

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

Review der Phase 1

„Ermittlung des Überprüfungsbedarfs“

Klaus-Jürgen Röhlig,
Christian Küppers, Thorsten Schäfer & Clemens Walther

Januar 2019

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	4
Mitglieder des Reviewteams	7
2. Langzeitsicherheit, Unterkritikalität in der Nachbetriebsphase und thermische Beeinflussung des Wirtsgesteins	9
2.1 Sachverhalt	9
2.2 Bewertung	13
2.2.1. Allgemeines, Methodik.....	13
2.2.2. Regulatorische Aspekte und Umgang mit Ungewissheiten	14
2.2.3. Bewertung der systematischen Analyse der Antragsunterlagen durch die Auftragnehmer	17
2.2.4. Zusammenfassung.....	23
3. Störfallanalysen	26
3.1 Sachverhalt	26
3.2 Bewertung	27
3.2.1. Bewertung des grundsätzlichen Vorgehens	27
3.2.2. Beurteilung des herangezogenen Bewertungsmaßstabs.....	28
3.2.3. Berechnung der Störfalldosis	29
3.2.4. Auslegung gegen Erdbeben.....	30
3.2.5. Weitere Hinweise	30
3.2.6. Zusammenfassung.....	31
4. Bestimmungsgemäßer Betrieb	34
4.1 Sachverhalt	34
4.2 Bewertung	35
4.2.1. Bewertung der relevanten Literatur	35
4.2.2. Bewertung der Systematik und Vorgehensweise.....	35
4.2.3. Bewertung der Ableitung der Deltas	35
4.2.4. Bewertung der Schlussfolgerungen der AN.....	36

4.2.5. Allgemeine Anmerkungen	36
4.2.6. Zusammenfassung	37
5. Unterkritikalität in der Betriebsphase	38
5.1 Sachverhalt	38
5.2 Bewertung	39
5.2.1. Bewertung der relevanten Literatur	39
5.2.2. Bewertung der Systematik und Vorgehensweise	39
5.2.3. Bewertung der Ableitung der Deltas	40
5.2.4. Bewertung der Schlussfolgerungen der AN	40
5.2.5. Allgemeine Anmerkungen	40
5.2.6. Zusammenfassung	41
6. Zusammenfassung	43
7. Literaturverzeichnis	45
7.1 Im Review bewertete Berichte der Überprüfung der Sicherheitstechnischen Anforderungen des Endlagers Konrad nach dem Stand von Wissenschaft und Technik (ÜsiKo)	45
7.2 Zitierte Planfeststellungsunterlagen	45
7.2.1. Planfeststellungsbeschluss	45
7.2.2. Erläuternde Unterlagen	45
7.3 Gutachten und Stellungnahmen	46
7.4 Sonstige Literatur	47

1. Einleitung

Gemäß des Planfeststellungsbeschlusses (PFB) für das Endlager Konrad (NU 2002) war gewährleistet, dass die dem Stand von Wissenschaft und Technik (W&T) zum damaligen Zeitpunkt gemäße Schadensvorsorge getroffen wurde. Unabhängig davon, dass der Bundesgesellschaft für Endlagerung (BGE) derzeit keine dem widersprechenden Hinweise vorliegen, führt sie eine Überprüfung der sicherheitstechnischen Anforderungen des Endlagers Konrad nach dem Stand von W&T (ÜsiKo) durch. Im Rahmen der Phase der ÜsiKo „Ermittlung des Überprüfungsbedarfs“ wird zunächst festgestellt, ob sich angesichts des heutigen Standes von W&T sicherheitsrelevanter Überprüfungsbedarf (in Form so genannter „Deltas“) ergibt. Diese wurden durch externe Unternehmen (nachfolgend: Auftragnehmer AN) in voneinander unabhängigen Vorhaben für folgende Bereiche ermittelt:

- Langzeitsicherheit, Unterkritikalität in der Nachbetriebsphase und thermische Beeinflussung des Wirtsgesteins
- Störfallanalysen
- Bestimmungsgemäßer Betrieb
- Unterkritikalität in der Betriebsphase

Zur Qualitätssicherung wurden die Dokumentationen der Ergebnisse (vier Berichtsentwürfe zu den genannten Bereichen) anschließend einem unabhängigen Review durch ein Reviewteam unterzogen, der im vorliegenden Bericht dokumentiert wird. Folgende Fragen sollten beantwortet werden (gekürzte Wiedergabe aus der Leistungsbeschreibung für den Review):

- **Vollständigkeit:** Wurden alle für die Sicherheit eines Endlagers relevanten Themen betrachtet? Sind die abgeleiteten Empfehlungen zum Delta vollständig?
- **Richtigkeit:** Wurde die Ermittlung des aktuell angemessenen Standes von W&T richtig vorgenommen? Sind die abgeleiteten Empfehlungen für die weiterführenden Untersuchungen in der Phase 2 richtig, eindeutig und klar formuliert?
- **Nachvollziehbarkeit:** Wurde bei der Bearbeitung eine schlüssige Vorgehensweise gewählt? Sind die abgeleiteten Empfehlungen zum Umgang mit dem Delta nachvollziehbar und geeignet, um eine Leistungsbeschreibung für die Phase 2 der ÜsiKo zu formulieren?

Die Vorgehensweise im Review wurde in Anlehnung an die Vorgehensweise internationaler Organisationen (IAEA, OECD/NEA) festgelegt, vgl. z. B. (NEA 2005a):

1. Studium der Berichte der AN (Oktober / November 2018)
2. Formulierung von Verständnisfragen an die AN durch das Reviewteam (November 2018)

3. Beantwortung durch die AN (November 2018)
4. Erarbeitung eines Berichtsentwurfs durch das Reviewteam (Dezember 2018)
5. Durchsicht des Berichtsentwurfs durch die AN auf faktische Richtigkeit („Faktencheck“, Januar 2019). Zweck der Durchsicht war das Ausräumen von Missverständnissen, sie war ausschließlich auf faktische Richtigkeit gerichtet.
6. Endfassung des Berichts durch das Reviewteam (Januar 2019)
7. Workshop zur Vorstellung der Ergebnisse durch AN und Reviewteam (Januar 2019)

Zur Aufgabenstellung und zur Vorgehensweise merkt das Reviewteam folgendes an:

Der hier vorgelegte Bericht dokumentiert entsprechend der oben beschriebenen Vorgehensweisen den Review (durch das Reviewteam) eines Reviews (durch die AN) der Planfeststellungsunterlagen. Diese zweistufige Vorgehensweise ist dem Sachverhalt nach Auffassung des Reviewteams angemessen, sie bedingt aber auch Besonderheiten: Die zugrundeliegende Primärliteratur (Planfeststellungsunterlagen) konnte durch das Reviewteam aus Zeit- und Kapazitätsgründen nur punktuell gesichtet werden. Eine Überprüfung, ob alle Teile des PFB durch die AN hinreichend berücksichtigt wurden, wurde daher durch das Reviewteam nicht vorgenommen. Die Überprüfung der **Vollständigkeit** war auf die in der Leistungsbeschreibung genannten Fragen (Betrachtung der relevanten Themen, Vollständigkeit der Empfehlungen zu identifizierten sicherheitsrelevanten Deltas, s. o.) beschränkt. Dagegen war eine Identifizierung bzw. Ableitung von Deltas über die durch die AN identifizierten hinaus durch das Reviewteam kaum möglich. Das Reviewteam hat entsprechend der Leistungsbeschreibung eine Überprüfung auf **Richtigkeit** und **Nachvollziehbarkeit** vorgenommen und diesbezüglich einheitliche Maßstäbe an alle Berichte der AN angelegt. Alle hier dokumentierten Einschätzungen sind Einschätzungen des gesamten Reviewteams.

Die Leistungsbeschreibung nennt als Zielsetzung der ÜsiKo die Sicherstellung „dass das Sicherheitskonzept für das Endlager Konrad auch die nach heutigem Stand von W&T erforderliche Vorsorge gegen Schäden aus der Endlagerung radioaktiver Abfälle gewährleistet.“ An anderer Stelle wird auch der „angemessene Stand von W&T“ erwähnt (z. B. <https://www.bge.de/de/konrad/uesiko/>, aufgesucht am 17.12.2018). Hierzu merkt das Reviewteam an:

Das Reviewteam lehnt sich in seiner Bewertung an die Anforderungen des Kalkar-Urteils an: „Die Genehmigung darf nur erteilt werden, wenn ... die nach dem Stand von Wissenschaft und Technik erforderliche Vorsorge gegen Schäden durch die Errichtung und den Betrieb der Anlage getroffen ist ...“ (BVerfG 1978). Dies bedeutet, dass der Stand von W&T zur Ermittlung der **Erfordernisse** heranzuziehen ist. Konkret bedeutet dies, dass eingeschätzt werden muss, ob eine Beurteilung nach dem Stand von W&T aus heutiger Sicht Sicherheitsdefizite im Vergleich zu den Bewertungen im PFB (NU 2002) identifiziert. Nur potentiell ungünstigere Einschätzungen würden Änderungen in

der Bewertung (z. B. den Einsatz moderner Rechenverfahren) und ggf. auch in der Anlagenplanung erforderlich machen. Diesem Verständnis gemäß interpretiert das Reviewteam auch die in der Leistungsbeschreibung verwendete Formulierung "angemessener Stand von W&T". Das Reviewteam ist der Auffassung, dass der Ansatz der BGE bei der Konzeption und Planung der ÜsiKo dieser Auffassung gerecht wird.

Die technische Generalklausel „Stand von W&T“ umschreibt „das höchste Anforderungsniveau und wird daher in Fällen mit sehr hohem Gefährdungspotenzial verwendet. Stand von Wissenschaft und Technik ist der Entwicklungsstand fortschrittlichster Verfahren, Einrichtungen und Betriebsweisen, die nach Auffassung führender Fachleute aus Wissenschaft und Technik auf der Grundlage neuester wissenschaftlich vertretbarer Erkenntnisse im Hinblick auf das gesetzlich vorgegebene Ziel für erforderlich gehalten werden und das Erreichen dieses Ziels gesichert erscheinen lassen.“ (BMJ 2008). Es ist nach Ansicht des Reviewteams im Einzelfall darzulegen, dass für das betroffene Themenfeld aktuelle Publikationen und Erkenntnisse führender Forschungsinstitutionen berücksichtigt wurden.

Mitglieder des Reviewteams

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, 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 nicht-technischer Aspekte bei der Entsorgung radioaktiver Abfälle. Lehrtätigkeit: Sicherheitsanalyse, Entsorgungsstrategien
- Mitglied der Entsorgungskommission (ESK) des BMUB, Vorsitzender der Deutschen Arbeitsgemeinschaft Endlagerforschung (DAEF), Beratungstätigkeit für französische, schwedische und Schweizer Behörden

Dipl.-Phys. Christian Küppers

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

- Physiker (Diplom an der TU Darmstadt)
- seit 1986 am Öko-Institut e.V., Leiter der Strahlenschutzgruppe des Bereichs Nukleartechnik und Anlagensicherheit, Arbeitsschwerpunkte Strahlenschutz, Entsorgung, Sicherheitsanalysen, Umweltverträglichkeitsprüfungen
- u. a. Mitglied der Strahlenschutzkommission (SSK) des BMU, Mitglied des Kerntechnischen Ausschusses (KTA), Mitglied des Ausschusses Stilllegung der Entsorgungskommission (ESK) des BMU

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, NSLS) in der XR Gruppe von Prof. J. Kirz & Prof. C. Jacobsen
- 2002-2017 Institut für Nukleare Entsorgung (INE) am KIT, 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 der 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. Arbeits- und Forschungsschwerpunkte: Transportprozesse in geklüfteten und porösen Medien, Sa-

nierungsstrategien kontaminierter Standorte, Untertagelaborexperimente. Lehrtätigkeit: Georessourcen, Nutzung des tiefeologischen Untergrunds (u.a. Geothermie, Entsorgung chemo- und radiotoxischer Abfälle), Bio-Geo-Interaktionen.

- Mitglied im NEA-OECD „ClayClub“ und „Crystalline Club“, Assoziierter Editor der wissenschaftlichen Journale: *Applied Geochemistry*, *Chemie der Erde – Geochemistry* und *Grundwasser*, Gast-Editor: *Geothermal Energy Journal*, *Clays & Clay Minerals*, Mitglied des Wissenschaftsrates HZDR Dresden- Rossendorf, des Zentrums für Materialfeuchte CMM am KIT sowie des Expertenpanels für die Sicherheits- und Machbarkeitsstudie (SFC-1) von ONDRAF/ NIRAS und SCK·CEN.

Prof. Dr. rer. nat. Clemens Walther

Institut für Radioökologie und Strahlenschutz, Leibniz Universität Hannover

- Physiker und Kernchemiker (Diplom und Promotion an der Universität Mainz)
- 1999-2007 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
- Prodekan der Fakultät Mathematik und Physik, der Leibniz Universität Hannover Mitglied der Strahlenschutzkommission (SSK), und Leiter des Ausschusses „Radioökologie“, Chair des European Network on Nuclear and Radiochemistry Education and Training, Stellvertretender Vorsitzender des KVSF (Kompetenzverbund Strahlenforschung), Designierter Vorsitzender der Fachgruppe Nuklearchemie der GDCh

Die Mitglieder des Reviewteams waren in der Vergangenheit nicht an der Erstellung von Sicherheitsanalysen für das Endlager Konrad beteiligt. Sie waren auch in keiner Weise in die Bearbeitung der ÜSiKo involviert. Sie versichern, dass sie den Review unter Wahrung größtmöglicher Neutralität vorgenommen haben.

2. Langzeitsicherheit, Unterkritikalität in der Nachbetriebsphase und thermische Beeinflussung des Wirtsgesteins

2.1 Sachverhalt

Gegenstand des Reviews war der Bericht Rübél et al. (2018). Dessen Ausgangspunkt waren wiederum der Planfeststellungsbeschluss (NU 2002) sowie weitere Unterlagen (EU), für die Langzeitsicherheitsanalyse insbesondere die Erläuternde Unterlage (EU) 076.1 (Storck et al. 1986). Deren Inhalt wird in Rübél et al. (2018), Kapitel 2 zusammenfassend wiedergegeben.

Dort werden zunächst das der Analyse unterstellte Szenario („erwartete Entwicklung“: Wiederanstieg des Grundwassers, Mobilisierung der Radionuklide und deren Transport aus dem Grubengebäude über die Geosphäre in die Biosphäre) sowie dessen modelltechnische Abbildung zur Ermittlung der Konsequenzen beschrieben. Insbesondere werden die Informationsquellen, Grundlagen und Eingangsdaten für die Modellierung sowie eine Reihe Modellannahmen beschrieben (u. a. instantane Flutung des Grubengebäudes, instantaner Behälterausfall, gewählte Mobilisierungsdauer für die Radionuklide, gewählte Radionuklid-Sorptionskoeffizienten für die geologischen Formationen, Vernachlässigung der Reaktionskinetiken, Festlegung von Durchlässigkeiten und Porositäten für die Grundwassermodellierung, Umgang mit Störungen und Vereinfachungen bzgl. der Schichtenfolge bei der hydrogeologischen Modellierung). Es wird dargelegt, dass vereinfachende Modellannahmen bzgl. sensibler Sachverhalte auf eine Überschätzung potentieller Konsequenzen (Konservativität) ausgerichtet waren. Dies gilt insbesondere auch für die Ermittlung der für die Radionuklidausbreitung wesentlichen Fließpfade und Grundwasserlaufzeiten: In den zugrunde gelegten Rechnungen wurden die durch unterschiedliche Salinitätskonzentrationen bedingten Dichteunterschiede vernachlässigt („Süßwasser-Rechnungen“, vgl. Kapitel 6.1.3 in Rübél et al. 2018). Mit diesen Rechnungen wurden drei Fließpfade identifiziert, die Ausbreitungen über diese Pfade werden als „Ausbreitungsszenarien“ bezeichnet (Unterkreideszenario, Oxfordszenario, Cornbrashszenario). Für diese wurden jeweils eindimensionale Transportrechnungen durchgeführt, um so Konzentrations-Zeitverläufe der Radionuklide im Grundwasser des quartären Grundwasserleiters und daraus wiederum aufgrund der Allgemeinen Verwaltungsvorschrift (AVV) zu § 45 StrlSchV (BMJ 1990) die potentielle Strahlenexposition in der Biosphäre zu ermitteln.

Die Auftragnehmer (AN) beschreiben in Rübél et al. (2018) ihre Vorgehensweise bei der Durchführung des Auftrags, „zu untersuchen,

- ob sich in der Argumentation bezüglich der sicherheitsrelevanten Aussagen zu den genannten Themengebieten aus Sicht des Standes von W&T Abweichungen (Deltas) in der Einschätzung ihrer Sicherheitsrelevanz ergeben und
- ob der Sicherheitsnachweis in seiner Argumentation vollständig ist oder Lücken in der Nachweisführung enthält.“

Die Bewertung durch die AN erfolgte in folgenden Themenbereichen:

1. Szenarien
2. Mobilisierung und Transport im Grubengebäude
3. Grundwasserbewegung
4. Transport in der Geosphäre
5. Strahlenexposition
6. Kritikalität in der Nachbetriebsphase
7. Thermische Beeinflussung des Wirtsgesteins

Für die Bewertung wurde für jeden dieser Bereiche „ein hierarchisch strukturierter Top-Down Ansatz gewählt. Auf der ersten Ebene wurde beginnend von den wesentlichen zu untersuchenden sicherheitsrelevanten Aussagen im PFB festgestellt, auf welchen Informationen und Aussagen in den Verfahrensunterlagen diese in der zweiten Ebene beruhen. Die Aussagen der zweiten Ebene wurden aufgelistet und wiederum für jede einzelne Aussage geprüft, auf welchen Informationen und Aussagen diese wiederum in der dritten Ebene beruht. In jeder Ebene wurde somit iterativ geprüft, ob die ursprüngliche sicherheitsrelevante Aussage der ersten Ebene mit den vorliegenden Informationen ausreichend belegt ist, oder ob weitere Ebenen zu betrachten sind.“ (Rübel et al. 2018) Die Bewertung erfolgte mittels einheitlicher Bewertungsformulare für jede der hierarchisch gegliederten Aussagen. Die entstandenen Baumstrukturen der Aussagen und die ausgefüllten Formulare sind in den Anhängen B-H (Rübel et al. 2018) zusammengestellt und bilden die Grundlagen für den zusammenfassenden und bewertenden Text in Kapitel 6. Die Formulare enthalten einen deskriptiven Teil (Nummer, Titel, Ursprungsdokumente, Beschreibung der Aussagen, eingehende standortspezifische Informationen), eine „Bewertung der Gültigkeit der Information“, eine „Empfehlung zum Umgang mit dem Delta“ sowie Literaturangaben.

Zur Bewertung wird ausgeführt:

„Die Bewertung beinhaltet eine Aussage, ob die Informationen in den Verfahrensunterlagen ausreichend belegt sind und ob sie dem Stand von W&T entsprechen. Ist dies nicht der Fall, wird die Abweichung als Delta bezeichnet und dokumentiert. Die Bewertung der Deltas in den drei bearbeiteten Themengebieten erfolgt anhand folgender Indikatoren in Bezug auf die Sicherheitsaussage:

- Langzeitsicherheitsanalyse: Die potenzielle zukünftige Strahlenexposition der Bevölkerung durch die Freisetzung von Radionukliden [...]
- Kritikalität in der Nachbetriebsphase: Das Erreichen eines Zustandes einer sich selbst erhaltenden Kettenreaktion
- Thermische Beeinflussung des Wirtsgesteins: Die Erhöhung der Temperatur im Wirtsgestein über eine Temperaturdifferenz von 3 Kelvin hinaus.

Ein Delta gilt als sicherheitsrelevant, sobald der jeweilige Indikator durch das Delta in negativer Weise beeinflusst wird [...]. Falls im Rahmen des Umfangs der Arbeiten in der ersten Phase der ÜSiKo nicht zu klären ist, wie groß eine negative Auswirkung eines Deltas ist bzw. ob ein Delta eine negative oder positive Auswirkung auf den Indikator hat, dann ist im Zweifelsfall das Delta für eine zukünftige Quantifizierung in der zweiten Phase vorzusehen.“

„Da in der ersten Phase der ÜSiKo entsprechend dem Auftrag keine Modellrechnungen durchgeführt werden sollen, ist die Einschätzung zur Sicherheitsrelevanz entweder durch Expertenurteil, oder durch weniger aufwändige Abschätzungen zu beurteilen. Falls die Sicherheitsrelevanz ohne zusätzliche Modellrechnungen nicht zu klären ist, dann ist ein Delta im Zweifelsfall als sicherheitsrelevant anzusehen.“

Es wurden *a priori* zwölf denkbare Arten von Deltas unterschieden, die in die Gruppen „Fragen zu der Richtigkeit der Aussagen in den Verfahrensunterlagen“, „Deltas bezüglich neuer Erkenntnisse im Stand von W&T“, „Deltas bezüglich neuer Daten und sonstigen Informationen“ zusammengefasst wurden. Für identifizierte Deltas wurde dann eine Empfehlung ausgesprochen, die entweder „Überprüfung des Einflusses des Deltas auf die Sicherheitsaussage notwendig“ oder „Einfluss des Deltas auf die Sicherheitsaussage ist nach Expertenmeinung nicht signifikant, keine Überarbeitung notwendig“ lautete. Dabei haben die AN im Rahmen des Umfangs ihres Auftrags (z. B. durch Überschlagsrechnungen) soweit möglich eine Einschätzung vorgenommen, ob der jeweilige Indikator bei Berücksichtigung des Deltas wesentlich negativ beeinflusst werden könnte. Die Notwendigkeit einer Überprüfung wurde in denjenigen Fällen festgestellt, in denen die Einschätzung durch die AN nicht nachweisbar ergeben hatte, dass eine solche negative Beeinflussung ausgeschlossen werden kann.

„Bei der Analyse wurden insgesamt 36 Deltas identifiziert. [...] Bei 14 dieser Deltas wurde ein weiterer zukünftiger Überprüfungsbedarf auf Grund der Sicherheitsrelevanz festgestellt.“ (Rübel et al. 2018) Dieser Bedarf wurde von den AN jeweils näher charakterisiert, es wurden Vorschläge zum Vorgehen gemacht. Eine Zusammenfassung dieser 14 Deltas

findet sich in Tab. 7.1 (Rübel et al. 2018), deren Spalte „Beschreibung“ hier wiedergegeben wird (die Einträge umfassen i. d. R. mehrere Deltas):

Für gasförmige Radionuklide (C-14) ist deren Freisetzung aus dem Grubengebäude und Transport in der Geosphäre zu bewerten. Falls sich C-14 in gasförmigem Zustand bis in die Biosphäre ausbreiten kann, dann ist die potenzielle Strahlenexposition mit einem entsprechenden Expositionsmodell zu berechnen.
Der mögliche Einfluss von Kolloiden auf den Radionuklidtransport in Lösung ist zu bewerten.
Die Ausbreitung gelöster Radionuklide über den Unterkreidepfad (Szenario Ia) ist bezüglich <ul style="list-style-type: none"> - der Diffusion, - der Sorption von Iod in der Oberkreide und - des berücksichtigten Transportpfads neu zu bewerten.
Die Dosisberechnung ist an die aktuell gültige Strahlenschutzverordnung anzupassen.
Bei der Bewertung möglicher Ansammlung kritischer Spaltstoffkonzentrationen müssen die Punkte <ul style="list-style-type: none"> - Akkumulation von Spaltstoffen aufgrund von Ausfällung, - mögliche Ansammlungen höherer Aktiniden und - Einfluss bestimmter Moderatormaterialien ergänzt werden.

Über diese formalisierte Vorgehensweise hinaus haben die AN regulatorische Aspekte (Kap. 4) sowie den Umgang mit Ungewissheiten (Kap. 5) gesondert bewertet, da diese Aspekte sich dem oben beschriebenen Ansatz entziehen. Die AN legen dar,

- dass sie einen radiologischen Bewertungsmaßstab von $1 \cdot 10^{-4}$ Sv/a (ein Drittel des im PFB verwendeten Maßstabes) für dem Stand von Wissenschaft und Technik (W&T) entsprechend halten,
- dass sie die im PFB nicht vorgenommene Ausweisung eines einschlusswirksamen Gebirgsbereichs als nicht sicherheitsrelevantes Delta einordnen,
- dass kein sicherheitsrelevantes Delta hinsichtlich des Nachweiszeitraums bestünde, und
- dass über die an anderen Stellen bereits identifizierten Deltas hinaus ein Delta bzgl. des Umgangs mit Ungewissheiten von Daten und Parametern bestünde.

2.2 Bewertung

2.2.1. Allgemeines, Methodik

Das Reviewteam ist der Meinung, dass die oben beschriebene Methodik der AN sehr gut für eine systematische Ermittlung und Bewertung von Deltas geeignet ist. Auch die Vorgehensweise bei der Beurteilung der Sicherheitsrelevanz der Deltas (Versuch einer Einschätzung der Auswirkungen auf Indikatoren über Expertenurteile und Abschätzung, Einschätzung als sicherheitsrelevant nur „im Zweifelsfall“) ist nach Auffassung des Reviewteams angemessen, zielführend und sowohl der Aufgabenstellung als auch dem Vorsorgeprinzip gemäß des Kalkarurteils entsprechend. Darüber hinaus stellt das Reviewteam fest, dass der gewählte Ansatz für das Vorgehen und dessen Darstellung (Baumdiagramme für die strukturierte Behandlung sicherheitsrelevanter Aussagen, standardisierte Bewertungsformulare) hohen Ansprüchen an die Qualitätssicherung, Nachvollziehbarkeit und Transparenz genügen. Der Ansatz ist auch geeignet, die Vollständigkeit der Überprüfung zu verifizieren, eine diesbezügliche Überprüfung wurde allerdings aus Kapazitätsgründen durch das Reviewteam nicht umfassend vorgenommen. Die Punkte 1 bis 12 zur Kategorisierung der Ursachen möglicher Deltas (Rübel et al. 2018, Abschnitt 2.2.6) sind nach Auffassung des Reviewteams abdeckend.

Einige Formulierungen der AN sind nach Ansicht des Reviewteams irreführend oder zumindest unklar, z. B. „Dadurch wird sichergestellt, dass die planfestgestellte Sicherheit des Endlagers an das tatsächliche und wahrgenommene Sicherheitsniveau nach Stand von W&T angepasst wird.“ (Rübel et al. 2018, Kap. 1). Das Reviewteam interpretiert diese Aussage folgendermaßen:

Der materielle Sachverhalt (Zustand und Entwicklung des Endlagers, „tatsächliche Sicherheit“) kann je nach Stand von W&T mehr oder minder genau beschrieben werden („wahrgenommene(s) Sicherheitsniveau nach Stand von W&T“). Diese Beschreibung entspricht nicht notwendigerweise der im PFB („planfestgestellte Sicherheit“). Letztere müsste jedoch entsprechend des Kalkar-Urteils und der Aufgabenstellung nur dann geändert werden, wenn zu besorgen ist, dass sich aufgrund des heutigen Stands von W&T ungünstigere Einschätzungen als in den Aussagen des PFB ergeben. Die von den AN verwendete Formulierung „Möglicher Sicherheitsgewinn bzw. -verlust“ hält das Reviewteam insofern für irreführend, als es sich nicht um Änderungen des materiellen Zustands handelt. Einige Formulierungen im Bericht (Rübel et al. 2018) verwischen die Trennung zwischen tatsächlichem Sachverhalt und Modellvorstellung („Radionuklide [...] werden advektiv mit dem

Grundwasser [...] in die Biosphäre transportiert.“ „Die Trennung der oberen und unteren Grundwasserleiter [...] lässt sich [...] anhand von Modellrechnungen erklären.“)

Das Reviewteam schätzt ein, dass einige dem PFB zugrunde liegende Modellannahmen zu einer starken Überschätzung potentieller Konsequenzen führen (Konservativität). Dies gilt für die Annahmen zu den Behälterstandzeiten, zum Lösungszufluss und zu den Löslichkeitsgrenzen bei der Modellierung der Vorgänge im Grubengebäude, insbesondere aber für die Vernachlässigung des salinitätsbedingten Dichtegradienten bei der Modellierung der Grundwasserströmung und für die Durchführung lediglich eindimensionaler Transportrechnungen unter vollständiger Vernachlässigung der Matrixdiffusion. Dies wird durch die AN dokumentiert (Rübel et al. 2018), jedoch nach Auffassung des Reviewteams nicht in jeder ihrer Bewertungen umfassend berücksichtigt.

2.2.2. Regulatorische Aspekte und Umgang mit Ungewissheiten

Zur gesondert vorgenommenen Bewertung regulatorischer Aspekte und des Umgangs mit Ungewissheiten schätzt das Reviewteam ein:

Radiologischer Bewertungsmaßstab

Die von den AN zur Überprüfung der radiologischen Bewertungsmaßstäbe herangezogene Literatur (Rübel et al. 2018, Kapitel 4.1) ist nach Auffassung des Reviewteams vollständig und repräsentiert den derzeitigen Stand von W&T und der Regelung. Die AN zitieren insbesondere Empfehlungen der SSK (2010) und der ESK (2013), für das Endlager Morsleben einen Bewertungsmaßstab von $1 \cdot 10^{-4}$ Sv/a heranzuziehen, und schätzen ein: „Dieser Bewertungsmaßstab ist auf Grund der wissenschaftlichen Diskussion als Stand von W&T anzusehen.“

Das Reviewteam folgt den AN dahingehend, diesen Wert heranzuziehen. Es weist aber auch darauf hin, dass der Begriff „Stand von W&T“ in diesem Zusammenhang eine Objektivierbarkeit suggeriert, die nicht in vollem Umfang gegeben ist: Die Aushandlung solcher Bewertungsmaßstäbe ist ein soziotechnischer Prozess, der mit dem Begriff „Stand von W&T“ nur unvollständig beschrieben wird. Gegenstand eines überprüfbaren „Standes von W&T“ kann allenfalls das Verständnis und die Beschreibung von durch Noxen wie z. B. ionisierende Strahlung bewirkten Schädigungsprozessen sowie die Quantifizierung von deren Wirkungen sein. Radiologische Bewertungsmaßstäbe und vergleichbare Grenz- und Richtwerte dienen jedoch der Bewertung, ob ein durch solche Prozesse bewirktes Schadensausmaß bzw. die Wahrscheinlichkeit eines Schadens auch gesellschaftlich akzeptabel sind. Sie tragen somit bewertenden und normativen Charakter und werden von naturwissenschaftlich-technischen Erkenntnissen ausgehend in Aushandlungsprozessen

festgelegt (Kalmbach & Röhlig 2016). Es kann daher eingeschätzt werden, ob diesbezügliche Festlegungen (noch) dem aktuellen Stand des Diskurses und der Regelung entsprechen, der Begriff „Stand von W&T“ ist jedoch nur für Teilaspekte einer solchen Einschätzung relevant. Das Reviewteam versteht die Ausführungen der AN daher so, dass sie den Begriff „Stand von W&T“ in Zusammenhang mit radiologischen Bewertungsmaßstäben synonym für „Stand des Diskurses und der Regelung“ verwenden.

Sicherheitskonzept

Die Ausführungen der AN in Kapitel 4.2 zum Sicherheitskonzept sind auf die Frage gerichtet, ob und in wie weit an das Endlager Konrad der Anspruch nach Einschluss der Schadstoffe erhoben werden sollte und ob und in welcher Weise dabei das Konzept des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (ewG) herangezogen werden sollte. Die AN merken richtigerweise an, dass „das Endlager Konrad die Anforderungen an den ewG aus formaler Sicht nicht erfüllen“ muss (Rübel et al. 2018). Das Reviewteam folgt der Auffassung der AN, dass entsprechend des Standes von W&T Endlagersysteme den Einschluss von Schadstoffen gewährleisten sollten. Es interpretiert die von den AN zitierte Forderung der ESK zum Endlager Morsleben nach einer „inhaltliche(n) Auseinandersetzung mit dem Konzept des ewG“ dahin gehend, dass diese Einschlusswirkung überprüft werden soll: Nach Auffassung der ESK ist es „von grundlegender Bedeutung, dass wesentliche Anteile der Radionuklide in tiefen geologischen Strukturen eingeschlossen werden“ (ESK 2013). Das Reviewteam ist der Auffassung, dass der Ansatz der AN, die Einschlusswirkung anhand eines geeigneten Indikators (räumliche Verteilung der Radiotoxizitätskonzentration) zu überprüfen, sinnvoll und zielführend ist. Es folgt deren aus dieser Überprüfung abgeleiteten Auffassung, dass „das Fehlen der Ausweisung eines ewG für das Endlager Konrad nicht als sicherheitsrelevantes Delta zum Stand von W&T angesehen“ werden kann. Es weist darauf hin, dass über die Argumentation der AN hinaus, die wesentlich auf dem deutlichen Absinken des gewählten Indikators nach einem Drittel der jeweiligen Transportwege basiert, auch eine Bewertung der berechneten Indikatorwerte selbst¹ erfolgen kann: Becker et al. (2002) empfehlen für die Radiotoxizitätskonzentration im Biosphärenwasser einen Referenzwert von $2 \cdot 10^{-5} \text{ Sv/m}^3$. Dieser Wert könnte als Vergleichswert für die in Rübel et al. (2018) dargestellten Radiotoxizitätskonzentrationen herangezogen werden.

¹ Auch die AN machen hierzu eine Aussage: Sie schreiben, dass die Freisetzung „geringfügig im Vergleich mit dem bestehenden radiologischen Bewertungsmaßstab“ sei, ohne jedoch den Übergang von der Radiotoxizitätskonzentration zur effektiven jährlichen Dosis zu erläutern.

Nachweiszeitraum

Das Reviewteam folgt der Einschätzung der AN, dass kein sicherheitsrelevantes Delta bzgl. des Nachweiszeitraums besteht (Rübel et al. 2018, Kap. 4.3).

Ungewissheiten zu Szenarien

Die AN verweisen diesbezüglich in Rübel et al. (2018), Kapitel 5.1 auf die Bewertung in Kapitel 6.1.1. Dieser Gliederung folgend erfolgt auch die Einschätzung des Reviewteams in Kapitel 2.2.3 dieses Berichts.

Ungewissheiten zu Modellen

Das Reviewteam folgt der Argumentation der AN, dass diesbezüglich kein sicherheitsrelevantes Delta besteht (Rübel et al. 2018, Kap. 5.2). Hinsichtlich der Modellierung der Prozesse im Grubengebäude ist dies nach Auffassung des Reviewteams durch die stark konservativen Annahmen zu den Behälterstandzeiten, zum Lösungszufluss und zu den Löslichkeitsgrenzen bedingt, während eine Begründung anhand der Kürze der „Zeitdauern der Vorgänge im Grubengebäude verglichen mit den Transportzeiten in der Geosphäre“ weniger belastbar erscheint. Hinsichtlich des geologischen und hydrogeologischen Modells ist anzumerken, dass über die von den AN genannte Verwendung zweier diversitärer Ansätze (Schichtenmodell und Störzonenmodell) und der Anwendung der Methoden der Finiten Elemente sowie der Finite Differenzen in den verschiedenen Codes auch die diversitäre geologische und hydrogeologische Interpretation sowie darauf basierende Modellrechnungen im Auftrag der Planfeststellungsbehörde (insbesondere NLFb 1990a, b, GRS 1991a, b, 1993a-e, in Rübel et al. als GS 3, 4, 24, 25, 27, 28, 29, 30, 31 zitiert) eine zusätzliche Auseinandersetzung mit Modellunsicherheiten darstellen, die zum Vertrauen in die Robustheit der Sicherheitsaussage beiträgt. Die von den AN angesprochene Betrachtung von Ungewissheiten zu Modellen über den Bewertungszeitraum hinaus ist nach Auffassung des Reviewteams nicht erforderlich.

Ungewissheiten zu Daten und Parametern

Das Reviewteam folgt den Ausführungen der AN (Rübel et al. 2018, Kap. 5.3) und teilt die Auffassung, dass „keine Betrachtung von Ungewissheiten bezüglich Daten und Parametern nach dem Stand von W&T vorgenommen“ wurde. Für einzelne Parameterwerte wurden die Bewertungen durch die AN im Rahmen der systematischen Analyse (Rübel et al. 2018, Kap. 6) vorgenommen, vgl. Kapitel 2.2.3 dieses Berichts. Das Reviewteam folgt der Einschätzung der AN, dass aufgrund der Linearität der verwendeten Modelle das Fehlen einer probabilistischen Analyse nicht als sicherheitsrelevantes Delta anzusehen ist. Es weist darüber hinaus darauf hin, dass für bestimmte Teilaspekte eine solche Analyse im

Auftrag der Planfeststellungsbehörde durchaus vorgenommen wurde (GRS 1993f, in Rübel et al. 2018 als GS 32 zitiert). Allerdings ist das Reviewteam der Auffassung, dass die Aussagekraft einer probabilistischen Analyse für das verwendete hydrogeologische Modell angesichts der konservativen Modellannahmen (vgl. 2.2.1) sehr begrenzt ist.

2.2.3. Bewertung der systematischen Analyse der Antragsunterlagen durch die Auftragnehmer

Langzeitsicherheit

Szenarien

Das Reviewteam schätzt ein, dass der Stand von W&T zur Szenarientwicklung im Wesentlichen beim einschlägigen Workshop der OECD/NEA ermittelt und dokumentiert wurde (NEA 2016), und folgt dahin gehend nicht der Auffassung der AN, dass die im von den AN herangezogenen Bericht der GRS (1998) dargelegten Ergebnisse zum Stand von W&T „heute noch den Stand von W&T zum Umgang mit Szenariungewissheiten darstellen“.

Die AN legen in Kapitel 5.1 (Rübel et al. 2018) dar, dass bei sich bzgl. der Ableitung von Szenarien „in den letzten 25 Jahren zunehmend der Einsatz einer Zusammenstellung aller Merkmale, Ereignisse und Prozesse (FEP) des Endlagersystems durchgesetzt“² hätte und „zunehmend als Standardvorgehen nach Stand von W&T angesehen“ würde. Das Reviewteam weist darauf hin, dass neben diesen so genannten Bottom-Up-Ansätzen in den letzten Jahren auch zunehmend an Sicherheitsfunktionen orientierte Top-Down-Ansätze propagiert wurden. Die AN bezeichnen den Ansatz für die dem PFB zugrundeliegenden Ableitung von Szenarien (Storck et al. 1986, Kapitel 3) ebenfalls als „Top-Down“ – dieser unterscheidet sich jedoch deutlich von den oben genannten modernen „Top-Down“-Ansätzen: Storck et al. (1986) leiten Szenarien im Wesentlichen argumentativ und ohne formale Hilfsmittel ab, während moderne Top-Down-Ansätze Sicherheitsfunktionen definieren und mittels formalisierter Methoden untersuchen, in wie weit und wodurch diese beeinträchtigt werden können.

Die in der Praxis in den letzten Jahren angewandten Methoden verbinden meist beide Elemente: „Furthermore, these methods [...] are not properly described as being either top-down or bottom up, but rather embody aspects of both.“ (NEA 2016) Dies gilt auch für

² FEP = features, events, processes

den von den AN zur Überprüfung herangezogenen FEP-Katalog (Stark et al. 2014), in dem z. B. die „Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren“ dargestellt wird. Das Reviewteam sieht die Überprüfung der betrachteten Szenarien anhand dieses Katalogs durch die AN als eine wirkungsvolle Methode zur Ableitung möglicherweise sicherheitsrelevanter Deltas an. Es weist darauf hin, dass der AN in der Endfassung seines Berichtes die Bedeutung der spezifischen Annahmen (sA) für die Überprüfung deutlicher machen sollte.

Das Reviewteam folgt im Wesentlichen der Argumentation der AN in Kapitel 6.1.1 (Rübel et al. 2018) zur Identifizierung und Einordnung von Deltas zur Szenarien, regt jedoch für die Endfassung des Berichts eine ausführlichere Argumentation zu den Szenarien „Ausbreitung über den Schacht“ und „Ausbreitung durch verfüllte Bohrungen“ auf der Basis des Formulars 3.3.2 und der Unterlage EU 437 an. Spezieller Fokus dieser Erläuterungen sollten die in Formular 3.2.2 erwähnte fehlende genaue Lage-Berücksichtigung der Bohrungen auf Grund der technischen Anforderungen des Modellgitters und der Ausschluss einzelner alter Bohrungen darstellen.

Zur Verwendung der Begriffe „Unterkreideszenario“, „Oxfordszenario“, „Cornbrashszenario“ verweist das Reviewteam auf die Anmerkung zu Beginn des Abschnitts „Transport in der Geosphäre“. Diese sind keine Szenarien, die mit den oben beschriebenen Methoden abgeleitet wurden, sondern Beschreibungen der Radionuklidausbreitung über unterschiedliche Transportpfade, die sich aus den Grundwassermodellen auf Basis der rezenten hydraulischen Situation ergeben. Die gewählten Grundwassermodelle arbeiten mit stationären Randbedingungen, d. h. konstanten hydrogeologischen Verhältnissen entsprechend der jeweiligen Grundwasserhöhengleichen über die betrachtete Zeit (TÜV 1997a).

Mobilisierung und Transport im Grubengebäude

Das Reviewteam folgt der Argumentation der AN in Kapitel 6.1.2 (Rübel et al. 2018) zur Identifizierung und Einordnung von Deltas.

Grundwasserbewegung

Die generelle Vorgehensweise zur Charakterisierung der Grundwasserbewegung und die durchgeführten Erkundungsarbeiten zur Ermittlung der Gesteinseigenschaften (mikrofaunistische Faziesanalyse), die seismische Kalibrierung auf Basis dieser Daten und Ermittlung der vertikalen Ausdehnung basierend auf 256 Schichtenverzeichnissen aus Bohrungen ist, wie vom AN festgestellt (Rübel et al. 2018, Kap. 6.1.3), weiterhin Stand von W&T und konnte die weitflächig lückenlose tonige Barriere der Unterkreide im Hangenden des Endlagers Konrad und die geringere Verbreitung der sandigen Unterkreideschichten nachweisen (BGR 1988, EU 232).

Gestützt werden die Aussagen zu sehr geringen Grundwasserbewegungen bzw. langen Verweilzeiten weiterhin auf isotopengeochemische Untersuchungen u. a. zu H-3, C-14 und He-4. Das Fehlen von H-3 und C-14 sowie hohe Anreicherungen von radiogenem He und signifikante Abweichungen der isotopischen Zusammensetzung von meteorischen Wässern sprechen für Verweilzeiten im Bereich von Millionen Jahren dieser Wässer (siehe Sonntag 1988, EU 200) und dienen als zusätzlicher Beweis für die sehr niedrigen Permeabilitäten der Geologie der Umgebung des Schachts Konrad. Qualitätsgesicherte Daten zu den Unterkreide-Formationen des Schachts Konrads (letztes Revisionsdatum 15.11.2003) inklusive Permeabilitätsdaten sind als Teil der internationalen Kompilation des NEA Clay Club Katalogs zu Charakteristiken von Tongesteinsformationen publiziert worden (NEA 2005b) und sollten vom AN in das Verzeichnis der aktuellen Literatur aufgenommen werden.

Das Reviewteam stimmt mit den Aussagen des AN überein, dass auf Basis der Modellannahmen konstanter hydraulischer Randbedingungen über den gesamten Nachweiszeitraum vor dem Hintergrund zukünftiger Entwicklungen (Gletscherüberfahung des Standorts nach etwa 150.000 Jahren einschließlich potentieller Umkehr der regionalen Fließrichtung durch Vorfluterblockierung) zumindest eine Diskussion der Langzeitsicherheitsanalyse und eine Beschreibung des Umgangs mit Unsicherheiten erfolgen müsste (Rübel et al. 2018, Kap. 6.1.3) und hier ein Delta zu identifizieren ist (siehe auch Vidstrand et al. 2010 und Selroos & Follin 2010 zur Behandlung dieser Fragestellung).

Das Reviewteam teilt die Meinung der AN, dass die Informationen auf Basis der Gesamtheit der Daten aus dem hydrogeologischen Modell und den Isotopendaten sowie der Erkenntnisse zu der Lithologie und zu Formationswässern aus der geologischen Vergangenheit (Saale- und Weichseleiszeit) hinsichtlich der Beeinflussung der Ablagerungen der Oberkreide, der Unterkreide und der tiefer liegenden Schichten ausreichen, um Langzeitsicherheitsanalysen hinsichtlich zukünftiger Kaltzeiten abzudecken. Wie die AN richtig feststellen, ist die „Vernachlässigung der Dichte in den durchgeführten Modellrechnungen im Rahmen des PFV [...] sicherheitsgerichtet, da sie in den Modellrechnungen zu höheren Darcy- und Transportgeschwindigkeiten führt.“ (Rübel et al. 2018, Kap. 6.1.3). Dass die Grundwassergeschwindigkeit deutlich niedriger ist als in den Ergebnissen der Modellrechnungen, wird durch die Ergebnisse der Standorterkundung (z. B. Grundwasseralter) bestätigt. Das Reviewteam ist der Auffassung, dass dieser Sachverhalt bei der Bewertung von Deltas zu berücksichtigen ist.

Das Reviewteam folgt zusammenfassend der Darlegung der AN, dass bzgl. der Grundwassermodellierung keine sicherheitsrelevanten Deltas vorliegen. Insbesondere teilt es

die Auffassung der AN, dass sich aus den seit dem PFB deutlich verbesserten Möglichkeiten der Grundwasser- und Transportmodellierung wegen der Konservativität der Modellannahmen kein sicherheitsrelevantes Delta ergibt.

Transport in der Geosphäre

Im einschlägigen Kapitel 6.1.4 (Rübel et al. 2018) und auch nachfolgend in diesem Bericht werden, den Formulierungen in den Planunterlagen folgend, die Ausbreitungen von Radionukliden über die unterschiedlichen mit den Grundwassermodellen ermittelten Fließpfade als Szenarien bezeichnet („Unterkreideszenario“, „Oxfordszenario“, „Combrashszenario“). Wegen der häufigen Verwendung dieser Begriffe und um Verwechslungen vorzubeugen, weist das Reviewteam darauf hin, dass es sich hierbei nicht um Szenarien im Sinne potentieller künftiger Entwicklungen des Endlagersystems handelt, wie sie oben diskutiert werden. Es handelt sich bei diesen Fließpfad-Modellierungen eher um Sensitivitätsanalysen der möglichen Unsicherheiten bzgl. der Annahmen zu hydraulischen Durchlässigkeiten einzelner geologischer Einheiten (z.B. Auswirkungen des k_f -Werts der Unterkreidetone von 10^{-10} oder 10^{-12} m/s) bei stationären Randbedingungen, d.h. konstanten hydrogeologischen Verhältnissen über den Beobachtungszeitraum und Vorgabe eines hydraulischen Potentials entsprechend der gemessenen Grundwasserhöhengleichen.

Das Reviewteam teilt nur bedingt die Auffassung der AN, dass das „in der Langzeitsicherheitsanalyse für das Endlager Konrad verwendete Vorgehen, aus dem Modell zur Grundwasserbewegung per particle tracking bevorzugte Fließwege zu identifizieren und entlang dieser Fließwege ein 1D-Modell zur Berechnung des Radionuklidtransports zu erstellen“ Stand von W&T sei (Formular 4.1), mehrdimensionale Transportberechnungen sind durchaus durchführbar. Allerdings würden solche Rechnungen lediglich zum Abbau von Konservativitäten führen, es ergibt sich kein sicherheitsrelevantes Delta.

Das Reviewteam folgt der Argumentation der AN in Kapitel 6.1.3 (Rübel et al. 2018) bei der Identifizierung von Deltas.

Bei dem Delta zum kolloidgetragenen Radionuklidtransport in der flüssigen Phase (FEP 63) ist anzumerken, dass nach jetzigem Stand von W&T auf Grund der beobachteten hohen Salzfrachten in den Porenwässern (z.B. Ort 300 196 g/L und Hilssandstein 168 g/L Salzgehalt nach Sonntag 1988, EU 200) nur eine Stabilisierung geringer Kolloid-/Nanopartikel-Konzentrationen unter diesen geochemischen Randbedingungen zu erwarten ist (siehe auch Schäfer et al. 2005, 2012). Der kolloidgetragene Radionuklidtransport sollte daher nur eine sehr untergeordnete Rolle spielen, ist aber für die Vollständigkeit der Langzeitsicherheitsanalyse zu betrachten.

Der Transport von Radionukliden in der Gasphase (FEP 70) im Grubengebäude (siehe Rübel et al. 2018, Kapitel 6.1.2) und der Transport in der Geosphäre (siehe Rübel et al. 2018, Kapitel 6.1.4) wurde vom AN als zweites Delta identifiziert und die radiologischen Konsequenzen sind als sicherheitsrelevanter Aspekt zu betrachten.

Der Vorschlag des AN, die weiterführenden Arbeiten zum Transport in der Gasphase auf C-14 zu beschränken, kann vom Reviewteam nicht ganz nachvollzogen werden, die Betrachtung des gasförmigen Austrittspfads sollte auch auf Se-79 erweitert werden. Selen-Alkylierung ist in der Natur durchaus verbreitet und eine Reihe von Mikroorganismen sind in der Lage unter unterschiedlichsten geochemischen Randbedingungen diese chemische Umwandlung zu betreiben und Raten sind bereits publiziert (siehe z.B. Peitsch et al., 2010, Winkel et al., 2012). Daher sollte der potentielle Ausbreitungspfad von volatillem, methyliertem Se als Funktion des im Abfall vorhandenen Gesamtinventars an Se-79 ebenfalls im Rahmen des gasförmigen Austrittspfads betrachtet werden.

Weiterhin regt das Reviewteam bzgl. der Bewertung zur Sicherheitsrelevanz des Deltas hinsichtlich der Wahl der K_D -Werte für I-129 folgende Überlegung an:

In der von den AN vorgenommenen Nachrechnung für den Transport von I-129 (Rübel et al. 2018, Tab. 6.3) wurde für das Unterkreideszenario konservativ angenommen, dass Iod in den Ablagerungen des Turon und Cenoman (Plänerkalke und Mergelkalke) nicht sorbiert wird. Unter dieser Annahme ergibt sich eine Konzentration im oberflächennahen Aquifer, die um ca. eine Größenordnung höher liegt als die für die Planunterlagen ermittelte. Diese tritt bereits nach 324 000 Jahren auf (PFB: 3 700 000 Jahre). Sowohl die Konzentration als auch der korrespondierende Zeitpunkt liegen damit in der gleichen Größenordnung (etwa doppelt so hohe Konzentration, nämlich $87,3 \text{ Bq/m}^3$) wie die für das Oxfordszenario errechneten Werte. Auch die mit einem dreidimensionalen Modell mit dem Code CFEST errechneten Laufzeiten liegen in der genannten Größenordnung.

Für die Konzentrationen im Oxfordszenario wurden in der ergänzenden Unterlage EU 353 (GSF 1991) effektive jährliche Dosen von $1,4 \cdot 10^{-5} \text{ Sv}$ (Erwachsener) bzw. $1,1 \cdot 10^{-5} \text{ Sv}$ (Kleinkind) berechnet (Tabellen 4-3, 4-4, 4-7 und 4-8). Es ist daher davon auszugehen, dass sich für das Unterkreideszenario bei einer Neuberechnung etwa doppelt so hohe Werte ergeben würden. Wegen der Dominanz von I-129 bzgl. der berechneten effektiven jährlichen Dosis und der unterschiedlichen Ankunftszeiten der Nuklide entspräche dieser Wert auch der gesamten ermittelten jährlichen effektiven Dosis. Dies setzt allerdings eine Berechnung mittels der 1991 zu unterstellenden Dosiskonversionsfaktoren voraus, die in-

zwischen aktualisiert wurden (s. nächster Abschnitt). Das Reviewteam regt an, die jährliche effektive Dosis, die sich bei Anwendung aktueller Dosiskonversionsfaktoren aus der Konzentration von $87,3 \text{ Bq/m}^3$ I-129 ergibt, unter Würdigung der konservativen Modellannahmen (vgl. 2.2.1) und der radiologischen Bewertungsgrundlagen (vgl. 2.2.2) als Grundlage für eine Entscheidung heranzuziehen, ob die vom AN empfohlene Neuberechnung des Transports von I-129 tatsächlich erforderlich ist. Auch die Bewertung der übrigen Deltas sollte unter Berücksichtigung der Konservativität erfolgen, die dem PFB und letztlich auch den Empfehlungen der AN zugrunde liegen. Die Auswirkungen der konservativen Annahmen lassen sich allerdings nicht mit einfachen Mitteln quantifizieren, so dass sie lediglich als qualitatives Argument herangezogen werden können. Ein Hinweis auf die Auswirkungen ergibt sich aus den durch die AN in Formular 3.3.1 (Rübel et al. 2018) dargestellten Informationen zu Grundwasserrechnungen mit Berücksichtigung der Dichteabhängigkeit der Grundwasserströmung: „Die Darcy-Geschwindigkeit des Grundwassers im Oxford ist im Ergebnis bei Berücksichtigung der Dichte etwa einen Faktor 10 geringer als bei Vernachlässigung der Dichte (Süßwasser). Im Maximum treten Unterschiede von einem Faktor 100 auf.“

Strahlenexposition

Das Reviewteam folgt prinzipiell der Argumentation der AN in Kapitel 6.1.5 (Rübel et al. 2018) zur Identifizierung und Einordnung von Deltas. Es empfiehlt, die künftig (ab 1.1.2019) gültige Strahlenschutzverordnung und deren einschlägige nachgeordnete Bestimmungen zugrunde zu legen.

Kritikalität in der Nachbetriebsphase

Das Reviewteam folgt der Argumentation der AN in Kapitel 6.2 (Rübel et al. 2018) zur Identifizierung und Einordnung von Deltas. Es teilt die Meinung der AN, dass nicht jederzeit eine homogene Verteilung der Spaltstoffe im Grubengebäude vorliegen muss. Das Reviewteam teilt ebenfalls die Auffassung, dass kritische Konzentrationen in Lösung vermutlich nicht auftreten. Die Empfehlung der AN, den vollständigen Kritikalitätsnachweis für alle höheren Actiniden durchzuführen, empfiehlt das Reviewteam zu ergänzen durch die Forderung, realistische Modelle zur Löslichkeitslimitierung hinzuzuziehen (Abbau von Konservativitäten in den Annahmen zur Lösung). Die Untersuchung von Löslichkeits- und Fällungsprozessen sieht das Reviewteam als notwendig an, um den Kritikalitätsnachweis geschlossen führen zu können.

Thermische Beeinflussung des Wirtsgesteins

Das Reviewteam folgt der Argumentation der AN Rübél et al. (2018) in Kapitel 6.3 zur Identifizierung und Einordnung von Deltas.

2.2.4. Zusammenfassung

Vollständigkeit: Nach Auffassung des Reviewteams ist der von den AN gewählte methodische Ansatz geeignet, die Vollständigkeit der Überprüfung zu verifizieren, eine diesbezügliche Überprüfung wurde allerdings aus Kapazitätsgründen durch das Reviewteam nicht umfassend vorgenommen. Nach Auffassung des Reviewteams wurden alle für die Sicherheit eines Endlagers relevanten Themen betrachtet. Die abgeleiteten Empfehlungen zu den abgeleiteten Deltas sind im Wesentlichen vollständig, eine Ausnahme bildet nach Auffassung des Reviewteams die Empfehlung zum Gaspfad. Hier empfiehlt das Reviewteam über die Betrachtung von C-14 hinaus auch die von Se-79. Das Reviewteam hat über die von den AN ermittelten sicherheitsrelevanten Deltas hinaus keine weiteren identifiziert.

Richtigkeit: Die Ermittlung des aktuell angemessenen Standes von W&T wurde im Wesentlichen richtig vorgenommen. Zusätzlich zu den von den AN herangezogenen Unterlagen sieht das Reviewteam zur Methodik des Langzeitsicherheitsnachweises die „Safety Case Brochure“ (NEA 2013) und zur Szenarientwicklung die Workshop-Dokumentation (NEA 2016) sowie das CLAYTRAC- Projekt (NEA 2009; Mazurek et al. 2011) (zur Interpretation natürlicher Tracerprofile über die geologischen Formationen hinweg zur Ermittlung des großräumigen und langfristigen Transportverhaltens) als wesentlich an. Ein Hinzuziehen dieser Dokumente würde jedoch nach Auffassung des Reviewteams zu keinen Änderungen bzgl. der Ableitung sicherheitsrelevanter Deltas führen. Die abgeleiteten Empfehlungen für die weiterführenden Untersuchungen in der Phase 2 sind weitestgehend richtig, eindeutig und klar formuliert. Hinsichtlich einiger Deltas, insbesondere in Zusammenhang mit der Radionuklidfreisetzung und der Kritikalitätsberechnung, ergeben sich jedoch aus den Ausführungen der AN Ermessensspielräume bei der Konzeption und der Leistungsbeschreibung der Phase 2. Diesbezüglich regt das Reviewteam eine stärkere Berücksichtigung der den Planunterlagen zugrundeliegenden Modellannahmen bei der Bewertung an.

Nachvollziehbarkeit: Das Reviewteam würdigt die Methodik der AN zur Ermittlung und Bewertung von Deltas, die ein systematisches und nachvollziehbares Vorgehen bewirkt sowie eine umfassende Bewertung der Planunterlagen erlaubt und die nach Einschätzung des Reviewteams durch die AN konsequent angewendet wurde. Das Reviewteam folgt

den Argumentationen der AN weitgehend, schätzt aber den Stand von W&T zu einigen Sachverhalten anders als die AN ein (s. o.). Dies hat jedoch keinen Einfluss auf die Ermittlung und Bewertung von Deltas.

Nach dem Verständnis des Reviewteams wurden die AN durch die Fragerunde (vgl. Kapitel 1) auf einige kleinere Unstimmigkeiten, Verkürzungen und Unklarheiten bei den Darlegungen im Bericht (Rübel et al. 2018) aufmerksam, die zu Änderungen in der Endfassung führen werden. Diese Punkte sind im vorliegenden Bericht nicht aufgeführt.

Der Leistungsbeschreibung entsprechend sind nachfolgend die von den AN identifizierten sicherheitsrelevanten Deltas tabellarisch aufgeführt und kommentiert:

Tabelle 1: Zusammenstellung der Deltas zu Langzeitsicherheit, Unterkritikalität in der Nachbetriebsphase und thermischer Beeinflussung des Wirtsgesteins

Einschätzung der AN	Einschätzung des Reviewteams
<p>Für gasförmige Radionuklide (C-14) ist deren Freisetzung aus dem Grubengebäude und Transport in der Geosphäre zu bewerten. Falls sich C-14 in gasförmigem Zustand bis in die Biosphäre ausbreiten kann, dann ist die potenzielle Strahlenexposition mit einem entsprechenden Expositionsmodell zu berechnen.</p>	<p>Entsprechende Untersuchungen sollten auch für Se-79 erfolgen.</p>
<p>Der mögliche Einfluss von Kolloiden auf den Radionuklidtransport in Lösung ist zu bewerten.</p>	<p>Der kolloidgetragene Radionuklidtransport sollte nur eine sehr untergeordnete Rolle spielen, ist aber für die Vollständigkeit der Langzeitsicherheitsanalyse zu betrachten.</p>
<p>Die Ausbreitung gelöster Radionuklide über den Unterkreidepfad (Szenario Ia) ist bezüglich</p> <ul style="list-style-type: none"> - der Diffusion, - der Sorption von Iod in der Oberkreide und - des berücksichtigten Transportpfads neu zu bewerten. 	<p>Das Reviewteam regt an, die jährliche effektive Dosis, die sich bei Anwendung aktueller Dosiskonversionsfaktoren aus den durch die AN abgeschätzte Konzentration von I-129 ergibt, unter Würdigung der konservativen Modellannahmen und der radiologischen Bewertungsgrundlagen als Grundlage für eine Entscheidung heranzuziehen, ob die vom AN empfohlene Neuberechnung des Transports von I-129 tatsächlich erforderlich ist. Auch die Bewertung der übrigen Deltas sollte unter Berücksichtigung der Konservativität erfolgen, die dem PFB und letztlich auch den Empfehlungen der AN zugrunde liegen.</p>
<p>Die Dosisberechnung ist an die aktuell gültige Strahlenschutzverordnung anzupassen.</p>	<p>Das Reviewteam folgt der Argumentation der AN. Es empfiehlt, die künftig (ab 1.1.2019) gültige Strahlenschutzverordnung und deren einschlägige Nachfolgebestimmungen zugrunde zu legen.</p>
<p>Bei der Bewertung möglicher Ansammlung kritischer Spaltstoffkonzentrationen müssen die Punkte</p> <ul style="list-style-type: none"> - Akkumulation von Spaltstoffen aufgrund von Ausfällung, - mögliche Ansammlungen höherer Aktiniden und - Einfluss bestimmter Moderatormaterialien ergänzt werden. 	<p>Das Reviewteam folgt der Argumentation der AN. Es empfiehlt, realistische Modelle zur Löslichkeitslimitierung hinzuzuziehen (Abbau von Konservativitäten in den Annahmen zur Lösung).</p>

3. Störfallanalysen

3.1 Sachverhalt

Gegenstand des Reviews war der Bericht Campo et al. (2018). Dessen Ausgangspunkt waren wiederum der PFB sowie 40 erläuternde Unterlagen (EU), im Besonderen der Bericht EU 228 „Ermittlung und Klassifizierung von Störfällen“ (Gründler et al. 1995).

Die gewählte Vorgehensweise bei der Überprüfung der im Rahmen des Planfeststellungsverfahrens durchgeführten Störfallanalyse mit dem Ziel der Identifikation sicherheitsrelevanter Diskrepanzen, Deltas, zwischen dem dem PFB zu Grunde liegenden Stand von W&T einerseits und dem Stand von W&T im Jahr 2018 andererseits wird im Bericht der AN in Abschnitt 3.1 erläutert. Die AN weisen darauf hin, dass „eine vollständige Analyse der gesamten [Anmerkung der Autoren: vom BGE als Auftraggeber zur Verfügung gestellten] Unterlagen in der vorgesehenen Bearbeitungsdauer von 4-5 Monaten für diesen Auftrag der Üsiko nicht möglich“ war. Als Ziel der Untersuchung wurde daher definiert, „zu untersuchen, ob aus heutiger Sicht

- sich in der Argumentation bezüglich der sicherheitsrelevanten Aussagen zum Themenbereich aus Sicht des Standes von Wissenschaft und Technik Deltas in der Einschätzung ihrer Sicherheitsrelevanz ergeben und ob
- der Sicherheitsnachweis in seiner Argumentation vollständig ist oder Lücken in der Nachweisführung enthält.“

Hierzu wird von Campo et al. (2018) in einem strukturierten Ansatz die Störfallanalyse in mehrere Ebenen aufgeschlüsselt und die betrachteten Störfälle werden auf diesen Ebenen in acht Themenbereiche eingeordnet. Die Bewertungen werden auf einheitlichen Formblättern vorgenommen. Ein Delta gilt dann als identifiziert, wenn entweder eine Information der Antragsunterlagen nicht ausreichend belegt ist oder sie nicht dem aktuellen Stand von W&T entspricht. „Ein Delta gilt als sicherheitsrelevant, sobald der Bewertungsmaßstab durch das Delta in negativer Weise beeinflusst werden kann, z. B. dass eine höhere Strahlenexposition zu erwarten ist. ... Falls im Rahmen des Umfangs der Arbeiten in der ersten Phase der ÜsiKo gemäß dem Auftrag nicht zu klären ist, wie groß eine Auswirkung eines Deltas ist, bzw. ob ein Delta eine negative oder positive Auswirkung auf das Bewertungsmaß hat, dann ist im Zweifelsfall das Delta für eine zukünftige Quantifizierung in der zweiten Phase vorzusehen“ (Campo et al. 2018)

Für die Entscheidung, dass kein Delta vorliegt, stehen nach dem Bewertungsschema drei erläuternde Fazite zur Auswahl:

- „- Aussage ist mit dieser Ebene ausreichend belegt
- Aussage ist mit Berücksichtigung weiterer Ebenen ausreichend belegt
- Weitere Ebenen werden betrachtet“ (Campo et al. 2018)

Für den Fall der Identifizierung eines Deltas wird in (Campo et al. 2018) festgehalten „Aussage ist nicht belegt, Lücke im Stand von Wissenschaft und Technik identifiziert.“

In weiteren Schritten werden die Art des Deltas näher spezifiziert und Empfehlungen zum Umgang mit dem Delta gegeben.

Es wurden gemäß der Angabe von Campo et al. (2018) insgesamt 17 Deltas identifiziert (nach unserer eigenen Zählung allerdings nur 16 Deltas, siehe auch Kapitel 3.2.5). Bei allen im Bericht identifizierten Deltas werden weitere Untersuchungen empfohlen.

3.2 Bewertung

3.2.1. Bewertung des grundsätzlichen Vorgehens

Im Rahmen des Planfeststellungsverfahrens für das Endlager Konrad wurde von der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH eine Störfallanalyse durchgeführt (Gründler et al. 1995). Darin wurden 79 mögliche Ereignisse identifiziert, den Störfall-Leitlinien des Bundesministeriums des Innern (RS-Handbuch) folgend in Klassen eingeteilt, in Störfallgruppen zusammengefasst und bewertet. Im Rahmen der dritten Revision der Störfallanalysen im Dezember 1995 wurde die Zahl der betrachteten Ereignisse auf 78 reduziert, da das Ereignis „Beaufschlagung der Abfallgebinde mit Versatzmaterial der Versatzschleudermaschine“ wegen der Umstellung auf Pumpversatz entfallen konnte. Von Campo et al. (2018) werden dementsprechend 78 Ereignisse und daher alle Störfälle der Sicherheitsanalysen betrachtet.

Die von Campo et al. (2018) gewählte Vorgehensweise wird durch das Reviewteam als schlüssig und zielführend bewertet. Sie ist geeignet, alle im Rahmen der Störfallanalysen betrachteten sicherheitsrelevanten Ereignisse zu erfassen und am aktuellen Stand von W&T zu spiegeln. Weit überwiegend ist die vorgenommene Beurteilung und Ableitung von Deltas durch Campo et al. (2018) schlüssig. Auf die Fälle, in denen das Reviewteam zu einer abweichenden Bewertung kommt, wird im Folgenden weiter eingegangen. Sofern es sich um offene Punkte handelt, die in der ÜSiKo aber nicht zu klären waren, sondern Gegenstand des weiteren Inbetriebnahmeverfahrens für das Endlager Konrad sind, wird auf solche Aspekte hingewiesen.

Nicht durch diese Vorgehensweise erfasst werden Sachverhalte, die nicht Gegenstand des PFB waren. Falls zwischenzeitlich solche Sachverhalte hinzugekommen sein sollten, sollten sie in der Phase 2 der ÜSiKo noch betrachtet werden.

3.2.2. Beurteilung des herangezogenen Bewertungsmaßstabs

Die Störfallanalyse für das Endlager Konrad wurde auf Basis der Störfall-Leitlinien für Kernkraftwerke mit Druckwasserreaktoren (BMI 1983) durchgeführt. Diese Leitlinien wurden durch die Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke (BMU 2012) fortgeschrieben. Von Campo et al. (2018) werden die aktuellen Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke sinngemäß zur Bewertung der Einhaltung der Anforderungen nach Stand von W&T herangezogen.

Die AN nehmen mehrfach Bezug auf die Technischen Anforderungen an Schacht- und Schrägförderanlagen (TAS) (Bayr. Oberbergamt et al. 2005). Diese Anforderungen wurden zuletzt 2005 überarbeitet. Dabei wurde eine Reihe von Änderungen vorgenommen. Die Literaturangabe im Bewertungsblatt legt nahe, dass die AN die aktuelle Fassung der TAS bei ihrer Bewertung zugrunde gelegt haben. Nach Ansicht der Autoren sollte dennoch explizit dargelegt werden, ob die Schachtförderanlage den geänderten TAS mit Stand 2005 entspricht. Falls dies nicht der Fall sein sollte, müsste erläutert werden, aus welchem Grund Änderungen wie beispielsweise die Verwendung von Berechnungsanleitungen an Stelle von Bruchkrafttabellen keine Auswirkungen auf die Störfallanalysen haben.

Im Bewertungsblatt 2.1.1.5 – Absturz von Abfallgebinden bei der Förderung nach unter Tage - (Campo et al. 2018) wird angegeben, dass es in den Jahren seit Erstellung des PFB zu keinen Abstürzen von Förderkörben aufgrund des alleinigen technischen Versagens der Seile kam. Auf Nachfrage wurde bezüglich dieser Aussage der Arbeitsbericht NAB 14-75 der NAGRA (NAGRA 2014) angeführt, den die AN im Auftrag der NAGRA erstellt haben. In Kapitel 10, Absatz 2 dieses Berichts wird angegeben, dass „im Rahmen dieser Studie [...] der Stand der Technik von Schachtförderanlagen in Deutschland ausführlich dargestellt wurde“. In der genannten Studie wird festgestellt, dass „seit 1950 [...] an Schachtförderanlagen in Deutschland nur in sehr wenigen Fällen Förderseile gerissen“ seien und „in keinem dieser Fälle [...] ein unsicherer Zustand des Seils als Folge von Drahtbrüchen, Verschleiß oder Korrosionsangriff Schuld“ war. Der Schluss, dass eine Auslegung der Schachtförderanlage nach dem deutschen Regelwerk die geforderte Sicherheit biete, ist also durchaus zulässig.

Für die Genehmigung der Schachtförderanlage ist das niedersächsische Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie zuständig, das entsprechend eine Auslegung nach der

aktuellen Fassung der TAS fordern kann. Wir weisen darauf hin, dass es sich an dieser Stelle nicht um eine Feststellung des zum Zeitpunkt des Beginns der Phase 1 der ÜSiKo aktuellen internationalen Standes von W&T handelt. Nach Auffassung des Reviewteams sollte vom AN zudem dargelegt werden, aus welchen Gründen davon ausgegangen werden kann, dass die TAS von 2005, die sich darüber hinaus nach Angabe der AN in der vorgenannten Studie zur Zeit in einer grundlegenden Überarbeitung befinden, den aktuellen Stand von W&T widerspiegeln.

3.2.3. Berechnung der Störfalldosis

Das maximal zulässige Aktivitätsinventar eines Radionuklids pro Transporteinheit wurde in den Annahmebedingungen für das Endlager Konrad so festgelegt, dass die Strahlenexposition in der Umgebung der Anlage beim ungünstigsten Störfall die Störfallplanungswerte der Strahlenschutzverordnung nicht überschreitet. Durch Selbstbeschränkung wurde die maximal zulässige effektive Dosis dabei auf 20 mSv begrenzt (statt 50 mSv gemäß StrlSchV). Seit 2003 liegt mit (SSK 2003) eine neue Fassung der Störfallberechnungsgrundlagen vor, anhand derer die Störfalldosen zu berechnen sind. Gegenüber den früheren Fassungen ist vor allem der Muttermilchpfad für den Säugling hinzugekommen und es gibt deutliche Unterschiede in den anzusetzenden Verzehrstraten. Die AN halten in Formblatt 1.2 eine Neuberechnung der Störfalldosen für erforderlich, werten dies aber nicht als Delta und empfehlen keine weitere Untersuchung.

Auf Nachfrage haben die AN mitgeteilt, dass sie die festgestellten Abweichungen im Berechnungsverfahren bereits jetzt schon als so geringfügig einstufen, „dass ein Sicherheitsdefizit im Sinne einer möglichen Nichteinhaltung von Störfallplanungswerten ausgeschlossen werden kann“. Diese Aussage kann aufgrund eigener überschlägiger Vergleichsrechnungen nicht nachvollzogen werden: Für langlebige Radionuklide, die überwiegend über den Ingestionspfad wirksam sind (z. B. Tc-99), kann es demnach zu deutlich höheren ermittelten Dosen kommen. Aufgrund des Vorgehens bei der Begrenzung der zulässigen Aktivitätsinventare (vgl. EU 371, Fett et al. 1990), ist die Notwendigkeit von Änderungen nicht von vornherein auszuschließen. Eine Neuberechnung der Störfalldosen nach aktuellem Stand ist daher dringend erforderlich und zum Nachweis der Einhaltung der Störfallplanungswerte unerlässlich. Die Überprüfung, ob ein Delta vorliegt und sicherheitsrelevant ist muss in der Phase 2 der ÜSiKo erfolgen.

3.2.4. Auslegung gegen Erdbeben

Im Bewertungsblatt 2.2.1.2.3 – Erdbeben unter Tage - wird im Abschnitt „Bewertung der Gültigkeit der Information“ festgestellt: „Auf Basis der aktuellen Daten kann wahrscheinlich belegt werden, dass das Bemessungserdbeben keinen Steinfall induziert“. Es folgt der Hinweis, es solle „geprüft werden, ob mittlerweile Kenntnisse oder Hinweise vorliegen, die auf einen erdbebeninduzierten Steinfall im Bergbau hinweisen.“ Diese Prüfung hätte nach unserem Verständnis im Rahmen der Ermittlung des Standes von W&T durch die AN erfolgen müssen und sollte als sicherheitsrelevantes Delta in Phase 2 der ÜSiKo behandelt werden.

3.2.5. Weitere Hinweise

Im Bewertungsblatt 2.2.1 – naturbedingte Einwirkungen von außen – wird angegeben, dass biologische Einwirkungen im Rahmen des Betriebes der Schachanlage Konrad nicht relevant seien. Auf Nachfrage wurde diese Einschätzung von den AN begründet. Wir empfehlen, eine knappe Begründung in das Bewertungsblatt aufzunehmen, um diese wichtige Feststellung plausibel zu machen.

In Bewertungsblatt 2.1.2.8 – anlageninterne Explosion unter Tage - sollte, analog zum Bewertungsblatt 2.1.2.7, die Verwendung von elektrisch betriebenen Transportwagen und eine mögliche Explosionsgefahr durch einen Akkumulator aufgenommen werden. Es sollte darauf hingewiesen werden, dass der derzeitige Planungsstand offen lässt, ob die Energieversorgung von Transportfahrzeugen auch durch einen Stromspeicher erfolgen soll. Bei Vorliegen einer konkreten Planung für die elektrisch betriebenen Fahrzeuge sollte ggf. eine sicherheitstechnische Bewertung erfolgen.

Hinsichtlich möglicher Brandereignisse verweisen die AN richtigerweise auf die grundsätzlich erst in den nachgeordneten Verfahren zur Erteilung von baurechtlichen und bergrechtlichen Genehmigungen erfolgenden Detailprüfungen zum Brandschutz. Das Reviewteam weist darauf hin, dass Fragen des Brandschutzes im Rahmen der ÜSiKo nicht betrachtet werden.

Im Bewertungsblatt 2.1.1.1.2 – Absturz einer Transporteinheit in der Umladehalle - wurde ein Delta identifiziert; zur Erläuterung wurde das Fazit „Aussage ist mit Berücksichtigung weiterer Ebenen ausreichend belegt“ angegeben, dass nach Abschnitt 3.2 des Gutachtens zur Erläuterung von Fällen, in denen kein Delta identifiziert wurde, vorgesehen ist. Das Reviewteam empfiehlt, diesen Widerspruch zur in Abschnitt 3 des Gutachtens dargestellten Vorgehensweise aufzulösen.

Im Gutachten der AN werden erläuternde Unterlagen (EU) verwendet, die nicht in Anhang A – Aufstellung relevanter Gutachten und erläuternder Unterlagen – aufgelistet sind. Es handelt sich um die Dokumente EU 258, 316, 493 und 506. Das Reviewteam empfiehlt, die bibliographischen Angaben zu diesen EU zu ergänzen.

In der Kurzfassung des Gutachtens wird eine Zahl von „gefundenen 17 Deltas“ angegeben. In Tabelle 5-1 sind davon abweichend nur 16 sicherheitsrelevante Deltas gelistet. Eine Durchsicht aller Bewertungsblätter bestätigt die Angaben der Tabelle. Das Reviewteam empfiehlt eine Überprüfung und konsistente Darstellung.

Im Bewertungsblatt 2.1.1.1 – Absturz einer Transporteinheit bei der Handhabung über Tage – wurde kein Delta identifiziert. Es fehlt allerdings das einordnende Fazit zu dieser Entscheidung. Das Reviewteam empfiehlt eine entsprechende Ergänzung.

Die Aussagen im Bewertungsblatt 2.1.1.2 – Absturz schwerer Lasten auf Abfallgebinde über Tage – sind aus unserer Sicht missverständlich. Die AN geben im Abschnitt „Bewertung der Gültigkeit der Information“ an, die Aussage zum Absturz einer Transporteinheit auf eine zweite Transporteinheit sei nicht ausreichend belegt, stellen im nächsten Absatz aber fest, dass dieses Ereignis durch das Ereignis Absturz aus 3 m Höhe abgedeckt sei. Die AN identifizieren daraufhin ein Delta und stellen in der Empfehlung zum Umgang mit dem Delta fest, dass keine sicherheitstechnische Relevanz besteht. Die Antwort der AN auf unsere diesbezügliche Frage schafft hier mehr Klarheit und sollte so auch in das Gutachten aufgenommen werden. Eine konsistente und nachvollziehbare Argumentation im Rahmen der Bewertung und der anschließenden Empfehlung ist anzustreben.

Im Bewertungsblatt 2.1.2.3 – Fahrzeugbrand unter Tage - findet sich in der Reihe der unterstützenden Dokumente die Angabe „..., EU 278, EU, EU302, ...“. Sollte hier eine erläuternde Unterlage zwischen den Nummern 278 und 302 fehlen, ist die zugehörige Nummer zu ergänzen.

3.2.6. Zusammenfassung

Vollständigkeit: Nach Auffassung des Reviewteams wurden alle Störfälle betrachtet, die für die Auslegung eines Endlagers zu untersuchen sind. Die Empfehlungen zu den abgeleiteten Deltas sind im Wesentlichen vollständig. Allerdings wäre nach Auffassung des Reviewteams eine weitergehende Bewertung und ggf. Empfehlung zur Sicherheit der Schachtförderanlage, zur Erdbebenauslegung sowie bei weiterem Planungsfortschritt ggf. zur Explosionsgefahr von Akkumulatoren bei elektrisch betriebenen Transportwagen unter

Tage notwendig. Außerdem wird eine Neuberechnung der Störfalldosen anhand der aktuellen Fassung des Kapitels 4 der Störfallberechnungsgrundlagen für erforderlich gehalten. Ansonsten hat das Reviewteam über die von den AN ermittelten sicherheitsrelevanten Deltas hinaus keine weiteren identifiziert.

Richtigkeit: Die Ermittlung des aktuell angemessenen Standes von W&T wurde im Wesentlichen entsprechend der für die ÜSiKo gestellten Anforderungen richtig vorgenommen. Die abgeleiteten Empfehlungen für weitere Untersuchungen sind zutreffend, eindeutig und klar formuliert

Nachvollziehbarkeit: Die gewählte Methodik der AN zur Ermittlung und Bewertung von Deltas wird vom Reviewteam als für die Aufgabenstellung zweckmäßig angesehen. Der Bewertungsgang ist mit wenigen Ausnahmen nachvollziehbar. Von den AN liegen für die Fälle mangelnder Nachvollziehbarkeit Erläuterungen vor, bei deren Übernahme in den Bericht der AN dieser vom Reviewteam als nachvollziehbar bewertet wird. Dies hat jedoch keinen Einfluss auf die Ermittlung und Bewertung von Deltas.

Tabelle 2: Zusammenstellung der Deltas zu Störfallanalysen

Einschätzung der AN	Einschätzung des Reviewteams
Bei der sicherheitstechnischen Bewertung wird mehrfach Bezug auf die Technischen Anforderungen an Schacht- und Schrägförderanlagen (TAS) genommen.	Es sollte explizit dargelegt werden, ob die Schachtförderanlage den geänderten TAS mit Stand 2005 entspricht.
Es wird ausgeschlossen, dass sich ein Sicherheitsdefizit aufgrund der Änderung des Kapitels 4 der Störfallberechnungsgrundlagen ergeben kann.	Zur Überprüfung ist eine Neuberechnung der Störfalldosen anhand des Kapitels 4 der Störfallberechnungsgrundlagen auf aktuellem Stand erforderlich. Die Überprüfung, ob ein Delta vorliegt und sicherheitsrelevant ist, muss in der Phase 2 der UsiKo erfolgen.
Es wird vorgeschlagen zu prüfen, ob mittlerweile Kenntnisse oder Hinweise vorliegen, die auf einen erdbebeninduzierten Steinfall im Bergbau hinweisen.	Diese Prüfung hätte im Rahmen der Ermittlung des Standes von W&T durch die AN erfolgen müssen und sollte als sicherheitsrelevantes Delta in Phase 2 der UsiKo behandelt werden.
Die AN haben als Delta identifiziert, dass der zukünftige Einsatz elektrisch betriebener Transportwagen bei Brandszenarien zu berücksichtigen ist.	Das Reviewteam teilt diese Auffassung. Allerdings werden von den AN bei der Bewertung einer anlageninternen Explosion unter Tage die Verwendung von elektrisch betriebenen Transportwagen und eine mögliche Explosionsgefahr durch einen Akkumulator nicht angesprochen. Der derzeitige Planungsstand lässt offen, ob die Energieversorgung von Transportfahrzeugen auch durch einen Stromspeicher erfolgen soll. Bei Vorliegen einer konkreten Planung für die elektrisch betriebenen Fahrzeuge sollte ggf. eine sicherheitstechnische Bewertung erfolgen.
Die AN identifizieren Überarbeitungsbedarf im Hinblick auf die Erstellung einer MTO-Analyse.	Das Reviewteam teilt diese Auffassung.
Die AN identifizieren Überarbeitungsbedarf im Hinblick auf die Bewertung von zusätzlichen Systemen zur Vermeidung der Kollision eines Fahrzeuges mit einem Hindernis.	Das Reviewteam teilt diese Auffassung.

4. Bestimmungsgemäßer Betrieb

4.1 Sachverhalt

Gegenstand des Reviews war der Bericht Kaulard et al. (2018). Dessen Ausgangspunkt waren wiederum der Planfeststellungsbeschluss (NU 2002) sowie Sachverständigengutachten von 1997 (TÜV 1997b) und 2002 (TÜV 2002). In Kapitel 2 werden Aufgabenstellung und Bewertungsmaßstab erläutert. Bisher durchgeführte Berechnungen sollen mit solchen gemäß dem aktuellem Stand von W&T verglichen werden. Dies betrifft die Ermittlung von effektiven Dosen und Organdosen (pro Kalenderjahr) sowie den Nachweis, dass die gesetzlichen Grenzwerte bei Emission von Radionukliden mit Abluft und Abwasser sowie durch Direktstrahlung eingehalten werden. Es wird im Rahmen der Überprüfung ebenfalls ermittelt, ob die geplanten Maßnahmen zur Umgebungsüberwachung und zur Einhaltung des Strahlenschutzes dem aktuellen Stand von W&T entsprechen. Nicht betrachtet werden soll der erst zum Zeitpunkt der Umsetzung zur Anwendung kommende Vollzug des Strahlenschutzes. Als Bewertungsmaßstab nennt der AN die begründete Experteneinschätzung, ob eine identifizierte Abweichung Konsequenzen nach sich zieht, die das Sicherheitsniveau wesentlich senken.

Kernaussagen des PFB betreffend der Genehmigungswerte für die maximale Exposition von Einzelpersonen der Bevölkerung durch Ableitungen und Direktstrahlung aus der Anlage sind in Kap. 3 aufgelistet. Außerdem werden Abschätzungen zu maximalen Dosen für Beschäftigte bis zu dem erstaunlich hohen Wert von 19 mSv pro Jahr für einzelne Arbeitsabläufe angegeben, die der Antragsteller im damaligen Planfeststellungsverfahren unter konservativen Randbedingungen ermittelt hat.

Der Überprüfungsbedarf wird in sieben Schritten ermittelt (hier verkürzt wiedergegeben)

- Identifizierung der Kapitel des PFB und der Gutachten, die Aspekte der Sicherheitsanalyse des bestimmungsgemäßen Betriebs beinhalten.
- Identifizierung der verwendeten Bewertungsmaßstäbe
- Zuordnung des Regelungsinhalts
- Bewertung der sicherheitstechnischen Relevanz und Feststellung, ob eine diesbezügliche Weiterentwicklung des Standes von W&T stattgefunden hat (z.B. Veröffentlichungen der SSK, der ICRP, ...)
- Sofern sich hieraus sicherheitsrelevante Deltas ergeben, werden diese gelistet.

Es wurden insgesamt 25 Deltas identifiziert. Bei keinem dieser Deltas wurde ein weiterer zukünftiger Überprüfungsbedarf auf Grund der Sicherheitsrelevanz festgestellt.

Weiterhin wurden 40 Bewertungen aktualisierter Empfehlungen und Berichte vorgenommen, jedoch sind dies keine Deltas im eigentlichen Sinne. Bei keiner dieser in Tab. 2-4 aufgelisteten Bewertungen wurde eine Sicherheitsrelevanz identifiziert.

4.2 Bewertung

4.2.1. Bewertung der relevanten Literatur

Es wird umfassend relevante aktuelle und aktualisierte Literatur angegeben. Jedoch werden, speziell in den Tabellen auf S.84 und S.87 sehr viele Empfehlungen der SSK bzw. der ICRP gelistet, die für den vorliegenden Bericht irrelevant sind. Das Reviewteam sieht keinen Vorteil darin, diese im Bericht beizubehalten und empfiehlt die Kürzung um die bei der Betrachtung der sicherheitstechnischen Anforderungen nicht benötigten Literaturstellen.

Es wurden gemäß der verschiedenen Erstellungsdaten von PFB und Bericht der AN unterschiedliche Versionen der StrlSchV zitiert. Es ist nachvollziehbar und adäquat, dass bei der Diskussion des PFB die damals jeweils gültige Version herangezogen wurde. Ebenfalls ist nachvollziehbar, dass zum Zeitpunkt der Fertigstellung des Berichts noch die Fassung der StrlSchV mit Stand 2001 (StrlSchV 2001) für die Diskussion des aktuellen Standes der Literatur Verwendung fand. Hinsichtlich der geplanten weiteren Laufzeit der ÜSiKo sollten aber alle Verweise an die aktuelle ab 1.1.2019 gültige Version der StrlSchV (StrlSchV 2018) sowie des Strahlenschutzgesetzes (StrlSchG 2017) angepasst werden.

4.2.2. Bewertung der Systematik und Vorgehensweise

Die Struktur des Berichts und die prinzipielle Vorgehensweise der AN wird vom Reviewteam als angemessen hinsichtlich der Identifizierung von Deltas betrachtet, auch wenn die Aufspaltung der Argumentationen in zwei Kapitel (5 und 6) den Bericht unübersichtlicher macht als es nötig wäre.

4.2.3. Bewertung der Ableitung der Deltas

Das Review Team bewertet die Ableitungen der Deltas als schlüssig und nachvollziehbar.

Allerdings teilt das Reviewteam die Aussage der AN bei der Überprüfung des Standes von W&T in Kap. 5 Tab. 1 Zeile 11 nicht. Da aufgrund von Tätigkeiten durch die Beiträge *sämtlicher* Expositionsquellen bei einer Einzelperson der Bevölkerung eine effektive Dosis von

1 mSv pro Jahr nicht überschritten werden darf, ist die Ausschöpfung des Grenzwertes für nur eine Anlage nicht sinnvoll, da es nicht garantiert werden kann, dass in Zukunft nur die Emissionen dieser einen Anlage zu relevanten Expositionen führen werden. Diese Einhaltung zu gewährleisten, ist zwar Aufgabe der Aufsichtsbehörde (gemäß StrlSchV §99 (2)), jedoch wird das hohe Maß an Ausschöpfung aufgrund übergroßer Konservativitäten kritisch gesehen. Eine realistischere Abschätzung würde dieses Problem vermeiden.

4.2.4. Bewertung der Schlussfolgerungen der AN

Das Reviewteam teilt die Schlussfolgerungen der AN hinsichtlich der sicherheitstechnischen Relevanz der Deltas uneingeschränkt. Allerdings sollten Aussagen wie „Aus Sicht der Autoren sind keine nennenswerten Änderungen des Beitrags des Muttermilchpfads zur potenziellen Strahlenexposition im Hinblick auf die Einhaltung der Grenzwerte zu erwarten.“ mit einer Empfehlung an den Betreiber zum rechnerischen Nachweis einhergehen.

4.2.5. Allgemeine Anmerkungen

Auf S.18 findet sich eine versehentliche Dopplung.

Die von den AN in Kap. 7.7 diskutierte Überwachung der Organdosen ist zukünftig wohl obsolet, da diese in der neuen StrlSchV (StrlSchV 2018) nicht mehr als Grenzwerte für die Minimierung stochastischer Strahlenschäden enthalten sind. Die von den AN gewählte Formulierung entspricht dem geforderten Redaktionsschluss April 2018, sollte aber im Laufe der ÜSiKo bei den weiteren Schritten angepasst (d.h. gestrichen) werden. Es ist weiterhin vom Betreiber die endgültige Fassung der AVV Tätigkeiten (voraussichtlich Ende 2019) zu würdigen und Änderungen gegenüber der noch gültigen AVV zu § 47 StrlSchV (AVV 2012) einzubeziehen.

Mit dem neuen Strahlenschutzgesetz (StrlSchG 2017) und der neuen Strahlenschutzverordnung (StrlSchV 2018) wurden die Empfehlungen der Publication 103 (ICRP 2007) nicht nur in der EU Strahlenschutzgrundnorm 2013/59/Euratom berücksichtigt, sondern auch im deutschen Recht umgesetzt. Daher sollte der Satzteil auf S. 46 „die derzeit im deutschen Strahlenschutzrecht umgesetzt wird“ gestrichen werden.

4.2.6. Zusammenfassung

Vollständigkeit:

Die in Kapitel 7 (Kaulard et al. 2018) beschriebenen Überprüfungen der Sicherheitsanalyse hinsichtlich von Ableitungen, Direktstrahlung, Umgebungsüberwachung und daraus folgend Einhaltung von Grenzwerten erscheinen dem Reviewteam vollständig.

Richtigkeit:

Relevante aktuelle nationale Gesetze, Vorschriften, Verordnungen sowie Empfehlungen von ICRP und SSK werden nach Ansicht des Reviewteams vollständig erfasst und im Hinblick auf die Sicherheitsanalyse des bestimmungsgemäßen Betriebs bewertet. In diesem Sinne bildet der Bericht den gegenwärtigen Stand von W&T ab. Jedoch empfiehlt das Reviewteam darüber hinaus, die verabschiedete StrlSchV sowie die für das Jahr 2019 und 2020 angekündigten Verwaltungsvorschriften in künftigen Phasen der ÜSiKo zu berücksichtigen.

Nachvollziehbarkeit:

Das Reviewteam teilt die Ansicht der AN, dass keine sicherheitsrelevanten Deltas vorliegen. Diese Schlussfolgerung der AN wird in allen betrachteten Fällen nachvollziehbar begründet. Änderungen der Verwaltungsvorschriften, wie der vom AN erwähnte mögliche Übergang vom Gauß-Fahnenmodell zum Lagrange-Partikelmodell für die Ausbreitung von Stoffen mit der Abluft müssen in künftigen Schritten vom Betreiber berücksichtigt werden und hinsichtlich der Relevanz für Deltas zu gegebener Zeit überprüft werden.

Da weder von den AN noch vom Reviewteam sicherheitsrelevante Deltas identifiziert wurden, erübrigt sich die tabellarische Gegenüberstellung.

5. Unterkritikalität in der Betriebsphase

5.1 Sachverhalt

Gegenstand des Reviews war der Bericht Pohl (2018). Dessen Ausgangspunkt waren wiederum der Planfeststellungsbeschluss (NU 2002) mit den zugehörigen Endlagerungsbedingungen (ELB) sowie die diesen zugrunde liegende Sicherheitsanalyse Erläuternde Unterlage EU 426 (BfS 1995).

Die Bewertung von Abweichungen zwischen dem Stand von W&T des PFB und dem aktuellen Stand von W&T hinsichtlich sicherheitstechnischer Relevanz erfolgt sowohl kriterienspezifisch (im folgenden (1)-(4)) als auch anhand der übergeordneten, vom Auftraggeber vorgegebenen Maßstäbe I bis III.

Es wird die Berücksichtigung (1) gesetzlicher Vorgaben sowie (2) von Normen und Regelungen zum jeweiligen Zeitpunkt geprüft. Es werden (3) die zulässige Konzentration von Spaltstoffen und Moderatormaterialien gemäß Endlagerungsbedingungen (ELB) und EU 426 betrachtet, sowie (4) Berechnungsverfahren zur Kritikalitätsbestimmung und die hierbei verwendeten Parameter betrachtet.

Die AN geben in Kapitel 3 eine Historie der Betrachtung der Kritikalitätssicherheit. Dies ist wesentlich hinsichtlich der Gegenüberstellung des derzeitigen Standes von W&T gegenüber dem der dem PFB zugrunde liegt. Für diesen wiederum wurde die Sicherheitsanalyse EU 426 (BfS 1995) genutzt, die auch zur Ableitung von nuklidspezifischen Begrenzungen in den der ELB Verwendung fand. Zum besseren Verständnis der Inhalte des PFB wird eine Reihe von gutachterlichen Hinweisen und Antworten des Betreibers hierauf dargelegt. U. a. wird der Sonderfall des U-233 diskutiert, der in EU 426 begründet wird (allerdings schon auf S. 22, nicht wie vom AN zitiert auf S. 23).

In Tabellenform wird der Stand von W&T des PFB gelistet. Es wird unterschieden zwischen gesetzlichen Vorgaben, normativen Grundlagen (beide sehr knapp), Anforderungen an zulässige Konzentrationen von Spaltstoffen (detaillierter) und Berechnungsverfahren (ebenfalls etwas detaillierter). Die einschlägige Unterlage EU 426, die die zugrundeliegenden Sicherheitsanalysen zusammenfasst, wird getrennt behandelt. Es wird darauf hingewiesen, dass in der Betriebsphase ein Wasserzutritt (und somit eine Auslaugung sowie eine zusätzliche Moderation durch Wasser) ausgeschlossen wird. EU 426 betrachtet sowohl die Einlagerungsphase als auch die Nachbetriebsphase, daher wird auch (nur scheinbar entgegen obiger Annahme) eine optimal (Wasser-)moderierte kugelförmige Anordnung angenommen. Hierdurch wird die größtmögliche Konservativität erreicht. Dieses unrealistische und überkonservative Vorgehen wird von den AN wiedergegeben, jedoch nicht hervorgehoben, kommentiert oder bewertet.

Ebenfalls erwähnt wird der wichtige Tatbestand, dass keine chemischen Löslichkeitswerte berücksichtigt werden, was zu einer weiteren Überkonservativität führt.

Es wurden gemäß Anhang 1 insgesamt 13 Deltas identifiziert, bei vier dieser Deltas wurde eine sicherheitstechnische Relevanz festgestellt. In Kapitel 8 ist hinsichtlich eines weiteren zukünftigen Überprüfungsbedarfs nur von dreien die Rede. Dies liegt daran, dass bei Delta 10 keine Verminderung, sondern höchstens eine Erhöhung des Sicherheitsfaktors auftreten kann. Das geht aus der Tabelle im Anhang hervor und sollte im Text mit Nennung des betreffenden Deltas erwähnt werden.

5.2 Bewertung

5.2.1. Bewertung der relevanten Literatur

Die Literatur, insbesondere neuere Normen und Regelungen, bzw. aktualisierte Neuauflagen derselben werden adäquat in Kapitel 5 gelistet und bewertet. Es erfolgt hingegen keine umfassende Zusammenstellung von Forschungsarbeiten auf diesem Gebiet. Wie bereits in Kap. 1 beschrieben, wurde hier also keine Darstellung des Standes von W&T im Sinne aktuellster Entwicklungen, sondern eher hinsichtlich aktueller normativer Regelungen erarbeitet. Hinsichtlich der in allen Bereichen sehr hohen Konservativitäten und den gesicherten Erkenntnissen hinsichtlich kritischer Massen hält es das Reviewteam für unwahrscheinlich, dass eine weitergehende Betrachtung aktuellster Forschungsergebnisse die Schlussfolgerungen hinsichtlich sicherheitsrelevanter Deltas ändern würde.

Ein Kritikpunkt betrifft die Verwendung unterschiedlicher Versionen der StrlSchV. Es ist nachvollziehbar und adäquat, dass bei der Diskussion des PFB die damals gültige Version herangezogen wird. Ebenfalls ist nachvollziehbar, dass zum Zeitpunkt der Fertigstellung des Berichts noch die Fassung der StrlSchV mit Stand 2017 (StrlSchV 2001) für die Diskussion des aktuellen Standes der Literatur Verwendung fand. Hinsichtlich der geplanten weiteren Laufzeit der ÜSiKo sollten aber alle Verweise an die aktuelle ab 1.1.2019 gültige Version der StrlSchV (StrlSchV 2018) sowie des Strahlenschutzgesetzes (StrlSchG 2017) angepasst werden.

5.2.2. Bewertung der Systematik und Vorgehensweise

Die Struktur des Berichts und die prinzipielle Vorgehensweise der AN wird vom Reviewteam als angemessen hinsichtlich der Identifizierung von Deltas betrachtet, auch wenn die Identifizierung der Abweichungen innerhalb des Kapitels 5 in Fließtext nicht sehr über-

sichtlich ist. Die Bewertung erfolgt im getrennten Kapitel 6 in Form einer Liste, was ständigen Abgleich mit dem entsprechenden Stellen in Kapitel 5 nötig macht. Dies ist aber eine rein formelle Anmerkung.

5.2.3. Bewertung der Ableitung der Deltas

Das Reviewteam bewertet die Ableitungen der Deltas als schlüssig und nachvollziehbar.

5.2.4. Bewertung der Schlussfolgerungen der AN

Das Reviewteam teilt die Schlussfolgerungen der AN hinsichtlich der sicherheitstechnischen Relevanz der Deltas. Es ist nötig hervorzuheben, dass auch die als sicherheitsrelevant identifizierten Deltas lediglich eine Verringerung des Sicherheitsfaktors zur Folge haben können. Es wurde kein Delta identifiziert, das Zweifel an der Kritikalitätssicherheit aufkommen lässt.

5.2.5. Allgemeine Anmerkungen

Im vorliegenden Bericht Pohl (2018) werden Kritikalitätsbedingungen im Betrieb betrachtet, während dessen gemäß Kap. 4.1 eben dieses Berichts Pohl (2018), in dem wiederum EU 426 zitiert wird, ein Wasserzutritt ausgeschlossen wird. Trotzdem wird an einigen Stellen, auch bei Betrachtung der kleinsten kritischen Massen, von im Wasser gelösten Stoffmengen ausgegangen. Auch werden keine Löslichkeitsgrenzen betrachtet. Es war nicht Aufgabe der AN dies zu bewerten, und auf Rückfrage wurde festgestellt, dass bei den allgemeinen und spezifischen Grundanforderungen an Abfallprodukte in den Endlagerungsbedingungen Sicherheitsanalysen sowohl zum Betrieb als auch zum Nachbetrieb berücksichtigt werden mussten. Zur Gewährleistung eines eindeutigen Vorgehens wurde in den Endlagerungsbedingungen dann festgelegt, dass in diesen Fällen, in denen Begrenzungen aus mehreren Teilsicherheitsanalysen vorliegen, der für das jeweilige Radionuklid restriktivste Wert heranzuziehen ist. Bei den identifizierten Deltas sollte darauf hingewiesen werden, dass das oben beschriebene Vorgehen eine erhebliche Überkonservativität bedeutet, und bei realistischer Betrachtung die Sicherheitsfaktoren deutlich größer sein können. Es bleibt in den Augen des Reviewteams unverständlich, warum in der Betriebsphase – denn nur diese ist Gegenstand dieses Berichts - mit Szenarien gearbeitet wird, die eine vollständige Auslaugung des Abfalls und somit erheblichen Wasserzutritt zugrunde legen, wie z.B. auf S. 18 (50g / 0,1m³ angenommene Pu-239 Konzentration). Die Nachbetriebsphase wird schließlich getrennt behandelt.

5.2.6. Zusammenfassung

Vollständigkeit:

Das Reviewteam sieht die Bewertung anhand der vier Kriterien „gesetzliche Vorgaben“, „normative Grundlagen“, „zulässige Konzentrationen“ und „Berechnungsverfahren“ als vollständig an.

Richtigkeit:

Neuere Normen und Regelungen, bzw. aktualisierte Neuauflagen derselben werden adäquat in Kapitel 5 gelistet und bewertet. Es erfolgt keine umfassende Zusammenstellung von Forschungsarbeiten auf diesem Gebiet. Hinsichtlich der in allen Bereichen sehr hohen Konservativitäten und den gesicherten Erkenntnissen hinsichtlich kritischer Massen hält es das Reviewteam für unwahrscheinlich, dass eine weitergehende Betrachtung aktueller Forschungsergebnisse die Schlussfolgerungen hinsichtlich sicherheitsrelevanter Deltas ändern würde und stimmt mit den Schlussfolgerungen der AN überein.

Nachvollziehbarkeit:

Die in Anhang 1 gelisteten Kriterien werden nachvollziehbar hinsichtlich des Einflusses auf eine mögliche Änderung des Sicherheitsfaktors bewertet. Anmerkungen des Reviewteams bzgl. der (bewussten, d.h. konservativen) Vernachlässigung chemischer und physikalischer Stoffgesetze gehen nicht zu Lasten der AN, da diese schon im PFB angelegt sind. Der einzige nicht nachvollziehbare Punkt in der Argumentation der AN ist, dass trotz der Annahme, dass in der Betriebsphase kein Wasser zutreten soll, die Betrachtung vollständig in wässriger Phase gelöster Spaltstoffe vorgenommen wird. Der Begründung, dies sei der Kompatibilität mit der Nachbetriebsphase geschuldet, kann vom Reviewteam nicht in Gänze gefolgt werden.

Tabelle 3: Zusammenstellung der Deltas zur Unterkritikalität in der Betriebsphase

Einschätzung der AN	Einschätzung des Reviewteams
<p>Die zusätzlichen Actinoide U-232, U-234, Pu-236, Pu-240, Pu-242, Cm-242 und Cm-246 werden im Rahmen der Aktivitätsbegrenzung für radioaktive Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung erfasst. Für diese Aktivitätsbegrenzung ist ergänzend zu zeigen, dass sie die zulässigen Konzentrationen (berechnet anhand der Kriterien für die Kritikalitätssicherheit) abdecken und somit die restriktivste Konzentrationsvorgabe für das jeweilige Actinoid darstellen.</p>	<p>Das Reviewteam teilt die Auffassung, dass im Prinzip immer nachgewiesen werden muss, dass aus der Massenbegrenzung der genannten Isotope aufgrund der Bedingung vernachlässigbarer Wärmeentwicklung die Kritikalitätssicherheit folgt. Das Reviewteam empfiehlt eine realistische Modellierung unter Kreditnahme von physikalischen und chemischen Stoffeigenschaften. Weiterhin muss berücksichtigt werden, a) dass die genannten Isotope nur mit schnellen, nicht aber mit thermischen Neutronen spaltbar sind und b) für welche der genannten Isotope das in Deutschland verfügbare Gesamtinventar überhaupt eine kritische Masse erreicht, oder ob lediglich ein Beitrag im Rahmen einer Summenbildung erfolgen könnte.</p>
<p>Die bei den Grundanforderungen und den zulässigen Massen für höhere spaltbare Actinoide berücksichtigten Sicherheitsfaktoren bzgl. der jeweiligen kleinsten kritischen Masse vermindern sich bei kleineren kritischen Massen und vergrößern sich bei größeren kritischen Massen. Die Frage nach der Signifikanz der Menge des jeweiligen zusätzlichen Actinoids in einem Abfallgebände, kann analog zu dem Vorgehen beim Summenkriterium behandelt werden (>1% der zulässigen Konzentration).</p>	<p>Das Reviewteam empfiehlt ebenfalls eine Berechnung der Sicherheitsfaktoren für die Nuklide Am-242m, Cm-243, Cm-245, Cm-247, für die von einer kleineren kritischen Masse ausgegangen werden muss als der, die der ursprünglichen Rechnung zugrunde lag. Eine größere kritische Masse führt zu einer Erhöhung des Sicherheitsfaktors und muss höchstens im Rahmen des Summenkriteriums als kompensierender Faktor betrachtet werden, wenn notwendig.</p>
<p>Die Berechnung mit explizit verteilten Spaltstoffen liefert eine realistischere Aussage zum Kritikalitätszustand des Abfallgebändes als die Anwendung des Summenkriteriums oder der zulässigen Massen höherer spaltbarer Actinoide. Die Spaltstoffverteilung muss hierfür mit ausreichender Sicherheit (im Vergleich zu den Unsicherheiten bei Anwendung des Summenkriteriums) bekannt sein.</p>	<p>Das Reviewteam teilt die Auffassung der AN. Jedoch ist unklar in welchen Fällen die Spaltstoffverteilung genau genug bekannt ist.</p>

6. Zusammenfassung

Im Rahmen der Phase 1 „Ermittlung des Überprüfungsbedarfs“ der Überprüfung der sicherheitstechnischen Anforderungen des Endlagers Konrad nach dem Stand von Wissenschaft und Technik (ÜsiKo) wurde ein unabhängiger Review von vier Berichtsentwürfen vorgenommen, der im vorliegenden Bericht dokumentiert wird. Der Review erfolgte im Hinblick auf Vollständigkeit, Richtigkeit und Nachvollziehbarkeit (vgl. die Einleitung dieses Berichts). Die Berichtsentwürfe der Auftragnehmer (AN) dienten der Identifizierung sicherheitsrelevanter Deltas im Planfeststellungsbeschluss (PFB) des Endlagers, d. h. von Sachverhalten, für die aufgrund der Weiterentwicklung des Standes von Wissenschaft und Technik (W&T) in der Phase 1 nicht ausgeschlossen werden kann, dass sie derzeit sicherheitstechnisch ungünstiger zu bewerten sind als im PFB und die daher in Phase 2 weiter zu untersuchen sind.³ Die Berichtsentwürfe sollen aufgrund des vorliegenden Reviewberichts sowie der Ergebnisse eines am 23.01.2019 durchgeführten Workshops ggf. überarbeitet werden und die Grundlage für die Leistungsbeschreibungen für Phase 2 bilden. Die Vorgehensweise beim Review ist in der Einleitung dieses Berichts dargestellt.

Die AN haben

- für den Themenkomplex *Langzeitsicherheit, Unterkritikalität in der Nachbetriebsphase und thermische Beeinflussung des Wirtsgesteins* 14 sicherheitsrelevante Deltas,
- für die *Störfallanalysen* 17 sicherheitsrelevante Deltas,⁴
- für den *bestimmungsgemäßen Betrieb* kein sicherheitsrelevantes Delta und
- für den Bereich *Unterkritikalität in der Betriebsphase* drei sicherheitsrelevante Deltas

identifiziert. Das Reviewteam ist bezüglich einzelner sicherheitsrelevanter Deltas zu abweichenden Einschätzungen gekommen, stellt jedoch keins der identifizierten sicherheitsrelevanten Deltas grundsätzlich in Frage und hat auch keine weiteren sicherheitsrelevanten Deltas identifiziert. Die Bedeutung von (Über-)Konservativitäten in den dem PFB zugrundeliegenden Analysen wurden nach Auffassung des Reviewteams nicht immer konsistent durch die AN berücksichtigt.

³ Eine ausführlichere Diskussion hierzu erfolgt in der Einleitung dieses Berichts.

⁴ Nach Zählung des Reviewteams nur 16 Deltas, siehe auch Kapitel 3.2.5

Die Einschätzungen des Reviewteams werden in den vorangegangenen Kapiteln für die einzelnen Themenbereiche dargelegt und an deren Ende jeweils tabellarisch zusammengefasst. Die Zusammenfassungen der Kapitel enthalten außerdem Einschätzungen zu Vollständigkeit, Richtigkeit und Nachvollziehbarkeit.

Aus Phase 1 ergeben sich nach Einschätzung des Reviewteams keine Hinweise auf Aspekte, hinsichtlich derer die Bewertung der Sicherheit grundsätzlich in Frage zu stellen ist.

Das Reviewteam schätzt ein, dass die Berichtsentwürfe bzw. Berichte der AN nützliche Grundlagen für Untersuchungen in der Phase 2 bereitstellen. Diese müssten für eine Leistungsbeschreibung in einigen Aspekten jedoch konkretisiert werden, insbesondere hinsichtlich der Art der jeweils vorzunehmenden Abschätzungen oder Rechnungen unter Berücksichtigung der Konservativitäten im PFB.

Die AN sind bei der Identifizierung und Bewertung der Deltas methodisch unterschiedlich vorgegangen. Nach Auffassung des Reviewteams wären im Interesse von Nachvollziehbarkeit und Vergleichbarkeit einheitliche Vorgaben zum Vorgehen der AN und zur Dokumentation insbesondere bei der Bewertung der Sicherheitsrelevanz der Deltas (also beim Schritt von identifizierten zu sicherheitsrelevanten Deltas) wünschenswert gewesen.

7. Literaturverzeichnis

7.1 Im Review bewertete Berichte der Überprüfung der Sicherheitstechnischen Anforderungen des Endlagers Konrad nach dem Stand von Wissenschaft und Technik (ÜsiKo)

Campo, V.; Feinhals, J.; Schönberner, S.; Walbrodt, D. (2018): Überprüfung der sicherheitstechnischen Anforderungen des Endlagers Konrad nach dem Stand von Wissenschaft und Technik (ÜsiKo) – Los I: Ermittlung des Überprüfungsbedarfs der Störfallanalysen. Hamburg: DMT GmbH & Co. KG, DSR Ingenieurgesellschaft mbH.

Kaulard, J. (2018): Überprüfung der sicherheitstechnischen Anforderungen des Endlagers Konrad nach dem Stand von Wissenschaft und Technik (ÜsiKo). Ermittlung des Überprüfungsbedarfs der Sicherheitsanalyse des bestimmungsgemäßen Betriebs. Vorläufiger Ergebnisbericht. Aachen: Brenk Systemplanung GmbH.

Pohl, C. (2018): Projekt Konrad. Üsiko, Los 3 „Unterkritikalität in der Betriebsphase“. Phase 1: Ermittlung des Überprüfungsbedarfs. Abschlussbericht (vorläufig). Köln: TÜV Rheinland Industrie Service GmbH.

Rübel, A.; Behler, M.; Feinhals, J.; Mönig, J.; Poppel, J.; Rätz, D.; Wolf, J. (2018): 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. Vorläufiger Entwurf des Abschlussberichts zur Phase 1: Ermittlung des Überprüfungsbedarfs. Braunschweig: Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, AF-Consult Switzerland Ltd., DMT GmbH & Co. KG.

7.2 Zitierte Planfeststellungsunterlagen

7.2.1. 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.

7.2.2. Erläuternde Unterlagen

BGR (1988): Revision von Tiefbohrungen (Band 1 bis 7, 1 Anlagenband). Hannover: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. EU 232

BfS (1995). Anforderungen an die zulässige Massenkonzentration und zulässige Massen an spaltbaren Stoffen in Abfallgebinden für das geplante Endlager Konrad (ET-IB-46-REV-3). EU 426

Fett, H.J.; Lange, F. (1990): Systemanalyse Konrad Teil 3 – Ermittlung der potentiellen Strahlenexpositionen in der Umgebung der Anlage bei Störfällen unter Berücksichtigung der Berechnungsverfahren der AVV zu § 45 StrlSchV und Ableitung von Aktivitätsgrenzwerten für 96 Einzelnuklide. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-A-1668/I (Hauptband), GRS-A-1668/II (Ergänzungsband I), GRS-A-1668/III (Ergänzungsband II). Mai 1990. EU 371

Gründler, D.; Kofahl, A.; Mielke, H.; Wurtinger, W. (1995): Systemanalyse Konrad, Teil 3. Ermittlung und Klassifizierung von Störfällen. 3. Revision. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH. EU 228.

GSF (1991): Berechnung der Strahlenexposition in der Nachbetriebsphase des Endlagers Konrad nach der Allgemeinen Verwaltungsvorschrift. München: Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung mbH, Institut für Strahlenschutz. EU 353.

Sonntag, C. (1988): Isotopenuntersuchungen in tiefen Grundwässern aus der Schachanlage Konrad/Salzgitter. Universität Heidelberg. EU 200

Storck, R.; Bütow, E.; Heredia, L.; Hossain, S.; Kühle, T.; Lütke-meier-Hosseini-pour, S.; Nies, A.; Prahl, G.; Struck, S. (1986): Langzeitsicherheitsanalyse des Endlagers Konrad: Radionuklid-ausbreitung in der Nachbetriebsphase. München: Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung mbH, Institut für Tief-lagerung. EU 076.1

7.3 Gutachten und Stellungnahmen

GRS (1991a): Langzeitsicherheitsanalysen für das Endlager Konrad, Grundwassermodellrechnungen mit dem Programm NAMMU. Köln: Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit. GS 24

GRS (1991b): Langzeitsicherheitsanalysen für das Endlager Konrad, Nuklidtransportrechnungen. Köln: Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit. GS 25

GRS (1993a): Langzeitsicherheitsanalysen für das Endlager Konrad, Referenzfall Grundwassermodell-rechnungen mit dem Programm NAMMU, Textband. Köln: Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicher-heit. GS 27

GRS (1993b): Langzeitsicherheitsanalysen für das Endlager Konrad, Referenzfall Grundwassermodell-rechnungen mit dem Programm NAMMU, Anlagenband. Köln: Gesellschaft für Anlagen- und Reaktor-sicherheit. GS 28

GRS (1993c): Langzeitsicherheitsanalysen für das Endlager Konrad, Referenzfall Nuklidtransportrech-nungen. Köln: Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit. GS 29

GRS (1993d): Langzeitsicherheitsanalysen für das Endlager Konrad, Einfluss der alten Bohrungen und der verfüllten Schächte auf die Ausbreitung von Radionukliden im Deckgebirge nach Verschluss des Endlagers, Textband. Köln: Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit. GS 30

GRS (1993e): Langzeitsicherheitsanalysen für das Endlager Konrad, Einfluss der alten Bohrungen und der verfüllten Schächte auf die Ausbreitung von Radionukliden im Deckgebirge nach Verschluss des Endlagers, Anlagenband. Köln: Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit. GS 31

GRS (1993f): Grundwasser-Transportrechnungen am hydrogeologischen Modell Konrad zur Bewertung der Modelldaten und ihrer Bandbreiten. Köln: Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit. GS 32

GRS (1998): Szenarienanalysen im Rahmen des Nachweises der Langzeitsicherheit von Endlagern für radioaktive Abfälle. Köln: Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit. GS 33

NLFB (1990a): Hydrogeologische Vorgaben für Modellrechnungen zur Langzeitsicherheit (Modellgebiet Grube Konrad). Hannover: Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung. GS 3

NLFB (1990b): Transportdaten für Modellrechnungen zur Langzeitsicherheit (Modellgebiet Grube Konrad). Hannover: Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung. GS 4

TÜV (1997a): Endlager für radioaktive Abfälle Schachanlage Konrad Salzgitter; Gutachten Teil 2 : Langzeitsicherheit (GK-LSG). Technischen Überwachungs-Verein Hannover/Sachsen-Anhalt e.V. GS 14

TÜV (1997b). TÜV HANNOVER/SACHSEN-ANHALT E.V. - HAUPTABTEILUNG ENERGIETECHNIK UND ANLAGENSICHERHEIT Endlager für radioaktive Abfälle - Schachanlage Konrad Salzgitter –Gut-achten - Teil 1: Standort, Bau- und Anlagentechnik (GK-SBA), Juli 1997.

TÜV (2002). TÜV HANNOVER/SACHSEN-ANHALT E.V. - BEREICH ENERGIE- UND SYSTEMTECH-NIK Endlager für radioaktive Abfälle - Schachanlage Konrad Salzgitter - Ergänzendes Gutachten im Planfeststellungsverfahren, Februar 2002.

7.4 Sonstige Literatur

AVV (2012) Allgemeine Verwaltungsvorschrift zu § 47 Strahlenschutzverordnung: Ermittlung der Strahlenexposition durch die Ableitung radioaktiver Stoffe aus Anlagen oder Einrichtungen vom 28 August 2012. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit.

Bayerisches Oberbergamt in München, Hessisches Oberbergamt in Wiesbaden, Landesbergamt Baden-Württemberg in Freiburg, Landesoberbergamt Nordrhein-Westfalen in Dortmund, Oberbergamt in Clausthal-Zellerfeld, Oberbergamt für das Saarland und das Land Rheinland-Pfalz in Saarbrücken (2005): Technische Anforderungen an Schacht- und Schrägförderanlagen (TAS), Stand: Dezember 2005.

Becker, D.-A.; Buhmann, D.; Storck, R.; Alonso, J.; Cormenzana, J.-L.; Hugl, M.; van Gemert, F.; O'Sullivan, P.; Laciok, A.; Marivoet, J.; Sillen, X.; Nordman, H.; Vieno, T.; Niemeyer, M. (2002): Testing of Safety and Performance Indicators (SPIN). EUR 19965 EN. Luxembourg: European Commission.

BMI (1983): Leitlinien zur Beurteilung der Auslegung von Kernkraftwerken mit Druckwasserreaktoren gegen Störfälle im Sinne des § 28 Abs. 3 der Strahlenschutzverordnung, Störfall-Leitlinien. In: RS-Handbuch. Bundesministerium des Innern

BMJ (1990): Allgemeine Verwaltungsvorschrift zu § 45 Strahlenschutzverordnung: Ermittlung der Strahlenexposition durch die Ableitung radioaktiver Stoffe aus kerntechnischen Anlagen oder Einrichtungen; Bundesanzeiger 42 (Nr. 64a). Bonn: Bundesministerium für Justiz

BMJ (2008): Handbuch der Rechtsförmlichkeit, aktualisierte und erweiterte dritte Auflage. In: Bundesanzeiger 60 (160a), S. 1–296. Bundesministerium der Justiz.

BMU (2012): Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, 20.11.2012

BVerfG (1978): Bundesverfassungsgericht, Beschluss vom 8. August 1978 – 2 BvL 8/77. Karlsruhe.

BVerwG (2008): Bundesverwaltungsgericht, Urteil vom 10.04.2008, Aktenzeichen BVerwG 7 C 39.07, S. 1–26. Leipzig.

ESK (2013): Stellungnahme der Entsorgungskommission: Langzeitsicherheitsnachweis für das Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben (ERAM). Bonn: Entsorgungskommission.

ICRP (2007) Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103 Ann. ICRP 37

Kalmbach, K.; Röhlig, K.-J. (2016): Interdisciplinary perspectives on dose limits in radioactive waste management. A research paper developed within the ENTRIA project. *Journal of Radiological Protection* 36 (2), S. S8-S22

Mazurek, M., Alt-Epping, P., Bath, A., Gimmi, T., Niklaus Waber, H., Buschaert, S., Cannière, P.D., Craen, M.D., Gautschi, A., Savoye, S., Vinsot, A., Wemaere, I., Wouters, L. (2011): Natural tracer profiles across argillaceous formations. *Appl. Geochem.* 26, 1035-1064.

NAGRA (2014): Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle. Arbeitsbericht NAB 14-75. Sicherheitstechnische Betrachtungen zu Schachtförderanlagen für den Zugang zu einem zukünftigen geologischen Tiefenlager. Wettingen 2014

NEA (2005a): International Peer Reviews for Radioactive Waste Management. General Information and Guidelines. NEA No. 6082. Paris: OECD Nuclear Energy Agency.

NEA (2005b): Clay Club Catalogue of Characteristics of Argillaceous Rocks. NEA No. 4436. Paris: OECD Nuclear Energy Agency, p. 72.

NEA (2009): Natural tracer profiles across argillaceous formations: the CLAYTRAC project. NEA No. 6253. Paris: OECD Nuclear Energy Agency, p. 361.

NEA (2013): The Nature and Purpose of the Post-Closure Safety Cases for Geological Repositories. "Safety Case Brochure 2012". NEA/RWM/R(2013)1. Paris: OECD Nuclear Energy Agency.

- NEA (2016): Scenario Development Workshop Synopsis. Integration Group for the Safety Case. NEA/RWM/R(2015)3. Paris: OECD Nuclear Energy Agency.
- OVG Schleswig (2013): Schleswig-Holsteinisches Oberverwaltungsgericht. Urteil 4 KS 3/08 vom 19.06.2013 Schleswig
- Peitzsch, M., Kremer, D., Kersten, M. (2010) Microfungal alkylation and volatilization of selenium adsorbed by goethite. *Environ Sci Technol* 44 129–135.
- Schäfer, T., Buckau, G., Artinger, R., Kim, J.I., Geyer, S., Wolf, M., Bleam, W.F., Wirick, S., Jacobsen, C. (2005) Origin and mobility of fulvic acids in the Gorleben aquifer system: implications from isotopic data and carbon/sulfur XANES. *Org. Geochem.* 36, 567-582.
- Schäfer, T., Huber, F., Seher, H., Missana, T., Alonso, U., Kumke, M., Eidner, S., Claret, F., Enzmann, F. (2012) Nanoparticles and their influence on radionuclide mobility in deep geological formations. *Appl. Geochem.* 27, 390-403.
- Selroos, J. O., Follin, S. (2010), SR-Site groundwater flow modelling methodology, setup and results. SKB Report R-09-22, SKB Svensk Kärnbränslehantering AG, Stockholm, Sweden.
- SSK (2003): Störfallberechnungsgrundlagen zu § 49 StrlSchV – Neufassung des Kapitels 4: Berechnung der Strahlenexposition. Empfehlung der SSK. Verabschiedet in der 186. Sitzung der SSK am 11.09.2003. Bonn: Strahlenschutzkommission
- SSK (2010): Radiologische Anforderungen an die Langzeitsicherheit des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben (ERAM) - Empfehlung der SSK. Bonn: Strahlenschutzkommission.
- Stark, L.; Jahn, S.; Jobmann, M.; Lommerzheim, A.; Meleshyn, A.; Mrugalla, S.; Reinhold, K.; Rübel, A.; Keller, S.; Gerardi, J. (2014): FEP-Katalog für das Endlagerstandortmodell NORD - Konzept und Aufbau (mit Anlage: Dokumentation). TEC-22-2014-AP, FKZ 02E11061. Peine: DBE TECHNOLOGY.
- StrlSchG (2017) Gesetz zum Schutz vor der schädlichen Wirkung ionisierender Strahlung (Strahlenschutzgesetz - StrlSchG) Vom 27. Juni 2017 (BGBl. I Nr. 42, S. 1966)
- StrlSchV (2001). Strahlenschutzverordnung vom 20. Juli 2001 (BGBl. I S. 1714; 2002 I S. 1459), die zuletzt durch Artikel 5 Absatz 7 des Gesetzes vom 24. Februar 2012 (BGBl. I S. 212) geändert worden ist
- StrlSchV (2018). Strahlenschutzverordnung vom 29. November 2018 (BGBl. I Nr 41; 2018 I S. 2034)
- Vidstrand, P., Follin, S., Zugec, N. (2010), Groundwater flow modelling of periods with periglacial and glacial climate conditions – Forsmark. SKB Report R-09-21, SKB Svensk Kärnbränslehantering AG, Stockholm, Sweden.
- Winkel, L.H.E., Johnson, C.A., Lenz, M., Grundl, T., Leupin, O.X., Amini, M., Charlet, L. (2012) Environmental Selenium Research: From Microscopic Processes to Global Understanding. *Environ. Sci. Technol.* 46, 571–579.