transport- und Lagerbehälter ist zu rechnen. Am Betonbehälter Typ I kann es lokal zu geringfügigen Beschädigungen kommen, ein integrales Versagen ist allerdings nicht zu befürchten. Am Stahlbehälter Typ V kann der Aufprall zu einer punktuellen Schädigung des Deckels führen, ein Verlust der Integrität des Stahlcontainers und ein Austritt des Inventars ist nicht zu befürchten.

Bezüglich der Auswirkungen im Ausbausystem 3 (Ausbau im Fels, mit Ankern und Maschendraht gesichert) wird als Ergebnis der Begutachtung festgestellt, dass der Energieeintrag in die Abfallbinde durch die Bruchkörper durch die Fallversuche abgedeckt und ein integrales Versagen der Abfallbehälter nicht zu befürchten ist. Im ungünstigen Fall, bei einem Aufprall mit einer Kante und einer Ecke, ist eine lokale Beschädigung der Struktur des Deckels nicht auszuschließen, ein integrales Versagen ist nicht zu unterstellen.

Insgesamt sieht der AN die Randbedingungen für die Bestimmung störfallbedingter Aktivitätsfreisetzung als weiterhin eingehalten an.

8.2 Ergebnisse der UWB

Die Randbedingungen für das Brandszenario bzw. für die Modellierung des Temperaturverlaufs sind auf dem aktuellen Stand der Planungen nachvollziehbar und mit einzelnen

konservativen Vereinfachungen festgelegt. In den untersuchten Szenarien kommt es zu brandinduzierten Schäden am Ausbau in Form von kleineren Abplatzungen (Ausbau Beton) und größeren Bruchstücken (Ausbau im Fels). Jedoch wurde bereits in Phase 1 der ÜsiKo das Lösen von Bruchstücken nicht ausgeschlossen. Die Auswirkungen auf den Ausbau waren im Planfeststellungsverfahren nicht betrachtet worden. Der AN hat in seinem Gutachten aufgezeigt, dass die bei dem Brandszenario möglichen Einwirkungen durch die Auslegung der Behälter abgedeckt ist. Die Integrität der Behälter bleibt erhalten. Die Fragestellung aus Phase 1 der ÜsiKo ist damit beantwortet. Für die UWB ist nachgewiesen, dass eine Neubewertung störfallbedingter Aktivitätsfreisetzungen aufgrund der weiterhin abdeckenden Betrachtung der Sicherheitsanalyse nicht notwendig ist.

Der Aufprall der Bruchstücke auf die Behälter wurde bewertet. Nach Darstellung des AN wurde jedoch nicht geklärt, ob beim Brand eines Transportmittels die Funktion des Ausbaus erhalten bleibt. Die Phase 1 der ÜsiKo ging davon aus, dass ein dem Stand der Technik entsprechender Ausbau einen Steinfall verhindert. In der Störfallanalyse wurden keine gesonderten Lastannahmen getroffen und das Ereignis wurde nicht bewertet. Die Frage nach der Stabilität des Ausbaus wäre daher noch abschließend zu beantworten. Bezüglich der sicherheitstechnischen Relevanz dieses Punktes kann aber aus Sicht der UWB berücksichtigt werden, dass ein solches Brandereignis eine Unterbrechung des Einlagerungsbetriebs zur Folge hätte und eine sorgfältige Untersuchung der Auswirkungen nach sich ziehen würde. Die Stabilität des Ausbaus wäre dabei nachzuweisen.

9. Radionuklidausbreitung ($\Delta 24$ - $\Delta 32$)

9.1 Sachverhalt

Gegenstand der UWB zum Thema „Radionuklidausbreitung“ ist der Bericht (Rübel et al. 2024). Der Bericht umfasst die Analyse von 9 Deltas (Delta 24 bis 32) aus Phase 1 der ÜsiKo, welche in drei größere Themenpakete untergliedert werden können:

Radionuklidtransport in der Gasphase:

- $\Delta 24$ Radionuklidtransport in der Gasphase (Szenarien)
- $\Delta 25$ Freisetzung von radioaktiven Gasen im Grubengebäude und Freisetzung der Gase aus dem Grubengebäude in die Geosphäre
- $\Delta 26$ Radionuklidtransport in der Gasphase in der Geosphäre
- $\Delta 27$ Untersuchung der Relevanz von Gas-Fracs für einen möglichen Radionuklidtransport in der Gasphase (Szenarien)

Einfluss von Kolloiden auf den Transport gelöster Radionuklide:

- $\Delta 28$ Einfluss von Kolloiden auf den Transport von Radionukliden (Szenarien)
- $\Delta 29$ Einfluss von Kolloiden auf den Transport von Radionukliden (Geosphäre)

Überprüfung des Unterkreidepfades:

- $\Delta 30$ Überprüfung des Unterkreidepfades bezüglich des berücksichtigten Transportpfades
- $\Delta 31$ Überprüfung des Unterkreidepfades bezüglich der Diffusion
- $\Delta 32$ Überprüfung des Unterkreidepfades bezüglich der Sorption von Iod in der Oberkreide

9.2 Ergebnisse der UWB

Radionuklidtransport in der Gasphase:

In Rübel et al. (2024) wurde die Bewertung des Radionuklidtransports in der Gasphase (Pahwa et al. 1989) auf der Basis von W&T für die zu erwartende Entwicklung eines Endlagersystems bezüglich der Gasbildung beschrieben. Die im Endlager Konrad in der Nachbetriebsphase gebildeten Gasmengen und Gasbildungsraten wurden abgeschätzt und aufgezeigt, dass in der Nachbetriebsphase Gas aus dem Grubengebäude in die Geosphäre bis zur Unterkreide mit einer radialen Ausbreitung von bis zu drei Kilometern entweichen wird. Bei den hier gewählten Modellbedingungen wird eine Bildung von Gasfracs und damit verbundenen neuen Wegsamkeiten für den Transport von radioaktiven Gasen in der Unterkreide und in die Biosphäre nicht erwartet. Der vom Reviewteam der Phase 1

angesprochene kritische Transportpfad „methylierten Radionuklide über die Gasphase“ ist unter diesen Gesichtspunkten vernachlässigbar und Radionuklide aus der Gasphase werden vollständig in der flüssigen Phase aufgelöst und mit dem Grundwasser transportiert.

Die Modellierung der Ausbreitung der Gasphase durch den AN erfolgte mit einem Zweiphasen-Transportmodell (Verwendung des Codes TOUGH2), welches eine Süd-Nord und Ost-West Ausdehnung von jeweils 5 km und eine vertikale Ausdehnung von 650 m hat. Im Modell werden die Unterkreide, der Kimmeridge und der Oxford-Schichten jeweils als homogen betrachtet. Im Betrachtungsgebiet sind keine größeren Störungen bekannt, die die Unterkreide und Oberkreide betreffen. Diese neueren Transportrechnungen auf Basis des Zweiphasenmodells zeigen längere Transportdauern für Radionuklide, die ursprünglich in der Gasphase vorliegen, und es wird somit vom AN argumentiert, dass der in der Langzeitsicherheitsanalyse betrachtete Transport von Radionukliden in der flüssigen Phase abdeckend im Hinblick auf die Bewertung der Langzeitsicherheit ist. Der AN hat in Rübel et al. (2024) die der Bewertung des Radionuklidtransports in der Gasphase und zugeordneten Deltas $\Delta 24$ bis $\Delta 27$ aus der Phase 1 der ÜsiKo vollständig bearbeitet. Das UWB-Team kann der Argumentation des AN auf Basis der getroffenen Annahmen des Zweiphasen-Transportmodells folgen.

Einfluss von Kolloiden auf den Transport gelöster Radionuklide:

Grundlage der Bearbeitung des Aspekts des Einflusses von Kolloiden auf den Transport gelöster Radionuklide ist eine durchgeführte Literaturstudie des AN. Das UWB-Team merkt an, dass nach Rücksprache und Hinweis auf weitere Literaturquellen die Literaturstudie nun vollumfänglich den aktuellen Stand von W&T wiedergibt. Die Autoren kommen zu dem Schluss, dass auf Basis der publizierten Arbeiten und den zu erwartenden geochemischen Bedingungen in einem Endlager mit zementhaltigen Abfällen, wie sie im Endlager Konrad zu erwarten sind, kolloidale Phasen zwar nicht ausgeschlossen werden können, aber auf Basis der starken Kolloid-Kolloid-Wechselwirkungen aggregieren werden und über Gravitation und/oder Filtration diese Phasen aus der Lösung entfernt werden.

Die durchgeführten Modellrechnungen des AN mittels eines *in-house* Codes (RepoTREND) berücksichtigten den potenziellen Einfluss des kolloidgebundenen Radionuklidtransports mit Variation der Kolloid-Filtrationskinetik und der Radionuklid-Kolloid-Desorptionskinetik. Diese Parametervariation grenzte den relevanten Einfluss von Kolloiden auf den Radionuklidtransport ein. Da die auf Basis der geochemischen Randbedingungen im Endlager Konrad abgeleiteten minimalen Filtrations- und Desorptionsraten um circa vier Größenordnungen höher sind, leitet der AN ab, dass ein Einfluss von Kolloiden

auf den Transport gelöster Radionuklide am Standort Konrad auszuschließen ist. Das UWB-Team kann der Argumentation des AN folgen und stimmt den Schlussfolgerungen vollumfänglich zu.

Auch der Einfluss der Eigenkolloide von Radionukliden wurde vom AN behandelt. Die Literaturbasis zu der Stabilität dieser Eigenkolloide in Abwesenheit einer Festphase des Actinids/Radionuklids ist nicht ganz eindeutig und wie richtig vom AN angemerkt fehlen hier noch systematische Studien. Der Ansatz des AN der Annahme der Präsenz der Eigenkolloide als konservativer Weg (auf Grund der Unsicherheiten gemäß dem Stand von W&T) ist für das UWB-Team nachvollziehbar und bedingt durch die sehr langen Transportzeiten und Transportwege bewirkt eine frühere Freisetzung weder eine erhöhte Dosis der kalkulierten Durchbruchkurven noch eine signifikant frühere Ankunft der Radionuklid-Durchbruchkurven am Ende des Freisetzungspfades aus.

Der AN hat in Rübel et al. (2024) die der Bewertung des Radionuklidtransports durch Kolloide und die zugeordneten Deltas $\Delta 28$ und $\Delta 29$ aus der Phase 1 der ÜsiKo vollständig bearbeitet. Das UWB-Team kann der Argumentation des AN auf Basis der getroffenen Annahmen folgen und schließt sich den Schlussfolgerungen an.

Überprüfung des Unterkreidepfades:

In der dem PFB zugrundeliegenden eindimensionalen Stofftransport-Rechnung wurde kein abschnittsweiser unterschiedlicher Strömungsquerschnitt bzw. keine abschnittsweise unterschiedliche Strömungsgeschwindigkeit berücksichtigt, sondern stattdessen mit Variationen der Retardation gearbeitet. Dies bewirkt jedoch eine Unterschätzung der Diffusion im Modell ($\Delta 31$). Die AN haben Rechnungen mit angepassten Diffusionskoeffizienten durchgeführt und kamen zu der Schlussfolgerung, dass aufgrund der immer noch gegebenen Dominanz der Advektion im Modell diese Diffusion keinen wesentlichen Einfluss auf die Ergebnisse hat und dass $\Delta 31$ damit nicht sicherheitsrelevant ist.

$\Delta 30$ und 32 betreffen den Umstand, dass der schnellste Grundwasserpfad aufgrund unterschiedlicher Sorptionsverhältnisse nicht notwendigerweise auch der schnellste Pfad für den Radionuklidtransport ist und damit die Betrachtung des schnellsten Grundwasserpfades nicht notwendigerweise konservativ ist. Aus Phase 1 der ÜsiKo ergab sich, dass möglicherweise ein schnellerer Transportpfad für Iod existiert als angenommen und nicht durch die Formation „Plänerkalke“ führt ($\Delta 30$). Darüber hinaus wurde der für die Plänerkalke angenommene Sorptionskoeffizient in Frage gestellt ($\Delta 32$). Die AN haben neue Ein-

schätzungen zur Sorption in den Plänerkalken erstellt und sind zu dem Schluss gekommen, dass die ursprünglich im PFB unterstellten Werte „unrealistisch hoch“ sind. Es wurden dann Rechnungen durchgeführt, ohne eine Iod-Sorption in den Plänerkalken zu unterstellen. Dies führt im Modell zu einem schnelleren Transport von Iod und zu einer deutlich erhöhten berechneten Konzentration im oberflächennahen Aquifer. Arbeitet man mit diesen Rechnungen, müsste $\Delta 30$ nicht weiter betrachtet werden, da nunmehr gesichert sei, dass der schnellste berechnete Grundwasserpfad mit dem schnellsten Transportpfad für Iod zusammenfällt. Bei Unterstellung der aktualisierten Dosiskonversionsfaktoren (vgl. Kapitel 10) ergibt dies für den Unterkreidepfad eine Dosisabschätzung aufgrund des Iod-Transportes von $1,7 \cdot 10^{-5}$ Sv/a, also Werte in derselben Größenordnung wie für den alternativen „Oxfordpfad“. Es wird geschlussfolgert, dass kein weiterer Überprüfungs- oder Anpassungsbedarf besteht.

Das UWB-Team kann der Argumentation des AN folgen und schließt sich den Schlussfolgerungen an.

10. Dosisberechnung (Δ 33)

10.1 Sachverhalt

Gegenstand ist der Vorläufige Abschlussbericht zur Phase 2: Dosiskonversionsfaktoren der GRS (Horenburg 2023). In Phase 1 wurde zur Bearbeitung in der ÜsiKo Phase 2 festgestellt (Rübel et al. 2019), dass seit dem PFB für das Endlager Konrad sowohl die Strahlenschutzverordnung, als auch die AVV zur Berechnung der Strahlenexposition überarbeitet und dabei insbesondere die zu unterstellenden Verzehrsgewohnheiten geändert wurden. Es wurde empfohlen, die Dosisberechnung an die aktuelle Strahlenschutzverordnung und die zugehörige aktuelle AVV zu § 47 der Strahlenschutzverordnung anzupassen. Das Review-Team der Phase 1 der ÜsiKo empfahl zusätzlich die inzwischen gültige Strahlenschutzverordnung und deren einschlägige nachgeordnete Bestimmungen wie z.B. die AVV Tätigkeiten (BMU 2020) zugrunde zu legen.

10.2 Ergebnisse der UWB

Das Dokument (Horenburg 2023) ist vollständig, nachvollziehbar und richtig; die Empfehlungen aus Phase 1 der ÜsiKo wurden vollständig umgesetzt. Es gab lediglich einige kleinere Hinweise zur Verbesserung des Dokuments.

Bei Vorliegen eines radioaktiven Gleichgewichts führt eine sehr kurze Halbwertszeit eines Tochternuklids immer zu einer Verdopplung der Gesamtaktivität (wenn das Mutternuklid lange genug lebt). Eine lange Halbwertszeit der Tochter hingegen führt dazu, dass sich das Gleichgewicht nicht einstellen kann. Die radiologische Bedeutung der Tochter folgt dann aus der Diskussion der Dosiskoeffizienten, wie sie auch im Dokument korrekt angegeben ist.

Den Begriff der Bodenkonzentration gibt es in (BASE 2022) nicht. Besser wäre die Verwendung des Begriffs „spezifische Aktivität im Boden“.

Th-232 hat selbst keine starke Gamma-Linie (nur $p = 0.26 \%$ bei 63 keV). Daher kommt der hohe Dosiskonversionsfaktor bei externer Exposition wohl durch die Töchter, am direktesten durch Ac-228 zustande. Das ist von Horenburg (2023) in Kapitel 3.1.2 auch für einen einfachen Mutter-Tochter-Zerfall angegeben. Es sollte daher klarer herausgearbeitet werden, wie beim Vorliegen einer ganzen Zerfallsreihe im Grundwasser (nicht notwendigerweise im radioaktiven Gleichgewicht) vorgegangen werden muss, um doppelte Zählungen zu vermeiden.

Es muss beachtet werden, dass die Transferfaktoren für jede Kombination Radionuklid / Nahrungsmittel unterschiedlich sind. Würde man z.B. die Menge verzehrten Fleisches verdoppeln, hätte das nicht für alle Radionuklide denselben Faktor bei der Erhöhung des Dosiskonversionsfaktors zur Folge. Geänderte Verzehrsmengen betreffen also nicht in gleichem Maße alle betrachteten Radionuklide.

11. Störfallplanungswerte (Δ 34- Δ 35)

11.1 Sachverhalt

Gegenstand ist der Vorläufige Abschlussbericht zur Phase 2 (Nitzsche et al. 2023). Dieser betrifft die Deltas 34 und 35: Δ 34 Neuberechnung der Auswirkungen auf die Bevölkerung aufgrund geänderter Berechnungsgrundlagen (Störfallplanungswerte) und Δ 35 Neuberechnung der Auswirkungen auf die Bevölkerung aufgrund geänderter Berechnungsgrundlagen (Störfallplanungswerte). Grundlage ist der Bericht (DMT 2019). Es wird eine Empfehlung zur Berücksichtigung von Po-210 ausgesprochen (Abfrage bei den Anlieferungs-pflichtigen zum Gehalt an Po-210 und ggf. Abklinglagerung).

11.2 Ergebnisse der UWB

Die Empfehlungen aus Phase 1 der ÜSiKo wurden vollständig umgesetzt. Der Bericht ist von hoher Qualität und mit großer Sorgfalt erstellt worden. Es ergeben sich nur eine Reihe meist redaktioneller Anmerkungen. Darüber hinaus gibt es folgende Anmerkungen:

In der StrlSchV und im StrlSchG § 80 werden für den Betrieb von kerntechnischen Anlagen nur noch die Betrachtung der effektiven Dosis und von Organdosen für Haut und Auge gefordert. Auch für den Schutz der Einsatzkräfte gemäß § 150 bei Notfallexpositionssituationen gelten nur diese drei Größen. Wenn die effektive Dosis durch den entsprechenden Dosisfaktor aus (BMU 2001) bestimmt wird, wäre das wohl ausreichend. Auch in der NDWV kommt lediglich die Schilddrüse hinzu (und Iod spielt bei den Konrad-Abfällen keine Rolle, es bleibt nur Technetium).

Bei der Berechnung der Dosis für die Altersgruppe <1 a (Säuglinge) handelt es sich wohl um die effektive Dosis (Folgedosis?). Aufgrund der biologischen Halbwertszeit des Cs ist das für die Exposition nach Inkorporation mit der Dosis im ersten Jahr praktisch identisch. Für die externe Gamma-Exposition nach Deposition gilt das allerdings nicht.

Die Berechnung von Standardabweichungen sollte angegeben werden. Folgt die Verteilung der Häufigkeiten einer Normalverteilung, ist der gewählte Ansatz sinnvoll. Ist es dagegen eine logarithmische Normalverteilung, wäre streng genommen der (lineare) Ansatz mit dem Wert für die Treffer (im Text genannt „TQ“ in Gl. G 6-49) zu modifizieren.

12. Kollision (Δ 36)

Gegenstand der UWB zum Thema „Kollision“ ist der Bericht (Arnold et al. 2024b), der Einsatzmöglichkeiten von Fahrerassistenzsystemen und von autonom betriebenen Fahrzeugen untersucht. Außerdem wird betrachtet, ob die Maßnahmen zur Vermeidung der Einfahrt eines Fahrzeuges in einen gesperrten Streckenabschnitt ausreichend sind.

12.1 Sachverhalt

Der AN bewertet den Sicherheitsgewinn, der mit einem prinzipiell geeigneten System zusätzlich zu den vorhandenen Maßnahmen erzielt werden kann. Ausgangspunkt ist ein Überblick über die grundlegenden Funktionsweisen der am Markt verfügbaren Fahrerassistenzsysteme. Im Weiteren werden nur die prinzipiell geeigneten Fahrerassistenzsysteme bewertet. Dies sind Systeme, deren Praxistauglichkeit durch einschlägige Erfahrungen und unter mit dem Endlagerbetrieb vergleichbaren Voraussetzungen nachgewiesen ist. Den Einsatz autonom betriebener Fahrzeuge schließt der AN generell aus.

Bewertet werden die Einsatzmöglichkeiten in den Fahrsituationen der in der Störfallbetrachtung berücksichtigten anlageninterne Ereignisse mit einer Kollision unter Tage. Grundlage sind die zum Zeitpunkt der Planfeststellung vorhandenen und die seitdem geplanten administrativen, personellen und technischen Maßnahmen zur Verkehrslenkung unter Tage. Der AN verwendet als Kriterium die „Kontrollierbarkeit“ (Controllability), die eine Einschätzung der Wahrscheinlichkeit ist, dass der Fahrzeugführer unter Berücksichtigung eines zusätzlichen Fahrerassistenzsystems eine ausreichende Kontrolle über das Ereignis erlangt. Der Sicherheitsgewinn wird dann basierend auf Expertenmeinung qualitativ bewertet. Der AN identifiziert kein System, das gegenüber den bestehenden Sicherheitsmaßnahmen einen signifikanten Sicherheitsgewinn liefern würde. Es gibt keine Empfehlung für die Integration von Fahrerassistenzsystem oder autonomen Systemen. Die zur Vermeidung einer Einfahrt in bereits besetzte untertägige Streckenabschnitte geplanten Schutzmaßnahmen stuft der AN als ausreichend ein. Für drei Systeme stellt der AN einen möglichen aber nicht signifikanter Sicherheitsgewinn fest: die Erweiterung der Lichtsignalanlagen (LSA) an den Knotenpunkten mit Schrankenanlagen, die Integration des Fahrerassistenzsystems zum Nahbereichsdatenaustausch per Funk durch Meldung von Lichtsignalanlagen sowie die Integration von Lidarsensoren in den Transportwagen zur sensorbasierten Umfelderkundung. Diese Systeme wären in die bestehende Infrastruktur und Fahrzeuge nachträglich integrierbar. Neue Störfallbetrachtungen würden nicht erforderlich werden.

Als Ausblick empfiehlt der AN, das Thema Einsatz von Fahrerassistenzsystemen und autonomen Systemen in Zukunft weiter zu beobachten und auf Tauglichkeit zu prüfen. An anderer Stelle verweist der AN auf eine Nebenbestimmung des Planfeststellungsbeschlusses, wonach die bei der Inbetriebsetzung gewonnenen Erkenntnisse verwertet werden müssen. Der AN bezieht dies konkret auf Erkenntnisse über die tatsächliche Wirksamkeit der Verkehrsregelung durch Lichtsignalanlagen (System mit möglichem Sicherheitsgewinn, s. o.).

12.2 Ergebnisse der UWB

Die Untersuchung der verschiedenen Assistenzsysteme ist systematisch aufgebaut. Der Ablauf ist transparent und die Abfolge der Analyseschritte ist zielführend für die Umsetzung der Aufgabenstellung. Die Fahrsituationen unter Tage sind nachvollziehbar und zutreffend zugeordnet und insgesamt abdeckend für die in der Störfallbetrachtung bewerteten Abläufe. Der aktuelle Planungsstand ist berücksichtigt.

Der Überblick über die am Markt verfügbaren Assistenzsysteme ist auf der Ebene grundlegender Funktionsweisen vollständig. Die Einstufung der prinzipiell geeigneten Systeme leitet sich plausibel aus der Beschreibung der Funktionsweisen und der bisherigen Einsatzgebiete ab, unter dem allgemeinen Vorbehalt, dass keine spezifischen Erfahrungswerte aus dem Endlagerbetrieb vorliegen. Aus der Darstellung ergeben sich aber auch Anhaltspunkte, dass einzelne der als ungeeignet ausgeschlossenen Systeme unter veränderten Randbedingungen einen positiven Beitrag leisten können. In dieser Hinsicht sollte aus Sicht der UWB die Betrachtung fortgeführt werden, da auch das absehbare Potential technologischer Weiterentwicklungen dem Stand von Wissenschaft und Technik zuzurechnen ist. Vollständig autonome Systeme schließt der AN generell von einer weiteren Betrachtung aus, da nach seiner Einschätzung der Mensch aufgrund seiner spezifischen Fähigkeiten in den Fahrsituationen der Maschine überlegen ist. Als allgemeingültige Aussage kann die UWB dieser Bewertung nicht folgen, da es Situationen und Arbeitsumgebungen gibt bzw. geben könnte, in denen ein Sicherheitsgewinn durch automatisierte Abläufe erzielt wird. Angesichts der übertragbaren Einsatzbeispiele autonomer Fahrzeuge und der dynamischen Weiterentwicklung von personenlos betriebenen technischen Systemen wäre aus Sicht der UWB eine weitere Betrachtung gerechtfertigt. Zudem resultiert aus der Phase 1 der ÜSiKo explizit die Aufgabe, den Einsatz autonomer Fahrzeuge im Hinblick auf die Vermeidung bzw. Verringerung der Strahlenexposition zu betrachten. Auf diesen Aspekt geht der AN nicht ein. Dies wäre bei einer nachfolgenden Auswertung zu ergänzen.

Die Bewertung des Sicherheitsgewinns bei Einsatz eines zusätzlichen Systems beruht auf einer qualitativen Einschätzung als Expertenmeinung. Diese Form der Bewertung ist aufgrund der mangelnden Erfahrungswerte angemessen und zielführend. Der Bewertungsgang ist nicht im Detail dokumentiert und einer externen Bewertung nur eingeschränkt zugänglich. Die ausgewiesenen Ergebnisse sind jedoch für die UWB plausibel.

Der AN empfiehlt, die weitere Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen und autonomen Systemen zu beobachten. Ebenso sind generell bei der Inbetriebsetzung gewonnenen Erkenntnisse zu verwerten. Das UWB-Team schließt sich diesen Empfehlungen an und ergänzt, dass diese Aufgaben nicht nur in der Phase bis zur Inbetriebnahme des Endlagers, sondern auch darüber hinaus begleitend zum Betrieb bestehen. Die Option einer Nachrüstung geeigneter Systeme ist in den weiteren Planungen zu berücksichtigen. Die Aufgaben sind im Betriebsreglement (Managementsystem) zu verankern. Für die Einführung (teil-) automatisierter Systeme im Einzelfall entscheidend, wie der Mensch (der Fahrer) in seinen Aufgaben unterstützt werden kann. Bei der Bewertung der Einsatzmöglichkeiten zusätzlicher Systeme zur Vermeidung von Kollisionen sollte darüber hinaus auch der Einfluss von intendiertem Verhalten einbezogen werden. Diese Aspekte wären bei den weiteren Betrachtungen zu berücksichtigen.

13. Bodenverflüssigung (H 9)

13.1 Sachverhalt

In ihrem Bericht zur Ermittlung des Überprüfungsbedarfs der Störfallanalysen haben Campo et al. (2019) auf Formblatt 2.2.1.2.1 (Seite 147) festgestellt: „Zu einer der Auswirkungen des Bemessungserdbebens auf den Baugrund zählt die Bodenverflüssigung. Laut den KTA-Regeln 2201.1 Kap. 7 (2011) und 2201.2 Kap. 5 (2012) ist die Veränderung des Baugrundes durch die Bodenverflüssigung zu betrachten. Beide KTA-Regeln (1990) wurden bei der Auslegung der sicherheitstechnisch relevanten Bauwerke und Anlagenteile berücksichtigt. Im Planfeststellungsverfahren gibt es keinen Nachweis, dass die Bodenverflüssigung bewertet wurde. Die Baugrunduntersuchung und Gründungsplanung für die obertägigen Bauwerke am Schacht 1 und 2 werden in den Berichten EU 503 (1996) und EU 504 (1996) dargestellt. Sie wurden bereits von Sachverständigen begutachtet (1997 und aktualisiert im Jahr 2000). Es wird empfohlen, die Bodenverflüssigung standortspezifisch zu berücksichtigen und zu überprüfen, ob die Bodenverflüssigung zu unterstellen ist und ob sie bereits betrachtet wurde.“ In Ihrem Bericht zur Phase 1 „Ermittlung des Überprüfungsbedarfs“ von (Röhlig et al. 2019) hatte das Review-Team keine ergänzenden Anmerkungen zum Hinweis 9 von Campo et al. (2019).

13.2 Ergebnisse der UWB

Methodik

Die Auslegung von Gebäuden gegen Erdbeben wird nach DIN EN 1998 Teil 1 bis 5 beurteilt. Diese löste die im Planfeststellungsverfahren gültige DIN 4149 für Bauten in deutschen Erdbebengebieten ab. Die Einführung fand im Rahmen der Angleichung europäischer Normen durch das europäische Komitee für Normung (CEN) statt. In Teil 5 der DIN EN 1998 ist die Betrachtung der Bodenverflüssigung in das DIN-Regelwerk miteingeführt und dies wurde auch so vom AN angewandt. Eine Bewertung der Gefährdung durch Bodenverflüssigung wurde zuerst anhand bodenmechanischer Eigenschaften (Korngrößenverteilung, Feinkornanteil, Wassergehalt und Plastizitätszahl) durchgeführt. Hierzu wurden neben den Bodenproben auch aus den durchgeführten Drucksondierungen (CPT, Cone Penetration Test) Informationen zum Feinkornanteil abgeleitet. Danach erfolgte eine Gegenüberstellung von durch das Auslegungserdbeben erzeugten induzierten zyklischen Schubspannungen mit den zur Verflüssigung führenden Schubspannungen.

Dieses Verfahren wird sowohl in der aktuell gültigen KTA 2201.2 als auch in DIN EN 1998-5 (DIN, 2021) als Standardverfahren empfohlen und das UWB-Team schließt sich dieser Sichtweise an.

Ergebnisse

Im Zuge der neueren Untersuchungen des Baugrundes durch den AN nach der DIN EN 1998 (bsp Ingenieure GmbH 2021) wurde für die sicherheitsrelevanten zu errichtenden Gebäude (Pufferhalle, Umladehalle, Lüftergebäude, Grubenwasserübergabestation und Schachtkeller) der Schachtanlage Konrad 2 gezeigt, dass nicht mit einer Bodenverflüssigung im Erdbebenfall zu rechnen ist. Das UWB-Team folgt dieser Argumentation und Schlussfolgerung und sieht keinen Ergänzungsbedarf.

14. Biologische Einwirkungen (H 10)

14.1 Sachverhalt

Gegenstand sind die Empfehlungen aus Phase 1 der ÜsiKo (Röhlig et al. 2019, S.30: 3.2.5.), dass im Bewertungsblatt 2.2.1 – naturbedingte Einwirkungen von außen – basierend auf Campo et al. (2019) angegeben wird, dass biologische Einwirkungen im Rahmen des Betriebes der Schachtanlage Konrad nicht relevant seien. Auf Nachfrage wurde diese Einschätzung von den AN begründet. Das Reviewteam hatte empfohlen, eine knappe Begründung in das Bewertungsblatt aufzunehmen, um diese wichtige Feststellung plausibel zu machen (Röhlig et al. 2019).

14.2 Ergebnisse der UWB

Die Empfehlungen aus Phase 1 der ÜsiKo wurden vollständig umgesetzt, das Dokument ist vollständig, nachvollziehbar und richtig. Es wurde kein weiterer Handlungsbedarf identifiziert.

15. Zusammenfassung

Die Betreibergesellschaft BGE unternimmt gegenwärtig eine „Überprüfung der sicherheitstechnischen Anforderungen für das Endlager Konrad“ (ÜsiKo) angesichts des seit dem Zeitpunkt der Planfeststellung weiterentwickelten Standes von Wissenschaft und Technik. Im Rahmen der Phase 1 der ÜsiKo (bis 2019) wurden Überprüfungsbedarfe identifiziert, die nun in der Phase 2 (bis 2024) fallweise in Aktualisierungen der Sicherheitsanalysen einfließen. So soll festgestellt werden, ob künftige Anpassungen in der Planung (Phase 3) und Umsetzung im Bau (Phase 4) notwendig sein werden.

Die Arbeiten in der Phase 2 folgten in Phase 1 identifizierten „Deltas“ und „Hinweisen“. Sie wurden durch BGE-externe Auftragnehmer durchgeführt und durch ein unabhängiges Team wissenschaftlich begleitet (unabhängige wissenschaftliche Begleitung UWB). Der vorliegende Bericht fasst die Ergebnisse dieser UWB zusammen. Zu beachten ist, dass die wissenschaftliche Begleitung teilweise parallel zu den Arbeiten der Auftragnehmer erfolgte, dem UWB-Team lagen Zwischenstände und –berichte vor, auf deren Basis es Hinweise und Kritik äußerte. Dies geschah sowohl schriftlich mittels vorläufiger Prüfberichte als auch in Meetings mit den externen Auftragnehmern. Es blieb aber den Auftragnehmern überlassen, ob, wie, und in welchem Maße sie diese Hinweise aufnahmen und umsetzten. Der vorliegende Bericht gibt nicht diesen gesamten Arbeitsablauf wieder, sondern fasst die Einschätzungen des UWB-Teams zum Stichtag 24.10.2024 zusammen.

Nach Einschätzung des UWB-Teams wurden in der Phase 2 alle sicherheitsrelevanten Fragen aus der ersten Phase, die sich aus der Weiterentwicklung des Standes von Wissenschaft und Technik ergeben hatten, umfassend untersucht, eingeordnet und bewertet.

Aus der ÜsiKo ergeben sich keine Indizien, dass ein sicherer Betrieb des Endlagers Konrad nicht möglich wäre. Diese Einschätzung hat auch angesichts einiger in diesem Bericht aufgeführten Details, in denen die Auffassungen der Auftragnehmer und des UWB-Teams divergieren, Bestand.

Lediglich im Hinblick auf die Kritikalitätssicherheit in der Nachbetriebsphase hatten die Auftragnehmer Empfehlungen mit materieller Wirkung ausgesprochen. Das UWB-Team schätzt ein, dass in die Untersuchungen der Auftragnehmer große Konservativitäten eingeflossen sind, so dass wohl kein ernsthaftes materielles Problem zu erwarten ist. Der Abbau der Konservativitäten, um dies tatsächlich zu zeigen, ist jedoch nicht trivial und herausfordernd. Trotzdem sollten vor einer Änderung der Planung Anstrengungen unternommen werden, diese Konservativitäten abzubauen und so zu einem Nachweis der Kritikalitätssicherheit ohne materielle Änderungen zu gelangen.

Einige der Empfehlungen und Hinweise bzw. Teilaspekte davon, die insbesondere Fragen der technischen Sicherheit und der Betriebsorganisation betreffen, sind noch in Bearbeitung. Eine abschließende Bewertung ist erst nach Konkretisierung und Umsetzung in die betrieblichen Regelungen möglich. Zusätzlich zu den Betrachtungen der ÜSiKo werden bestimmte Sachverhalte auch im weiteren Verfahren bis zur Inbetriebnahme des Endlagers geprüft und darüber hinaus betriebsbegleitend im Rahmen der Aufsicht über das Endlager überwacht werden.

Darüber hinaus versteht es sich von selbst, dass auch im weiteren Projekt dafür Sorge zu tragen ist, dass die Entwicklung des Standes von Wissenschaft und Technik systematisch verfolgt und ggf. Maßnahmen zur Heranführung an den weiterentwickelten Stand und zur Gewährleistung der erforderlichen Schadensvorsorge ergriffen werden.

16. Abkürzungsverzeichnis

AN.....	(BGE-externe) Auftragnehmer, die die ÜsiKo bearbeiten
AVV.....	Allgemeine Verwaltungsvorschrift (zu § 47 der Strahlenschutzverordnung)
BASE	Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung
BGE	Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH
BMUV	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz
BHB	Betriebshandbuch
CPT.....	Cone Penetration Test
EGT	Expertengruppe Geologische Tiefenlagerung des ENSI
ENSI	Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (Schweiz)
ESK.....	Entsorgungskommission des BMUV
FCKW	Fluorchlorkohlenwasserstoffe
FSU.....	Friedrich-Schiller-Universität Jena
GRS	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit gGmbH
HAZOP	Hazard and Operability
HRD	High Rate Discharge (Löschsysteme)
INE.....	Institut für Nukleare Entsorgung am KIT
KAS.....	Kommission für Anlagensicherheit
KIT	Karlsruher Institut für Technologie
KTA.....	Kerntechnischer Ausschuss
KVSF	Kompetenzverbund Strahlenforschung
LSA	Lichtsignalanlage
MTO	Mensch-Technik-Organisation

NDWV	Verordnung zur Festlegung von Dosiswerten für frühe Notfallschutzmaßnahmen
NEA	Nuclear Energy Agency
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development
PFB	Planfeststellungsbeschluss für die Errichtung und den Betrieb des Bergwerkes Konrad in Salzgitter als Anlage zur Endlagerung fester oder verfestigter radioaktiver Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung vom 22. Mai 2002
PSI	Paul-Scherrer-Institut
PTB	Physikalisch-Technische Bundesanstalt
SIT	Specific Ion Interaction Theory
SSK	Strahlenschutzkommission des BMUV
StrlSchG	Strahlenschutzgesetz
StrlSchV	Strahlenschutzverordnung
ÜsiKo	Überprüfung der sicherheitstechnischen Anforderungen des Endlagers Konrad
UWB	Unabhängiges Wissenschaftliches Begleitung (der ÜsiKo-Phase 2)
W&T	(Stand von) Wissenschaft und Technik
XRM	X-Ray Microscopy
ZB	Zechenbuch

17. Literaturverzeichnis

17.1 Berichte zu Phase 2 der ÜsiKo

Arnold, M.; Walbrodt, D; Ferreira, L., R. Miller (2024a) „Überprüfung der sicherheitstechnischen Anforderungen des Endlagers Konrad nach dem Stand von Wissenschaft und Technik (ÜsiKo) Phase 2 - MTO-Analyse für das Endlager Konrad in Form einer Hazard-Operability-Studie (HAZOP)“, Entwurf, 15.03.2024.

Arnold, M.; Coninx, S.; Ehrich, H.; Lakermann, J.; Borsdorf, R.; Robert, M. (2024b): „ÜsiKo Phase 2: Maßnahmen zur Verhinderung von Kollisionen“, Stand 17.05.2024

BGE (2022) Zusammenfassende Ergebnisdarstellung Brandschutz zur Phase 2 der ÜsiKo - Teil 1, Stand: 03.11.2022

BGE (2023) Zusammenfassende Ergebnisdarstellung Brandschutz zur Phase 2 der ÜsiKo – Teil 2“, Stand 13.11.2023

bsp Ingenieure GmbH (2021) Tagesanlagen Konrad 2; Bestimmung dynamischer Bodenkennwerte; Crosshole-Messungen; Gefährdung durch Bodenverflüssigung, Stand: 15.12.2021. ULV 9KE/Z/FG/BZ/0001/01 (DokID 11955076)

Horenburg, P. (2023) Überprüfung der sicherheitstechnischen Anforderungen des Endlagers Konrad nach dem Stand von Wissenschaft und Technik (ÜsiKo) Phase 2 Vorläufiger Abschlussbericht: Dosiskonversionsfaktoren, Entwurf 17. Mai 2023 KUVgO1-22-06-Lem

Miller, R.; Feinhals, J. (2021) „Phase 2 der ÜsiKo: Konzept zur Durchführung von MTO-Analysen“, 07.05.2021

Nitzsche, O. et al. (2023) Überprüfung der sicherheitstechnischen Anforderungen des Endlagers Konrad nach dem Stand von Wissenschaft und Technik (ÜsiKo) Phase 2 Vorläufiger Abschlussbericht: Störfallplanungswerte, Entwurf 26.5.2023

Rübel, A.; Behler, M.; Hagemann, S.; Kilger, R.; Moog, H.; Noseck, U.; Wolf, J. (2023) Projekt Konrad – Überprüfung der sicherheitstechnischen Anforderungen des Endlagers Konrad nach dem Stand von Wissenschaft und Technik (ÜsiKo). Vorläufiger Abschlussbericht zur Phase 2: Sicherstellung der Unterkritikalität. UVgO1-20-11-Lem, GRS-A-4049

Rübel, A.; Frank, T; Noseck, U.; Seher, H; Wolf, J. (2024): Projekt Konrad – Überprüfung der sicherheitstechnischen Anforderungen des Endlagers Konrad nach dem Stand von Wissenschaft und Technik (ÜsiKo) Vorläufiger Abschlussbericht zur Phase 2: Radionuklidausbreitung, KVG1-21-12-Lem, ENT-WURF.

TÜV SÜD (2024) ÜsiKo Phase 2: Auswirkungen eines Brands auf den Ausbau. Ergebnisse der Brandsimulationen an drei Ausbausystemen sowie Bewertung der Folgen eines unterstellten Löserereignisses, Entwurf vom April 2024

17.2 Berichte zu Phase 1 der ÜsiKo

Campo, V.; Feinhals, J.; Schönberner, S.; Walbrodt, D. (2019) Überprüfung der sicherheitstechnischen Anforderungen des Endlagers Konrad nach dem Stand von Wissenschaft und Technik (ÜsiKo) – Los I: Ermittlung des Überprüfungsbedarfs der Störfallanalysen, VDIS 9KE/25232/B/RB/0006/00, Hamburg, 06.03.2019.

DMT (2019) Überprüfung der sicherheitstechnischen Anforderungen des Endlagers Konrad nach dem Stand von Wissenschaft und Technik (ÜsiKo) - Los 1: Ermittlung des Überprüfungsbedarfs der Störfallanalysen Hamburg, 08.03 2019

Pohl, C.; Marić, D.; Kuhn, S.; Gradmann, M. (2019) Projekt Konrad. ÜsiKo, Los 3 „Unterkritikalität in der Betriebsphase“ Phase 1: Ermittlung des Überprüfungsbedarfs. Abschlussbericht (vorläufig). TÜV Rheinland

Röhlig, K. et al. Überprüfung der sicherheitstechnischen Anforderungen des Endlagers Konrad nach dem Stand von Wissenschaft und Technik (ÜsiKo) Review der Phase 1 „Ermittlung des Überprüfungsbedarfs“, Clausthal-Zellerfeld, 2019. VDIS-KZL: 9KE/25232/B/RB/0011/00

Rübel, A.; Behler, M.; Feinhals, J.; Mönig, J.; Poppei, J.; Rätz, D.; Wolf, J. (2019) Projekt Konrad – Überprüfung der sicherheitstechnischen Anforderungen des Endlagers Konrad nach dem Stand von Wissenschaft und Technik (ÜsiKo). Überprüfung der sicherheitsrelevanten Anforderungen zur Langzeitsicherheit, Kritikalität in der Nachbetriebsphase und thermischen Beeinflussung des Wirtsgesteins. Abschlussbericht zur Phase 1: Ermittlung des Überprüfungsbedarfs. Braunschweig: Gesellschaft für Anlagensicherheits- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, AF-Consult Switzerland Ltd., DMT GmbH & Co. KG.

17.3 Planfeststellungsunterlagen

17.3.1. Planfeststellungsbeschluss

NU (2002): Planfeststellungsbeschluss für die Errichtung und den Betrieb des Bergwerkes Konrad in Salzgitter als Anlage zur Endlagerung fester oder verfestigter radioaktiver Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung vom 22. Mai 2002. Hannover: Niedersächsisches Umweltministerium.

17.3.2. Erläuternde Unterlage

Pahwa, S. B.; Resele, G.; Statham, W. H. (1989): Schachtanlage Konrad, Salzgitter - Modellrechnungen zur Gasausbreitung im Gebirge. BfS, Colenco AG, Baden, 1989. VDIS-KZL: 9K/352126.44/EG/ED/0006/00, EU 321

17.4 Sonstige Literatur

ANSI/ANS-8.15 (2014) American Nuclear Society (ANS): American National Standard ANSI/ANS-8.15-2014: Nuclear Criticality Safety Control of selected Actinide Nuclides, (Reaffirmed September 12, 2019). American Nuclear Society: La Grange Park, IL, USA, Oktober 2014.

BASE (2022) Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung: Bekanntmachung der „Berechnungsgrundlage für die Dosisabschätzung bei der Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen“ vom 30. Dezember 2022, BAnz AT 30.12.2022 B15

BMU (2001) Bekanntmachung der Dosiskoeffizienten zur Berechnung der Strahlenexposition vom 23. Juli 2001 Bundesanzeiger. Nr. 160 a/b vom 28. August 2001

BMU (2020) Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit: Allgemeine Verwaltungsvorschrift zur Ermittlung der Exposition von Einzelpersonen der Bevölkerung durch genehmigungs- oder anzeigebedürftige Tätigkeiten (AVV Tätigkeiten). 8. Juni 2020, BAnz AT 16.06.2020 B3.

DIN EN 61882:2017-02 HAZOP-Verfahren (HAZOP-Studien) - Anwendungsleitfaden, Fassung: 02/2017

DIN EN 1998-5/NA: Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter- Eurocode 8: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben – Teil 5: Gründungen, Stützbauwerke und geotechnische Aspekte; Stand: Juli 2021

Nagra (2023): The PSI Chemical Thermodynamic Database 2020. Nagra Technical Report NTB 21-03, <https://nagra.ch/en/downloads/technical-report-ntb-21-03-2/>, April 2023