

Projekt Konrad

Üsiko, Los 3 „Unterkritikalität in der Betriebsphase“

Phase 1: Ermittlung des Überprüfungsbedarfs

Abschlussbericht

Auftragnehmer

TÜV Rheinland Industrie Service GmbH

Köln, 28.02.2019,

Impressum:

Auftraggeber: Bundes-Gesellschaft für Endlagerung
Willy-Brandt-Str. 5
38226 Salzgitter
Telefon: 030 18333-7000
E-Mail: poststelle@bge.de
Internet: www.bge.de

Ersteller: Dr.-Ing. Christoph Pohl, Dr. rer. nat. Dubravko Maric,
Dr. Sebastian Kuhn (Dipl. Chem.), Moritz Gradmann (M.Sc. Geochemie)

TÜV Rheinland Industrie Service GmbH
Am Grauen Stein
51105 Köln
Tel. +49 800 8069000-3000*
Fax +49 800 8069000-3099*
industrie@de.tuv.com
www.tuv.com

Geschäftsführer: Andreas Geck (Sprecher), Dirk Fenske
Aufsichtsratsvorsitzender: Dr.-Ing. Michael Fübi
Sitz der Gesellschaft: Köln | Registergericht: Amtsgericht Köln, HRB 26876
| Ust.-Id-Nr.: DE 811955577

Abbildungen: - keine -

Die diesem Bericht zugrundeliegenden Arbeiten wurden im Auftrag der Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE) durchgeführt. Die Verantwortung für den Inhalt liegt jedoch allein bei den Autoren. Die hierin geäußerten Meinungen müssen nicht der Meinung der Auftraggeber entsprechen.

Projekt Konrad, ÜsiKo Los 3 „Unterkritikalität in der Betriebsphase“ **Phase 1: Ermittlung des Überprüfungsbedarfs**

Seite: 3 von 46

Revisionsblatt:

Rev.	Rev.-Stand (Datum)	revidierte Seite	Kat. (*)	Erläuterung der Revision
*) Kategorie R = redaktionelle Korrektur Kategorie V = verdeutlichende Verbesserung Kategorie S = substantielle Revision Mindestens bei der Kategorie S müssen Erläuterungen angegeben werden				

Projekt Konrad, ÜSiKo Los 3 „Unterkritikalität in der Betriebsphase“

Phase 1: Ermittlung des Überprüfungsbedarfs

Seite: 4 von 46

KURZFASSUNG

Verfasser: Dr.-Ing. Christoph Pohl, Dr. Dubravko Maric, Dr. Sebastian Kuhn, Moritz Gradmann

Titel: Projekt Konrad, ÜSiKo Los 3 „Unterkritikalität in der Betriebsphase“
Phase 1: Ermittlung des Überprüfungsbedarfs
Abschlussbericht (vorläufig)

Stand: 28.02.2019

Im Rahmen der ÜSiKo (Überprüfung der sicherheitstechnischen Anforderungen des Endlagers Konrad nach dem Stand von Wissenschaft und Technik) wurde der Stand von W&T zum Zeitpunkt der Veröffentlichung des PFB (Planfeststellungsbeschluss) gegenüber dem aktuellen Stand von W&T anhand von Kriterien verglichen, Abweichungen identifiziert und hinsichtlich Unterkritikalität in der Betriebsphase (Kritikalitätssicherheit) sicherheitstechnisch bewertet, um den Überprüfungsbedarf zu ermitteln. Die Abweichungen hinsichtlich des Kriteriums 1 „Gesetzliche Vorgaben“ weisen kein sicherheitsrelevantes Delta auf. Hinsichtlich Kriterium 2 „Normative Grundlagen“ wurden zwei Abweichungen mit sicherheitsrelevantem Delta identifiziert, die sich aus der Aktualisierung der Norm ANSI/ANS-8.15 hinsichtlich zu betrachtender höherer spaltbarer Actinoide und zugrunde zu legender kleinster kritischer Massen ergeben. Die hinsichtlich Kriterium 3 „Grundanforderungen und zulässige Konzentrationen“ identifizierten Abweichungen beinhalten Aspekte, die sich aus den aktuellen Berechnungsmöglichkeiten ergeben. Ein sicherheitsrelevantes Delta wurde für die Möglichkeit identifiziert, alternativ zur Anwendung des Summenkriteriums die Kritikalität von Spaltstoffgemischen direkt rechnerisch zu bestimmen. Ansonsten liefern Verbesserungen in der rechnerischen Modellierung einen Beitrag zur Bestimmung von Konservativitäten. Für Kriterium 4 „Berechnungsverfahren zur Kritikalitätsbestimmung“ wurde als Abweichung mit sicherheitsrelevantem Delta die Beurteilung heterogen verteilter Spaltstoffgemische identifiziert. Die Bewertung anhand von drei vom Auftraggeber vorgegebenen übergeordneten Maßstäben zeigt, dass

- die identifizierten Abweichungen keine Auswirkungen auf die Belastbarkeit vorhandener Aussagen zur Sicherstellung der Unterkritikalität haben,
- die Notwendigkeit für die Berücksichtigung zweier sicherheitstechnisch relevanter zusätzlicher Erkenntnisse im Zusammenhang mit der aktualisierten Norm ANSI/ANS-8.15 [33] besteht und
- bei Anwendung des aktuellen Stands von W&T für die Abweichungen mit sicherheitsrelevantem Delta eine Veränderung des Sicherheitsfaktors und damit ein Sicherheitsverlust- oder gewinn zu erwarten ist.

Projekt Konrad, ÜsiKo Los 3 „Unterkritikalität in der Betriebsphase“

Phase 1: Ermittlung des Überprüfungsbedarfs

Seite: 5 von 46

INHALTSVERZEICHNIS

KURZFASSUNG	4
INHALTSVERZEICHNIS	5
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	7
TABELLENVERZEICHNIS.....	7
ANHANGSVERZEICHNIS.....	7
ANLAGENVERZEICHNIS	7
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS.....	7
1 EINLEITUNG	8
2 KRITERIEN UND MAßSTÄBE	9
3 HISTORIE DER ANALYSEN ZUR KRITIKALITÄSSICHERHEIT	10
3.1 HISTORIE DER SICHERHEITSANALYSEN	10
3.2 BEANTWORTUNG GUTACHTERLICHER HINWEISE	12
4 STAND VON W&T DES PFB	15
4.1 UNTERLAGE EU426	17
5 AKTUELLER STAND VON W&T UND ABWEICHUNGEN ZU FRÜHEREM STAND VON W&T	20
5.1 KRITERIUM 1: GESETZLICHE VORGABEN	20
5.2 KRITERIUM 2: NORMATIVE GRUNDLAGEN FÜR BERECHNUNG UND BEWERTUNG.....	20
5.3 KRITERIUM 3: GRUNDANFORDERUNGEN UND ZULÄSSIGE KONZENTRATIONEN.....	23
5.4 KRITERIUM 4: BERECHNUNGSVERFAHREN ZUR KRITIKALITÄTSBESTIMMUNG	24
6 SICHERHEITSTECHNISCHE BEWERTUNG VON ABWEICHUNGEN	26
6.1 BEWERTUNG ANHAND KRITERIEN	26
6.1.1 Kriterium 1: Gesetzliche Vorgaben.....	26
6.1.2 Kriterium 2: Berechnungs- und Bewertungsgrundlagen.....	26
6.1.3 Kriterium 3: Grundanforderungen und zulässige Konzentrationen.....	29
6.1.4 Kriterium 4: Berechnungsverfahren zur Kritikalitätsbestimmung	29
6.2 BEWERTUNG ANHAND VON MASSSTÄBEN	30

Projekt Konrad, ÜSiKo Los 3 „Unterkritikalität in der Betriebsphase“

Phase 1: Ermittlung des Überprüfungsbedarfs

Seite: 6 von 46

6.2.1	Auswirkungen auf die Belastbarkeit vorhandener Aussagen	30
6.2.2	Notwendigkeit zur Berücksichtigung zusätzlicher Erkenntnisse	30
6.2.3	Sicherheitsgewinn oder -verlust	31
7	BEWERTUNG VON UNSICHERHEITEN	33
8	FAZIT	34
9	ÜBERARBEITUNG HINSICHTLICH REVIEW-BERICHT UND WORKSHOP	35
	LITERATURVERZEICHNIS.....	36
	GLOSSAR.....	39
	ANHANG 1: ZUSAMMENFASSUNG – ABWEICHUNGEN UND SICHERHEITSTECHNISCHE RELEVANZ	41

Gesamtseitenzahl: 46

Stichworte: Konrad, Endlagerungsbedingungen, Kritikalitätssicherheit, Unterkritikalität

Projekt Konrad, ÜSiKo Los 3 „Unterkritikalität in der Betriebsphase“

Phase 1: Ermittlung des Überprüfungsbedarfs

Seite: 7 von 46

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

- Keine Abbildung -

TABELLENVERZEICHNIS

- Tab. 1: Historischer Rückblick zur zeitlichen Abfolge der Sicherheitsanalysen und der zulässigen Spaltstoffmassen und -konzentrationen, die dem PFB [2] zugrunde liegen.
- Tab. 2: Grundanforderungen in PFB [2] und ELB [3] mit Bezug zur Kritikalitätsicherheit
- Tab. 3: Kleinste kritische Massen (kg) höherer spaltbarer Actinoide, nach ANSI/ANS-8.15 (1981) [32] und (2014) [33]
- Tab. 4: Maximale Konzentrationen für homogene Wasser-Spaltstofflösungen in ANSI/ANS-8.15 (2014) [33], welche die zulässige Massenkonzentration in ELB [3] unterschreiten
- Tab. 5: Berücksichtigung von Anmerkungen aus Review und Workshop

ANHANGSVERZEICHNIS

Anhang 1: Zusammenfassung - Abweichungen und sicherheitstechnische Relevanz

ANLAGENVERZEICHNIS

- keine Anlage -

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

- PFB: Planfeststellungsbeschluss
- PFV: Planfeststellungsverfahren
- ELB: Endlagerungsbedingungen
- WQ: Wirkungsquerschnitt [Barn] zur Beschreibung von Reaktionswahrscheinlichkeiten (z.B. neutroneninduzierte Spaltung eines Nuklides)
- MC: Monte Carlo Berechnungsverfahren
- NB A.x-x: Nebenbestimmungen, die im PFB festgelegt sind
- m_{kritisch} : kleinste kritische Masse eines Spaltstoffs
- k_{eff} : Effektiver Neutronen-Multiplikationsfaktor einer gegebenen Spaltstoffkonfiguration

Projekt Konrad, ÜSiKo Los 3 „Unterkritikalität in der Betriebsphase“

Phase 1: Ermittlung des Überprüfungsbedarfs

Seite: 8 von 46

1 EINLEITUNG

Für das Projekt Konrad ist neben anderen sicherheitstechnisch relevanten Aspekten auch nachzuweisen, dass für die einzulagernden radioaktiven Stoffe während der Betriebsphase des Endlagers Konrad jederzeit und in jeder Situation ein unterkritischer Zustand sichergestellt ist (Nachweis der Kritikalitätssicherheit). Hierfür wurden in den 1980er und 1990er Jahren Sicherheitsanalysen, basierend auf dem damaligen Stand von Wissenschaft und Technik (W&T) durchgeführt und im Rahmen des Planfeststellungsverfahrens bzgl. neuer Erkenntnisse und gutachterlicher Hinweise angepasst.

Im Jahr 2002 wurde seitens des Gutachters der Planfeststellungsbehörde bestätigt, dass die vorliegenden Sicherheitsanalysen den aktuellen Stand von W&T berücksichtigen [1] (S. 18-21).

Nach Ansicht des Betreibers liegen aktuell keine Erkenntnisse vor, welche die Sicherheit des Endlagers Konrad in Frage stellen würden. Der Planfeststellungsbeschluss (PFB) [2] für das Endlager Konrad hat Bestand. Aufgrund der verstrichenen Zeit seit der Erteilung des PFB hat sich der Betreiber des Endlagers Konrad (BGE) dennoch entschieden, den Stand von W&T, welcher in die Sicherheitsanalysen eingeflossen ist, im Rahmen des Projekts ÜSiKo (Überprüfung der sicherheitstechnischen Anforderungen des Endlagers Konrad nach dem Stand von Wissenschaft und Technik) erneut überprüfen zu lassen (ÜSiKo, Phase 1).

Im Rahmen dieses Berichts wird der Stand von W&T des PFB [2], der den Sicherheitsanalysen zur Unterkritikalität in der Betriebsphase des Endlagers Konrad zu Grunde gelegt wurde, mit dem aktuellen Stand von W&T verglichen und die identifizierten Abweichungen hinsichtlich ihrer sicherheitstechnischen Relevanz bewertet. Die Schnittstelle zu den Transportvorschriften sowie die Maßnahmen der Produktkontrolle sind nicht Gegenstand dieser Untersuchung.

Die identifizierten Abweichungen und ihre sicherheitstechnische Bewertung sind in Anhang 1 dieses Berichts noch einmal zusammenfassend aufgeführt.

Projekt Konrad, ÜsiKo Los 3 „Unterkritikalität in der Betriebsphase“

Phase 1: Ermittlung des Überprüfungsbedarfs

Seite: 9 von 46

2 KRITERIEN UND MAßSTÄBE

Der Überprüfung der Sicherheitsanalysen zur Unterkritikalität in der Betriebsphase hinsichtlich des Stands von W&T liegen die nachfolgenden Kriterien 1 bis 4 zugrunde. Die Bewertung von Abweichungen zwischen dem Stand von W&T des PFB und dem aktuellen Stand von W&T (Beginn der Arbeiten, Januar 2018) hinsichtlich ihrer sicherheitstechnischen Relevanz erfolgt sowohl kriterienspezifisch als auch anhand der übergeordneten, vom Auftraggeber vorgegebenen Maßstäbe I bis III.

Kriterien:

1. Gesetzliche Vorgaben zur Kritikalitätssicherheit
Es werden die zum jeweiligen Zeitpunkt für das Endlager Konrad maßgeblichen gesetzlichen Vorgaben zur Sicherstellung der Kritikalitätssicherheit betrachtet.
2. Normative Grundlagen für Berechnung und Bewertung der Kritikalitätssicherheit
Es werden Normen und Regelungen betrachtet, die als Grundlage für die zu betrachtenden Spaltstoffe, die Bestimmung und Bewertung kritischer Spaltstoffkonzentrationen und -mengen sowie repräsentativer Spaltstoffanordnungen zum jeweiligen Zeitpunkt herangezogen wurden.
3. Grundanforderungen und zulässige Konzentrationen von Spaltstoffen in Abfallprodukten gemäß Endlagerungsbedingungen (ELB) [3]
Es werden die in den Grundanforderungen der ELB spezifizierten Massenkonzentrationen (abfallprodukt- und gebindespezifisch) für spaltbare Stoffe und besondere Moderator-materialien, die Regelungen bei Überschreiten von zulässigen Werten, die Regelungen zum Zustand der Spaltstoffe und -stoffgemische in den Abfallgebinden, auf denen die Berechnungen der kritischen Stoffmassen basieren oder die als Maßstäbe für die Bewertung der Kritikalitätssicherheit Anwendung finden, betrachtet.
4. Berechnungsverfahren zur Kritikalitätsbestimmung
Es werden die Berechnungsprogramme und die hierin verwendeten nuklearen Daten betrachtet, mit denen die kleinsten kritischen Massen (m_{kritisch}) von Einzelnukliden oder Nuklidgemischen bestimmt wurden. Weiterhin werden die geometrischen Spaltstoffanordnungen betrachtet, die in den Berechnungen verwendet wurden.

Maßstäbe für die Bewertung:

- I. Ergeben sich aus den Abweichungen beim Stand von W&T Auswirkungen auf die Belastbarkeit der vorhandenen Aussagen zu der Sicherstellung der Unterkritikalität in der Betriebsphase und, wenn ja, welche?
- II. Ergibt sich aus den Abweichungen beim Stand von W&T die Notwendigkeit der Berücksichtigung zusätzlicher Erkenntnisse und Informationen hinsichtlich der Sicherheitsrelevanz?
- III. Ergibt sich bei der Anwendung des heutigen Standes von W&T ein möglicher Sicherheitsgewinn bzw. -verlust?

Projekt Konrad, ÜSiKo Los 3 „Unterkritikalität in der Betriebsphase“

Phase 1: Ermittlung des Überprüfungsbedarfs

Seite: 10 von 46

3 HISTORIE DER ANALYSEN ZUR KRITIKALITÄTSSICHERHEIT

3.1 HISTORIE DER SICHERHEITSANALYSEN

Die in der Vergangenheit mit dem Thema Unterkritikalität in der Betriebsphase (Kritikalitätssicherheit) befassten Sicherheitsanalysen bauen aufeinander auf und stellen dabei auch die Entwicklung des Diskussionsstands mit den Gutachtern der Genehmigungsbehörde hinsichtlich des Nachweises der Kritikalitätssicherheit dar. Der in diesem Bericht durchgeführte Vergleich zwischen Stand von W&T des PFB [2] und aktuellem Stand von W&T bezieht sich auf die aktuellste, dem PFB [2] und den ELB [3] zugrundeliegende Sicherheitsanalyse EU426 [4]. Im Folgenden wird die Historie der Sicherheitsanalysen dargestellt, die schlussendlich zu dem Informationsstand führt, der dem PFB [2] und den aktuellen ELB [3] zugrunde liegt. Die nachfolgende Darstellung in Tab. 1 ist zeitlich rückblickend und startet mit dem PFB [2]:

lfd. Nr.	Unterlage	Aussagen mit Relevanz für die Kritikalitätssicherheit
1.	PFB (2002)	Stand von W&T im Jahr 2002 bestätigt, Grundanforderungen zur Kritikalitätssicherheit in der Betriebsphase werden in den ELB (Stand 1997) festgehalten (Kritikalitätssicherheit in der Nachbetriebsphase wird separat behandelt)
2.	ELB [3]	erstellt im Rahmen des Planfeststellungsverfahrens auf Grundlage einer standortspezifischen Sicherheitsanalyse, Übernahme der Erkenntnisse aus EU426 [1] Die ELB [3] wurden mehrfach aktualisiert (aktueller Stand: Rev. 2, 2014)
3.	EU426 (1995) [4]	aufgegangen bzw. zitiert im PFB [2] und den ELB [3]
4.	EU439 (1991) [5]	Abb. 1: Tagesanlagen Abb. 2: Stapelung im Kammerquerschnitt Abb. 3: Spaltstoffverteilung in KC III Abb. 4: Maximale Belegung der Pufferhalle Abb. 5: Rechenmodell für Pufferhalle Tab. 1: Ergebnisse Kap. 4: Moderator- und Reflektormaterialien Tab. 2: Reflektormaterialien S. 13, zweiter Absatz: Brandschutz spaltbarer Stoffe • aufgegangen in EU426 [4]
5.	EU394 (1991) [6]	Tab. 7: zulässige Massen für Np-237 und Cf-251 pro Abfallgebinde • aufgegangen in EU426 [4]

Projekt Konrad, ÜSiKo Los 3 „Unterkritikalität in der Betriebsphase“

Phase 1: Ermittlung des Überprüfungsbedarfs

Seite: 11 von 46

lfd. Nr.	Unterlage	Aussagen mit Relevanz für die Kritikalitätssicherheit
6.	EU342 (1991) [7]	Tab. 2: Gesamtinventar Konrad, Kritikalitätsbetrachtung für homogene Verteilung im Grubenerz und Ausbreitung im Deckgebirge aufgegangen in EU426 [4]
7.	EU294 (1989) [8]	Verifizierung der Kritikalitätsbetrachtung der Betriebsphase, der Summenformel und der Kritikalitätssoftware aufgegangen in EU426 [4] (Tab. 16: zulässige Massen einschl. für U-233, U-235, Pu-239, Pu-241)
8.	EU229 (1989) [9]	Stellungnahme zum Statusbericht des TÜV Hannover Zuverlässigkeit der Einhaltung des Kriteriums 50g/0,1m ³ Praktikabilität des Summenkriteriums aufgegangen in EU426 [4]
9.	EU192 (1988) [10]	Tab. 1: Kritische Masse versus erwartete Gesamtmasse für Np-237 bis Cf-251 Tab. 2: Mittlere Zusammensetzung der Konrad-Tiefengrundwässer Kap. 5: Chemische Zusammensetzung des Konrad-Gesteins Kap. 3: Moderator D ₂ O, Be, BeO, Graphit aufgegangen in EU394 [6] und EU426 [4]
10.	EU085.2 (1988) [11]	S. 17: Konzentrationsbegrenzung für U-235 und Pu-239 sowie Begrenzung auf 50 g spaltbare Stoffe / 100 l Abfallprodukt (Referenzmaterial: reines Pu-239) aufgegangen in EU426 [4] (Tab. 16: zulässige Massen für U-233, U-235, Pu-239, Pu-241; Tab. 12 & 20: zulässige Massen für Np-237 bis Cf-251; S. 23, letzter Absatz: 50 g spaltbare Stoffe / 100 L Abfallprodukt)
11.	EU160 (1987) [12]	Massenbegrenzung von 45% der kleinsten kritischen Masse des jeweiligen Spaltstoffs, Zusammenhang mit Summenkriterium Tab. 7: kritische Kugelmassen für U-233 und Pu-241 Abgedeckt mit EU426 [4]
12.	EU072.3	Kritikalitätsbetrachtung eines in der Nachbetriebsphase räumlich

Projekt Konrad, ÜSiKo Los 3 „Unterkritikalität in der Betriebsphase“

Phase 1: Ermittlung des Überprüfungsbedarfs

Seite: 12 von 46

lfd. Nr.	Unterlage	Aussagen mit Relevanz für die Kritikalitätssicherheit
	(1985) [13]	inhomogen verteilten Nuklidvektors (Pu-238 bis Pu-242, U-235, U-238) • Vorläufer von EU426 [4]
13.	EU072.2 (1984) [14]	Kritikalitätsbetrachtung für in der Nachbetriebsphase räumlich homogen verteiltes Pu-239 bei Einhaltung der Begrenzung von 15 g Spaltstoff / Gebinde (Fass nach Asse-Einlagerungsbedingungen) • Vorläufer von EU426 [4]

Tab. 1: Historischer Rückblick zur zeitlichen Abfolge der Sicherheitsanalysen und der zulässigen Spaltstoffmassen und -konzentrationen, die dem PFB [2] zugrunde liegen.

3.2 BEANTWORTUNG GUTACHTERLICHER HINWEISE

Im Rahmen des PFV/der Erstellung des PFB [2] und der begleitenden Sicherheitsanalysen wurden seitens der gutachterlichen Sachverständigen (TÜV Hannover) Stellungnahmen zu verschiedenen Sachverhalten verfasst. Die darin formulierten Hinweise hinsichtlich Kritikalitätssicherheit wurden seitens des Betreibers des Endlagers Konrad beantwortet (EU229 [9], EU443 [15], EU445 [16]). Zur besseren Nachvollziehbarkeit von Festlegungen, die im PFB [2] getroffen wurden, sind nachfolgend Hinweise und deren Beantwortung seitens des Betreibers zusammenfassend dargestellt, die einen Bezug zur Kritikalitätssicherheit aufweisen.

In EU229 [9] wird auf folgende Hinweise eingegangen:

- Aufwand zur Prüfung und Einhaltung der zulässigen Massenkonzentration von 50g/0,1m³: Es wird dargelegt, dass bei den üblichen Konditionierungsverfahren für spaltbare Stoffe mit anschließender Fixierung nachweislich eine im Rahmen der zulässigen Schwankungsbreite von 10% gültiger Störfall- bzw. Kritikalitätsgrenzwerte ausreichende Durchmischung erreicht wird. Weiterhin wird der Aufwand für die Messung zur Bestimmung des Spaltstoffinventars im Rahmen der Produktkontrolle dadurch minimiert, dass Messwerte des Verursachers sowie von Euratom/IAEA zur Verfügung stehen.
- Durchführbarkeit der Isotopenkontrolle im Rahmen der Abfallbehandlung: Es wird dargelegt, dass die Herkunft der kernbrennstoffhaltigen Abfälle bekannt ist und der Isotopenvektor im Rahmen der zugehörigen Arbeitsprozesse in ausreichender Genauigkeit bestimmt wurde. Isotopenvektoren von Spaltstoffgemischen sind anhand von Mischrechnungen bestimmbar. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, die Isotopenzusammensetzung eines Spaltstoffgemischs mit einer oberen Abschätzung der Isotope mit großem Spaltwirkungsquerschnitt zu bestimmen.

In EU443 [15] wird der Hinweis auf Doppelkontrollen vor und während der Abfallkonditionierung damit beantwortet, dass die Abfallkonditionierung Thema der Produktkontrolle ist. Darüber hinaus folgen auch die ELB [3] mit der Berücksichtigung des doppelten Einzelfallkriteriums in der Betriebsphase bei der Stapelung von Abfallgebinden diesem Sicherheitskonzept.

Projekt Konrad, ÜSiKo Los 3 „Unterkritikalität in der Betriebsphase“ Phase 1: Ermittlung des Überprüfungsbedarfs

Seite: 13 von 46

In EU445 [16] wird auf folgende Hinweise eingegangen:

- Grenzwerte für COGEMA-, BNFL- und andere Behälter: Für genehmigte Abfallbehälter sind in EU426 [4] (eingegangen in die ELB [3]) zulässige Spaltstoffkonzentrationen unter Beachtung der Behälterdimension und der Behälterzahl pro Stapelabschnitt festgelegt. Für andere Behälter ist in EU426 [4] die generelle Vorgehensweise zur Festlegung zulässiger Spaltstoffkonzentrationen beschrieben.
- Tiefe der Stapelabschnitte: In EU426 [4] wird hierzu ausgeführt, dass die Länge (entspricht in dieser Betrachtung der Tiefe) der Stapelabschnitte sowohl bei gleichmäßiger als auch gemischter Einlagerung keine Rolle spielt. Erste maßgebliche Betrachtungen zu diesem Thema wurden in EU085.2 [11] vorgenommen und u.a. in EU342 [7] evaluiert. Berechnungen zur Kritikalitätssicherheit eines Stapelabschnitts wurden für die kürzesten genehmigten Abfallgebinde und damit (bei Ausnutzung der zulässigen Massenkonzentration pro Abfallgebinde) des höchsten Spaltstoffinventars pro Einlagerungskammer vorgenommen und die bei einer Auslaugung theoretisch resultierende Spaltstoffstofflösung bewertet. Es sei darauf hingewiesen, dass die Betrachtung von zulässigen Massen pro Stapelabschnitt aus der Störfallbetrachtung für die Nachbetriebsphase (Auslaugung von Spaltstoffen) resultiert und für die Betriebsphase konservativ abdeckende Massenkonzentrationen liefert.
- Nachweis zu kritikalitätssicheren Lagerung in der Pufferhalle: Dieser Nachweis wurde in EU439 [5] erbracht und die Ergebnisse in EU426 [4] übernommen.
- Ableitung einfach zu überschauender Kritikalitätsgrenzwerte: Hierzu wird in EU426, S. 21/22 [4], die Plausibilität des zugrunde gelegten globalen Konzepts zur Kritikalitätssicherheit erläutert.
- Festlegung eines unabhängigen Grenzwerts für U-233: In EU426, S. 22 [4], wird erläutert, warum ein unabhängiger Grenzwert von 15g pro Abfallbehälter (bei einem minimalen Volumen von 200l) unter Umständen zu einer Verminderung des Sicherheitsfaktors führt.
- Anwendung eines Grenzwerts von 1/100 der kleinsten kritischen Masse für höhere spaltbare Actinoide: Bestätigung der Festlegung auf 1/50 der kleinsten kritischen Masse im Rahmen des Fachgesprächs 09/1990.
- Verwendung eines abdeckenden Pu-Vektors (Pu-239/-241: 95%/5%): In EU426, S. 14 [4], wird erläutert, dass eine separate Betrachtung von Pu-239 und Pu-241 geeigneter für die verschiedenen zu betrachtenden Szenarien ist. Hinsichtlich der messtechnischen Erfassung im Rahmen der Produktkontrolle wird auf das Konzept des Summenkriteriums verwiesen.
- Verwendung der Masseneinheit „Gramm“: Die Angaben zu zulässigen Massen sind in den vorläufigen ELB, Stand 1991, enthalten.
- Verwendung von Orientierungswerten für zulässige Spaltstoffmassen, Begrenzung des Summenkriteriums auf <1: Mit Verweis auf die den zulässigen Massenkonzentrationen

Projekt Konrad, ÜSiKo Los 3 „Unterkritikalität in der Betriebsphase“ Phase 1: Ermittlung des Überprüfungsbedarfs

Seite: 14 von 46

zugrunde liegenden Sicherheitsfaktoren (EU439, S. 13 [5], EU426, S. 5 [4]) wird eine weitere Verminderung dieser Werte abgelehnt.

- Grenzwerte oder Hinweise auf Einzelfallprüfung für D₂O, Beryllium und Graphit: In EU439, Kap. 4 [5], aufgeführt und in den ELB [3] übernommen.
- Begrenzung moderierender Stoffe im Abfallgemisch: Mit Verweis auf die Kritikalitätsanalysen für optimal mit Wasser sowie betonmoderierte/-reflektierte Spaltstoffanordnungen wird die Einführung von zulässigen Massenkonzentrationen für weniger effektive Moderatormaterialien abgelehnt (effektivere Moderatormaterialien werden schon konzentrationsbegrenzt).

Projekt Konrad, ÜSiKo Los 3 „Unterkritikalität in der Betriebsphase“

Phase 1: Ermittlung des Überprüfungsbedarfs

Seite: 15 von 46

4 STAND VON W&T DES PFB

Für das Endlager Konrad liegt ein gültiger PFB [2] vor. Die für das Thema Unterkritikalität in der Betriebsphase maßgeblichen Grundanforderungen sind in den ELB [3] festgehalten, die ein Bestandteil des PFB [2] sind. Die Einhaltung dieser Grundanforderungen wird durch die laufende Produktkontrolle gemäß der Festlegungen aus EU240 [38] sichergestellt.

Entsprechend der in Kap. 2 genannten Kriterien werden die in den ELB [3] aufgeführten Grundanforderungen nachfolgend dargestellt:

Kriterium	PFB/ELB
1. Gesetzliche Vorgaben	AtG (§4, §7, §9 a, b), besondere spaltbare Stoffe: U-233, U-235, Pu-239, Pu-241(Stand 2002) StrSchV §6, §31, §74 (PFB zitiert Stand 1997 und 2001)
2. Normative Grundlagen	DIN 25403-1, 12/1991 [17], DIN 25474, 7/1996 [19], Sicherheitsanforderungen für Kernbrennstoffversorgungsanlagen des BMI/BMU, 9/1996 [21], ISO-Normen 1709, 11/1995 [22] und 7753, 8/1987 [24], GRS-Handbuch zur Kritikalität, 1995 [26], ARH-600 Handbuch, 1971 [27], ANSI/ANS-8.15, 1981 [32] (siehe EU192 [10]) Anwendung folgender Sicherheitsprinzipien (restriktivste Werte sind maßgebend): - Konzentrationsbegrenzung von Spaltstoffen und - Spaltstoffmassen pro Abfallgebinde
3. Grundanforderungen und zulässige Konzentrationen von Spaltstoffen	Begrenzung der Spaltstoffmassen je Abfallgebinde (der restriktivste Wert ist einzuhalten): - Konzentration von durch thermische Neutronen spaltbaren Stoffen (außer Natururan und angereichertem Uran) $\leq 50 \text{ g/0,1m}^3$ (U-233, U-235, Pu-239, Pu-241, Am-242m, Cm-243, Cm-245, Cm-247, Cf-249, Cf-251) - Massenbegrenzung spaltbarer Stoffe (U-233, U-235, Pu-239, Pu-241) pro Abfallgebinde (aus EU426 [4], Kap. 4.2 Summenkriterium für gemischte Einlagerung) - Summenkriterium für U-233, U-235, Pu-239 und Pu-241 (die hierbei zulässigen Massen bzw. Aktivitäten entsprechen 45% der jeweiligen kleinsten kritischen

Projekt Konrad, ÜSiKo Los 3 „Unterkritikalität in der Betriebsphase“ **Phase 1: Ermittlung des Überprüfungsbedarfs**

Seite: 16 von 46

	Masse), Sicherheitsfaktor gegenüber berechneten kritischen Massen >10 (EU294 [8]) - Brennbare Stoffe mit spaltbaren Stoffen (außer Natururan und abgereichertem Uran) > 1g pro Abfallgebinde -> Fixierung in einer nicht-brennbaren Matrix oder Umhüllung mit inaktiver Schicht (Wärmedurchgangswiderstand mindestens 0,1 m² K/W) - Für Abfallgebinde mit >15 g Spaltstoff: Nachweis, dass bei thermischer Belastung mehrerer gemeinsam gestapelter Behälter eine lokale Aufkonzentration ausgeschlossen werden kann - zulässige Massenkonzentration für Spaltstoff U-233: 5g/Abfallgebinde ($1,8 \cdot 10^9$ Bq) (A.2-8), bei höheren Massen: Anwendung des Summenkriteriums - bei Überschreitung von 1/20 der kleinsten kritischen Masse -> jedes beliebige 100L-Volumen innerhalb des Abfallgebundes enthält maximal 1/20 der kleinsten kritischen Masse des betreffenden Spaltstoffs (homogene Verteilung im Gebinde) (NB A.2-10) - Zulässige Massen von höheren spaltbaren Actinoiden: Np-237, Am-241, Am-242m, Am-243, Cm-243, Cm-244, Cm-245, Cm-247, Cf-249, Cf-251 (ELB [3], Anhang III, Tab. 11, 1/50 der jeweiligen kritischen Massen gemäß EU426, Kap. 4.1 [4]), entnommen aus ANSI/ANS-8.15 1981 [32] („sichere Massen“, „subcritical limits“, größte noch unterkritischen Kugelmassen der Actinoiden) (siehe EU192 [10]) und dividiert durch 50 (siehe Ergebnis EU394 [6]) Anordnung unabhängiger Doppelkontrollen, wenn der Spaltstoffgehalt eines Abfallgebundes die Hälfte des maximal zulässigen Wertes überschreitet (NB A.2-11). Vorgaben zur Abstellposition von kernbrennstoffhaltigen Abfallgebünden: zulässige Abstellflächen, Stapelhöhen (NB A.2-12) Festlegung von Konzentrationswerten für die Durchführung von Einzelfallprüfungen für besondere Moderator- und Reflektormaterialien (besonders kritikalitätsrelevante Stoffe)): Graphit, Beryllium, schweres Wasser D₂O (NB A.2-14). Abfallgebinde liegen in fester Form vor, enthalten nur noch
--	---

Projekt Konrad, ÜSiKo Los 3 „Unterkritikalität in der Betriebsphase“

Phase 1: Ermittlung des Überprüfungsbedarfs

Seite: 17 von 46

	nicht vermeidbare Restmengen an Flüssigkeiten und Gasen (Ausnahme: Kr-85).
4. Berechnungsverfahren zur Kritikalitätsbestimmung	Referenzgröße für kleinste kritische Masse eines Spaltstoffes: Kugelanordnung, optimal moderiert und reflektiert mit reinem Wasser Reaktivitätsmindernde Wirkung von U-238 in Natururan, abgereichertem Uran und U-235/U-238-Gemisch (mit ≤ 5 Mass.-% U-235) bleibt jederzeit erhalten (NB A.2-9) (homogene Isotopenverteilung). Kritikalitätsrechnung zu 50g/0,1m³ für Spaltstoffkugeln, optimal wassermoderiert, mit Wasserumhüllung (EU192 [10]), Beton bzw. Wasser bzw. künstlich reflektiert (SCALE, Module CSAS2 und KENO 4, 27 Gruppen-WQ-CSRL (kondensiert aus der 216 Gruppen-WQ-CSRL, die auf ENDF/B-IV Daten basiert)). Validierung von SCALE, ENDF/B-IV-Daten und der 27-Gruppen-WQ-Bibliothek anhand von Nachrechnung von Kritikalitätsbenchmarks (siehe EU294 [8]) -> sowohl wasserreflektierte als auch betonreflektierte Systeme werden (konservativ) überschätzt. Spaltstoffkugel, betonmoderiert und -reflektiert (zum Nachweis, dass sich in dieser realen Abfallgebinde-Konfiguration deutlich höhere kritikalitätssichere Massen ergeben und die wassermoderierte Spaltstoffanordnung zu konservativen Ergebnissen führt (EU294 [8])).

Tab. 2: Grundanforderungen in PFB [2] und ELB [3] mit Bezug zur Kritikalitätssicherheit

Die für bestimmte Konzentrationswerte vorgesehenen Einzelfallprüfungen erfolgen nach Kriterien, die in Durchführungsvorschriften der Produktkontrolle festgelegt sind. Ihre Prüfung hinsichtlich des Stands von W&T ist daher nicht Gegenstand dieses Berichts.

4.1 UNTERLAGE EU426

Die in den ELB [2] genannten Grundanforderungen zur Kritikalitätssicherheit basieren auf Sicherheitsanalysen, die in Unterlage EU426, Stand 10/1995 [4], letztmalig zusammengestellt wurden (siehe Kap. 3). Nachfolgend werden technische Details und Randbedingungen zusammengefasst, die in EU426 [4] und den vorausgegangenen Analysen festgelegt wurden und die Basis für die Grundanforderungen in den ELB [3] darstellen.

In Unterlage EU426 [4] wird die Kritikalitätssicherheit in der Betriebsphase (Anlieferung, Pufferung und Einlagerung) sowie in der Nachbetriebsphase analysiert und bewertet. Für die Betriebsphase wird ein Wasserzutritt zum Einlagerungsgut ausgeschlossen. Die Untersuchung beschränkt sich

Projekt Konrad, ÜSiKo Los 3 „Unterkritikalität in der Betriebsphase“

Phase 1: Ermittlung des Überprüfungsbedarfs

Seite: 18 von 46

auf die Analyse, inwieweit bei der Einlagerung eine kritische Anordnung entstehen kann. Diese Betrachtung deckt die möglichen Positionierungen im Anlieferungsbereich und in der Pufferhalle mit ab.

Die zulässigen Massen- und Konzentrationswerte für spaltbare Stoffe werden aus Kritikalitätsberechnungen abgeleitet, welche die kleinste kritische Masse für eine optimal mit Wasser moderierte Spaltstoffanordnung (kugelförmige Spaltstofflösung) unter verschiedenen Reflexionsbedingungen (Wasser, Beton, künstlich reflektiert) bestimmen. Mit diesem Vorgehen wird der Forderung Rechnung getragen, den Spaltstoff in seiner reaktivsten Anordnung zugrunde zu legen, auch wenn in den Abfallgebinden gemäß ELB [3] keine derartigen Mengen an Wasser zu erwarten sind. Ergänzend wurden zum Nachweis der Konservativität dieser moderierten Spaltstoffanordnung Berechnungen mit betonmoderierten und -reflektierten Spaltstoffanordnungen durchgeführt, die mit dem realen Zustand der Spaltstoffe in den Abfallgebinden vergleichbar sind. In diesem Zusammenhang wird auch darauf hingewiesen, dass bei der Betrachtung einer optimalen Spaltstofflösung die tatsächliche Lösbarkeit des Spaltstoffs in Wasser nicht berücksichtigt wird, so dass die betrachteten optimalen Spaltstofflösungen zu konservativ kleinen kritischen Massen führen.

Als Anordnungsschema der Container in der Einlagerungskammer wird ein bündiger 2x2x2 Containerstapel zugrunde gelegt. Als Referenzspaltstoff wird Pu-239-Oxid in einer Massenkonzentration von 50g/0,1m³ angenommen. Als Spaltstoffanordnung wird von einer ideal mit Wasser moderierten Kugel ausgegangen. Bei der Betrachtung der Spaltstoffanordnung in unendlicher Ausdehnung ergibt sich hierbei ein $k_{\infty} < 0,6$. Hierzu ist festzustellen, dass selbst diese deutliche Unterkritikalität nur einen theoretischen Wert darstellt und nicht erreicht werden kann, da die mögliche Menge an Pu-239 durch die pro Abfallgebinde zulässige Masse begrenzt ist (restriktivster Wert, für Container Typ III als das volumenmäßig größte Einzelgebinde zur direkten Aufnahme spaltstoffhaltiger Abfälle). Als optimal moderierte Spaltstoffkugel, eingebettet in eine Wasserhülle (verschiedene Dichtezustände des Wassers wurden betrachtet) und außerhalb davon voll reflektiert, ergibt sich ein $k_{\text{eff}} < 0,5$ (EU085.2 [11]).

Die Konzentrations-Grundanforderung von 50g/0,1m³ basiert damit zum Teil auf Annahmen, die für Abfallgebinde in der Betriebsphase (fest, nur mit einer unvermeidlichen Restflüssigkeitsmenge versehen) nicht zu unterstellen sind. Die Anwendung dieser Grundanforderung führt damit zu höheren Sicherheitsfaktoren hinsichtlich Kritikalitätssicherheit als die Berücksichtigung realer Spaltstoffanordnungen in den Abfallgebinden während der Betriebsphase.

Ergänzend werden für die Nachbetriebsphase (unterstellte Auslaugung von Spaltstoffen) höhere spaltbare Actinoide betrachtete (Np-237, Am-241, Am-242m, Am-243, Cm-243, Cm-244, Cm-245, Cm-247, Cf-249, Cf-251). Für diese Actinoide werden zulässige Massen pro Gebinde angegeben (Referenzgeometrie: wassermoderierte Spaltstoffkugel), bei deren Einhaltung die Kritikalitätssicherheit ohne weitere Einzelfallprüfung gegeben ist.

Für die Betriebsphase wird für Spaltstoffgemische aus U-233, U-235, Pu-239 oder Pu-241 ein Summenkriterium festgelegt. Dabei werden für die verschiedenen Spaltstoffgemische jeweils leicht variierende optimale Moderationsverhältnisse berücksichtigt. Höhere Actinoide werden nicht betrachtet, da die in den ELB, Tab. 11 [3], aufgeführten zulässigen Actinoidmassen nur 1/50 der jeweiligen kleinsten kritischen Masse darstellen und in dieser Menge in der Summenbetrachtung vernachlässigbar sind. Die Möglichkeit, auch Abfallgebinde mit Summenwerten $S > 1$ einzulagern,

Projekt Konrad, ÜSiKo Los 3 „Unterkritikalität in der Betriebsphase“ Phase 1: Ermittlung des Überprüfungsbedarfs

Seite: 19 von 46

ergibt sich daraus, dass für das Summenkriterium die maximal zulässige Spaltstoffmasse pro Stapelabschnitt herangezogen wird. Ausschlaggebend hierfür ist die Länge des Gebindetyps, mit dem der Querschnitt der Einlagerungskammer ausgefüllt ist (siehe EU426, Abb. 4 [4]). Die maximal zulässige Spaltstoffmasse ergibt sich aus der Analyse der Nachbetriebsphase und einer Störfallbetrachtung mit unterstellter Auslaugung von Spaltstoffen. Diese zulässige Spaltstoffmasse pro Stapelabschnitt wird dann auf die möglichen, pro Stapelabschnitt stapelbaren Abfallgebinde aufgeteilt.

In EU426, Kap. 3.0 [4], wird auf die aktuelle Planung hingewiesen, die zeigt, dass mit dem Einlagerungstapler weniger als die in EU426 [4] angenommene maximale Abfallgebindezahl eingelagert werden kann. Die in EU426 [4] aus dem primären Grenzwert abgeleiteten zulässigen Summenwerte sind damit abdeckend gewählt.

5 AKTUELLER STAND VON W&T UND ABWEICHUNGEN ZU FRÜHEREM STAND VON W&T

Zu den in Kapitel 2 genannten Kriterien wird im Folgenden der aktuelle Stand von W&T dargestellt und Abweichungen zum Stand von W&T des PFB [2] identifiziert. Die sicherheitstechnische Bewertung der Abweichungen erfolgt in Kapitel 6.

5.1 KRITERIUM 1: GESETZLICHE VORGABEN

In der aktuellen Fassung des Atomgesetzes (AtG, [37]) wird in §2 „Begriffsbestimmung“ zusätzlich zu der bereits früher enthaltenen Kernbrennstoffauflistung (Pu-239, Pu-241, U-233 und U-235) die folgende allgemein gehaltene Definition ergänzt:

„4. Stoffen, mit deren Hilfe in einer geeigneten Anlage eine sich selbst tragende Kettenreaktion aufrechterhalten werden kann und die in einer Rechtsverordnung bestimmt werden.“

Damit werden grundsätzlich alle spaltbaren (thermisch oder schnell) höheren Actinoide sowie alle anderen schnellspaltbaren Nuklide abgedeckt.

Mit der Konkretisierung in AtG [37] § 2, Abs. 3, liegt ein Massen- und Konzentrationswert (15 g, 15 g/100 kg) für Pu-239, Pu-241, U-233 und U-235 vor, bis zu dem das Stoffgemisch als „sonstiger radioaktiver Stoff“ gilt (Ausnahme: verfestigte hochradioaktive Spaltproduktlösungen aus der Aufarbeitung von Kernbrennstoffen).

Die StrlSchV beschreibt die Forderung nach einer kritikalitätssicheren Lagerung in ihrer aktuellen Version 2017 [28] als Teil der Aufgaben des Strahlenschutzverantwortlichen und des Strahlenschutzbeauftragten in §§ 33 und 65 (früher (Stand 1997) §§ 6, 31 und 74).

5.2 KRITERIUM 2: NORMATIVE GRUNDLAGEN FÜR BERECHNUNG UND BEWERTUNG

Zu DIN 25403-1 liegt eine neue Version mit Stand 12/2013 vor [18]. Darin wird hinsichtlich des Sicherheitsprinzips von einem Einzelfallkriterium ausgegangen (das doppelte Einzelfallkriterium wurde umformuliert). Hinsichtlich der Validierung der Rechenverfahren anhand experimenteller Ergebnisse wird nun explizit auf DIN 25478 [30] verwiesen. Die aktuell gültige Version der DIN 25478 (Stand 06/2014 [30]) bezieht sich dabei auch auf die vorherige Version von 07/1994 [29]. Zum Zeitpunkt der letzten Überprüfung des Stands von W&T im Jahr 2002 lag demnach schon eine Version der Norm zum Einsatz von Berechnungssystemen beim Nachweis der Kritikalitätssicherheit vor.

DIN 25478 [30] fasst die Anforderungen an die Rechenverfahren zusammen. Im Rahmen der Sicherheitsanalysen wurde das Programm SCALE mit dem Modul Keno 4 verwendet. Schon in seiner Version von 1980 wurde das Programm im Rahmen von Kritikalitätsanalysen validiert [31]. Das Programm SCALE findet auch heutzutage in aktualisierter Form (Version 6.2.2) Anwendung bei der Bestimmung von Kritikalitätszuständen im Rahmen von Genehmigungsverfahren und

Projekt Konrad, ÜSiKo Los 3 „Unterkritikalität in der Betriebsphase“

Phase 1: Ermittlung des Überprüfungsbedarfs

Seite: 21 von 46

verfügt über eine umfangreiche Validierungshistorie und Qualitätssicherung (ISO, ASME, DOE, NRC [31]).

Zu DIN 25474 „Maßnahmen administrativer Art zur Einhaltung der Kritikalitätssicherheit in kerntechnischen Anlagen, ausgenommen Kernreaktoren“ liegt eine neue Version mit Stand vom 06/2014 vor [20]. Zur Einhaltung der Kritikalitätssicherheit werden darin technische oder administrative Maßnahmen oder Kontrollen oder eine Kombination beider als Forderung festgelegt. Es wird eine grundsätzliche Priorisierung der Maßnahmen und Kontrollen vorgenommen, höchste Priorität wird dabei passiven technischen Maßnahmen zugeordnet. Zusätzlich werden in DIN 25474 (06/2014) [20] folgende administrative Maßnahmen gefordert:

- Festlegung und Kontrolle der zulässigen Moderatoren und Reflektoren und
- Festlegungen zu Vorgehensweisen bei kritikalitätssicherheitsrelevanten Umbauten.

Zu ISO 1709 liegt eine neue Version mit Stand 2018 vor [23]. Hiernach sind detaillierte Sicherheitsanalysen festgelegt, sofern eine Kritikalität nicht hinsichtlich Masse und/oder Zustandsform des Spaltstoffes unter allen zu betrachtenden Bedingungen und unter Beachtung angemessener Sicherheitsfaktoren ausgeschlossen werden kann. Kriterien hierfür können u.a. die kritischen Massen oder der Anreicherungsgrad sein. Die Angemessenheit der Sicherheitsfaktoren richtet sich nach den Unsicherheiten bei der Kritikalitätsbestimmung und den möglichen Konsequenzen eines Kritikalitätsunfalls. Für den Nachweis der Kritikalitätssicherheit ist zu zeigen, dass beim Umgang mit den Spaltstoffen erst zwei unabhängige Einzelfehler zu einem kritischen Zustand führen können (Konzept „doppelter Einzelfehler“). Bei der Bewertung der Kritikalitätssicherheit sind weiterhin die eingesetzte Sicherheitsausrüstung, der Materialfluss und die Anlieferungs- und Übergabebereiche zu berücksichtigen. Als Bewertungskriterien für kritische Zustände sind die nuklearen Eigenschaften, die Masse, die Verteilung und Konzentration der spaltbaren Stoffe in einer plausiblen Mischung mit moderierenden oder reflektierenden Materialien, ggf. vorhandene Neutronenabsorber, der Anreicherungsgrad, die chemische Zustandsform, mögliche Temperaturbereiche sowie das beanspruchte Volumen zu berücksichtigen. Weiterhin sind benachbarte Volumina mit spaltbaren Stoffen zu berücksichtigen. Die Bewertung soll auch abnormale Betriebszustände abdecken (z. B. Aufkonzentration, unzulässig dichte Lagerung von Einzelvolumina, Verlust der Integrität, Änderung des Moderations- und/oder Reflexionszustands). Basis für die Kritikalitätsbewertung sollen experimentelle Daten und, wenn nicht verfügbar, Ergebnisse von validierten Berechnungsprogrammen und WQ-Daten sein.

Zu ISO 7753 liegt eine Version mit Stand 12/1991 vor [25]. Diese entspricht jedoch inhaltlich genau der Version aus 1987 [24] und ist nur um ein nationales Vorwort und eine Anerkennungsnotiz ergänzt.

Zu ANSI/ANS-8.15 liegt eine neue Version mit Stand 2014 vor [33]. Kritische Massen für Cf-249 und Cf-251 wurden aus ANSI/ANS-8.15 (1981) [32] unverändert übernommen. Hinsichtlich spaltbarer Stoffe, die eine Kettenreaktion unterhalten können, ergänzt ANSI/ANS-8.15 (2014) [33] gegenüber der älteren Fassung nachfolgende Nuklide: U-232, U-234, Pu-236, Pu-240, Pu-242, Cm-242, Cm-246.

Projekt Konrad, ÜSiKo Los 3 „Unterkritikalität in der Betriebsphase“

Phase 1: Ermittlung des Überprüfungsbedarfs

Seite: 22 von 46

Für die in den ELB [3] betrachteten, aus ANSI/ANS-8.15 (1981) [32] übernommenen, höheren spaltbaren Actinoide werden in ANSI/ANS-8.15 (2014) [33] nachfolgende Werte zu den kleinsten kritischen Massen angegeben, die sich z.T. von den früheren Angaben unterscheiden.

Nuklide	ANSI/ANS-8.15 (1981)	ANSI/ANS-8.15 (2014)
Np-237 (metallisch, stahlreflektiert)	20	21
Pu-238 (metallisch, stahlreflektiert)	3	3,3
Am-241 (metallisch, stahlreflektiert)	16	16
Am-242m (thermisches System, H ₂ O-reflektiert)	0,013	0,011
Am-242m (thermisches System, stahlreflektiert)		0,009
Am-243 (metallisch, stahlreflektiert)	25	45
Cm-243 (thermisches System, H ₂ O-reflektiert)	0,09	0,09
Cm-243 (thermisches System, stahlreflektiert)		0,08
Cm-244 (metallisch, stahlreflektiert)	3	7
Cm-245 (thermisches System, H ₂ O-reflektiert)	0,03	0,023
Cm-245 (thermisches System, stahlreflektiert)		0,022
Cm-247 (thermisches System, H ₂ O-reflektiert)	0,9	0,5
Cm-247 (thermisches System, stahlreflektiert)		0,35
Cf-249 (thermisches System, H ₂ O-reflektiert)	0,01	0,01
Cf-251(thermisches System, H ₂ O-reflektiert)	0,005	0,005

Tab. 3: Kleinste kritische Massen (kg) höherer spaltbarer Actinoide, nach ANSI/ANS-8.15 (1981) [32] und (2014) [33]

Zusätzlich gibt ANSI/ANS-8.15 (2014) [33] maximale Konzentrationen für homogene Wasser-Spaltstofflösungen an, die noch kritikalitätssicher sind. Im Vergleich zu den nach den ELB [3]

Projekt Konrad, ÜSiKo Los 3 „Unterkritikalität in der Betriebsphase“

Phase 1: Ermittlung des Überprüfungsbedarfs

Seite: 23 von 46

zulässigen Massenkonzentration (allgemein 50g/0,1m³, summarisch für die durch thermische Neutronen spaltbaren Stoffe U-233, U-235, Pu-239 und Pu-241 und für die höheren spaltbaren Actinoide Am-242m, Cm-243, Cm-245, Cm-247, Cf-249 und Cf-251) gibt ANSI/ANS-8.15 (2014) [33] nur für nachfolgende Nuklide kleinere Konzentrationen an:

Nuklid	max. kritikalitätssichere Konzentration in homogener Wasserlösung (g/0,1m ³) nach ANSI/ANS-8.15 (2014) [33]
Am-242m	30,4
Cf-251	39,2

Tab. 4: Maximale Konzentrationen für homogene Wasser-Spaltstofflösungen in ANSI/ANS-8.15 (2014) [33], welche die zulässige Massenkonzentration in ELB [3] unterschreiten

Isotopengemische aus Pu, Am und Cm wurden aus ANSI/ANS-8.15 (1981) [32] in Anhang A der neuen Fassung ANSI/ANS-8.15 (2014) [33] übernommen, darin jedoch auch empfohlen, stattdessen diese Werte neu zu berechnen.

Für Stoffgemische verschiedener Isotope eines Elements empfiehlt ANSI/ANS-8.15 (2014) [33] als Kriterium die kleinste kritische Masse der Einzelisotope zu verwenden. Dies entspricht dem Vorgehen beim Summenkriterium für Stoffgemische in den ELB [2]. Alternativ empfiehlt ANSI/ANS-8.15 (2014) [33] eine detaillierte Kritikalitätsberechnung des jeweiligen Stoffgemisches.

Auch die IAEA liefert mit Safety Guide No. TS-G-1.1 (ST-2) (2002) [34] Orientierungshilfen hinsichtlich zu betrachtender spaltbarer Stoffe mit Potenzial für den Erhalt einer selbsttätig ablaufenden nuklearen Kettenreaktion. Jedoch wird auch hier auf ANSI/ANS-8.15 [33] verwiesen, dieser Safety Guide stellt also keine zu ANSI/ANS-8.15 [33] unabhängige Informationsquelle dar.

5.3 KRITERIUM 3: GRUNDANFORDERUNGEN UND ZULÄSSIGE KONZENTRATIONEN

Der PFB [2] und die ELB [3] sind die gültige Genehmigungsgrundlage für das Endlager Konrad.

Hinsichtlich der Kritikalitätssicherheit in der Betriebsphase des Endlagers Konrad werden in den ELB [3] explizit Grundanforderungen an zulässige Massen bzw. Massenkonzentrationen für spaltbare Stoffe, für besondere Moderatormaterialien sowie an die Form, den Zustand und die Fixierung der Abfallprodukte festgelegt. Nach aktuellem Stand von W&T werden mit diesen Grundanforderungen alle Bereiche abgedeckt, die für die Sicherstellung der Kritikalitätssicherheit relevant sind. Mit den Grundanforderungen in den ELB [3] werden implizit auch weitere nukleare Sicherheitskonzepte, z.B. die Kontrolle des Moderationsgrades (siehe Handbuch zur Kritikalität, Band 1, 2015 [26]) abgedeckt. Eine homogene Isotopenverteilung in den Abfallgebinden wird in den ELB [3] (außer für Natururan, abgereichertes Uran und U-235/U-238-Gemische mit < 5 Massen-% U-235) nicht gefordert und in den Sicherheitsanalysen auch nicht kreditiert.

Projekt Konrad, ÜSiKo Los 3 „Unterkritikalität in der Betriebsphase“

Phase 1: Ermittlung des Überprüfungsbedarfs

Seite: 24 von 46

Die zulässigen Massenkonzentrationen in den ELB [3] für durch thermische Neutronen spaltbare Spaltstoffe basieren auf Kritikalitätsberechnungen, die für kritikalitätssichere Zustände charakteristische k_{eff} -Werte von 0,71 und darunter ausweisen (EU072.2 [14], EU085.2 [11], EU160 [12], EU192 [10]). Im Vergleich dazu finden in der Kerntechnik nach aktuellem Stand von W&T für sicher unterkritische Spaltstoffanordnungen charakteristische Werte von $k_{\text{eff}} < 0,99$ (kalt unterkritische Spaltstoffanordnungen) oder $k_{\text{eff}} < 0,95$ (Brennelementwechsel/-lagerung) Anwendung [35]. Ziel ist auch hier durch technische Maßnahmen die Unterkritikalität einer Spaltstoffanordnung für einen längeren Zeitraum (z.B. Lagerung von Brennelementen) und unter Berücksichtigung von Störungen und Störfällen sicherzustellen.

Für Stoffgemische aus U-233, U-235, Pu-239 oder Pu-241 wird zur Sicherstellung der Kritikalitätssicherheit in den ELB [3] ein Summenkriterium zugrunde gelegt, das auf der Kritikalitätsbewertung der Einzelisotope aufbaut. Nach aktuellem Stand von W&T kann der Kritikalitätszustand eines Spaltstoffgemisches bzw. seine kleinste kritische Masse direkt berechnet werden.

Zulässige Abstellpositionen von Abfallgebinden im Anlieferungsbereich und dem Pufferlager sowie Stapelkonzepte und Stapelhöhen in den Einlagerungskammern sind in den Sicherheitsanalysen zum PFB [2] schon berücksichtigt. Neue Abfallgebindetypen, andere Stellkonzepte oder andere Einlagerungskammern sind nicht vorgesehen. Hinsichtlich des aktuellen Stands von W&T ergeben sich keine Abweichungen.

Im Falle der Überschreitung von zulässigen Spaltstoffmassen oder -konzentrationen in Abfallgebinden regelt die Produktkontrolle [38] entsprechende Einzelfallprüfungen. Die Aktualität der Einzelfallprüfung bezüglich des Stands von W&T ist im Rahmen der Prüfung der Produktkontrolle zu bewerten.

5.4 KRITERIUM 4: BERECHNUNGSVERFAHREN ZUR KRITIKALITÄTSBESTIMMUNG

Die Verwendung einer kugelförmigen oder schichtweisen, wassermodierten, reflektierten Spaltstoffanordnung als Geometrie für Kritikalitätsberechnungen ist auch nach aktuellem Stand von W&T eine zuverlässige Methode, die kleinsten kritischen Massen thermisch spaltbarer Stoffe in guter Näherung zu bestimmen.

Spaltstoffgemische mit Resonanzabsorber in einer heterogenen Mischung mit Moderatormaterial können unter Umständen zu einer etwas kleineren kritischen Masse führen als eine homogene Spaltstofflösung [36]. In den ELB [3] ist gefordert, dass Urannuklidgemische in einem chemisch nicht trennbaren Zustand vorliegen. U-235 und U-238 sind damit als homogen gemischt zu betrachten und die reaktivitätsmindernde Wirkung von U-238 kann ohne höheren Detaillierungsgrad des Spaltstoffgemisches in den Kritikalitätsberechnungen berücksichtigt werden. Nach aktuellem Stand von W&T kann die Kritikalität heterogen verteilter Spaltstoffgemische auch explizit berechnet werden. Heterogen im Moderator verteilte Spaltstoffgemische können sich ab Partikeldurchmessern von wenigen Zehntel mm auf den Kritikalitätszustand auswirken. Es sei jedoch darauf hingewiesen, dass das zufällige Auftreten einer derartig optimalen, gleichmäßig heterogen verteilten Spaltstoffmischung in einem realen Abfallprodukt unter den Anforderungen der ELB [3] extrem unwahrscheinlich ist.

Projekt Konrad, ÜSiKo Los 3 „Unterkritikalität in der Betriebsphase“

Phase 1: Ermittlung des Überprüfungsbedarfs

Seite: 25 von 46

Für die Berechnung kritischer Massen wird nach aktuellem Stand von W&T auf aktuelle WQ-Datenbibliotheken (z.B. ENDF/B-VII, CENDL-3.1, JEND-4.0) zurückgegriffen. Gegenüber früheren Versionen weisen diese Bibliotheken eine höhere Datenmenge (Punktdaten), höhere Datendichten in Resonanzbereichen, in Bereichen sehr hoher und sehr kleine Teilchenenergien und für seltenere Teilchenreaktionen auf. Für Kritikalitätsberechnungen werden jedoch auch heutzutage nicht diese Punktdaten direkt verwendet sondern daraus WQ-Gruppendaten erzeugt, die für die jeweilige Fragestellung besonders geeignet sind (Kriterium ist eine ausreichende Gruppenzahl für den jeweils interessierenden Energiebereich). Diese WQ-Gruppendaten werden anhand repräsentativer Neutronenspektren so ermittelt, dass die Reaktionswahrscheinlichkeiten (z.B. die Wahrscheinlichkeit für eine Spaltung durch thermalisierte Neutronen) gegenüber einer Detailberechnung auf Basis von Punktdaten erhalten bleiben.

In den ELB [3] werden besonders wirksame Moderatormaterialien (Schwerwasser (D_2O), Graphit und Beryllium), welche die Moderationswirkung von Wasser übersteigen, explizit betrachtet und die Abfallgebinde bei Erreichen bestimmter Konzentrationswerte einer Einzelfallprüfung durch den Betreiber unterzogen. Nach aktuellem Stand von W&T sind darüber hinaus keine weiteren besonders wirksamen Moderatormaterialien zu betrachten.

6 SICHERHEITSTECHNISCHE BEWERTUNG VON ABWEICHUNGEN

Die in Kapitel 5 identifizierten Abweichungen zwischen aktuellem Stand von W&T und dem Stand von W&T des PFB [2] werden im Folgenden hinsichtlich ihrer sicherheitstechnischen Relevanz für die Sicherstellung der Unterkritikalität in der Betriebsphase bewertet. Die Abweichungen werden gegenüber den einzelnen Kriterien und in ihrer Gesamtheit hinsichtlich der in Kapitel 2 genannten Maßstäbe betrachtet.

6.1 BEWERTUNG ANHAND KRITERIEN

6.1.1 Kriterium 1: Gesetzliche Vorgaben

- AtG:

Die in der Erweiterung des AtG [37] erwähnte Rechtsverordnung liegt zum aktuellen Zeitpunkt noch nicht vor.

Aus technischer Sicht ergeben sich keine sicherheitstechnisch relevanten Auswirkungen, da thermisch oder schnell spaltbare höhere Actinoide in den ELB [3] schon berücksichtigt werden und hierfür Aktivitätsbegrenzungen bzw. zulässige Massen weit unterhalb ihrer jeweiligen kleinsten kritischen Masse definiert werden (Sicherheitsfaktor $1/50 m_{\text{kritisch}}$, siehe EU394 [6]). Für Natururan ist die Unterkritikalität durch die Begrenzung der Massenkonzentration besonders wirksamer Moderatormaterialien sichergestellt (D_2O , Graphit, Beryllium). Der im AtG [37] konkretisierte Massen- und Konzentrationswert hat keine sicherheitstechnische Relevanz, da im PFB [2] hinsichtlich Kritikalitätssicherheit nicht zwischen Kernbrennstoffen und sonstigen radioaktiven Stoffen unterschieden wird. Es liegt kein sicherheitsrelevantes Delta vor.

- StrSchV:

Aus der Umsortierung der Vorgaben in der StrSchV [28] hinsichtlich einer kritikalitätssicheren Lagerung ergeben sich keine sicherheitstechnisch relevanten Auswirkungen, da mit der Umstrukturierung keine inhaltliche Konkretisierung verbunden ist. Es liegt kein sicherheitsrelevantes Delta vor.

6.1.2 Kriterium 2: Berechnungs- und Bewertungsgrundlagen

- DIN-Normen:

Zu DIN 25403-1 liegt eine neue Version mit Stand vom 12/2013 vor [18], in der hinsichtlich des Sicherheitsprinzips nur noch von einem Einzelfallkriterium ausgegangen wird. Nach aktuellem Stand von W&T erfüllt der PFB [2] mit der Beachtung des früheren doppelten Einzelfallkriteriums das neu formulierte Einzelfallkriterium. Aus dem expliziten Verweis auf DIN 25478 [30] hinsichtlich der Validierung der Rechenverfahren anhand experimenteller Ergebnisse ergibt sich keine sicherheitstechnisch relevante Auswirkung. Denn auch schon für den PFB [2] wurde eine

Projekt Konrad, ÜSiKo Los 3 „Unterkritikalität in der Betriebsphase“

Phase 1: Ermittlung des Überprüfungsbedarfs

Seite: 27 von 46

Validierung der verwendeten Berechnungsprogramme anhand experimenteller Daten gefordert und zu diesem Zeitpunkt lag auch schon eine frühere Version der DIN 25478 (07/1994) [29] vor, die eine entsprechende Anleitung zur Validierung enthält.

Mit der neuen DIN 25474 (06/2014) [20] werden die administrativen Maßnahmen und Kontrollen zur Einhaltung der Kritikalität nun als Forderung statt als Möglichkeit formuliert und priorisiert. Höchste Priorität wird dabei passiven technischen Maßnahmen zugeordnet. Inhaltlich stimmen die in DIN 25474 (06/2014) [20] ausgeführten administrativen und technischen Maßnahmen und Kontrollen mit der Aufzählung in DIN 25474 (07/1996) [19] überein.

Mit den Festlegungen im PFB [2] und den ELB [3] zu Abfallgebindepositionierungen im Anlieferungsbereich und in der Pufferhalle, der Begrenzung der maximalen Stapelung von Abfallgebinden pro Stapelabschnitt durch den Querschnitt der Einlagerungskammern sowie die Vorgabe von zulässigen Konzentrationswerten für Spaltstoffe und besondere Moderator- und Reflektormaterialien wird den mit höchster Priorität geforderten Maßnahmen entsprochen. Zulässige Abfallgebindepositionierungen, maximale Stapelung pro Stapelabschnitt als auch die zulässigen Konzentrationen sind Bestandteil der Sicherheitsanalysen zur Kritikalitätssicherheit. Für nicht zulässige Moderatormaterialien (Graphit, Beryllium, D₂O) werden Konzentrationswerte für Abfallgebinde definiert, bei deren Überschreitung eine Einzelfallprüfung durch den Betreiber erfolgt.

Umbauten mit Einfluss auf die Kritikalitätssicherheit (Anlieferungsbereich, Pufferhalle, Einlagerungskammern) bedürfen einer Änderung des mit dem PFB [2] festgelegten Konzepts für das Endlager Konrad.

Aus der aktuellen Version der DIN 25474 (06/2014) [20] ergeben sich damit keine sicherheitstechnisch relevanten Auswirkungen. Bei den DIN-Normen liegt kein sicherheitsrelevantes Delta vor.

- ISO-Normen:

Die in der neuen ISO 1709 (02/2018) [23] genannten Kriterien zur Bewertung der Kritikalitätssicherheit werden mit dem PFB [2] und den ELB [3] erfüllt. Hinsichtlich der Sicherheitsfaktoren werden keine quantitativen Angaben gemacht. Aus der aktuellen ISO 1709 (02/2018) [23] ergeben sich somit keine sicherheitstechnisch relevanten Auswirkungen. Die neuere ISO 7753 (12/1991) [25] entspricht inhaltlich genau der Version ISO 7753 (1987) [24], wie sie dem PFB [2] zugrunde liegt. Bei den ISO-Normen liegt kein sicherheitsrelevantes Delta vor.

- ANSI/ANS-8.15:

Die in ANSI/ANS-8.15 (2014) [33] ergänzten Nuklide U-232, U-234, Pu-236, Pu-240, Pu-242, Cm-242 und Cm-246 werden in den ELB, Tab. 5 und 6 [3], schon mit Aktivitätsbegrenzungen erfasst. Hinsichtlich der Kenntnis der Isotopenzusammensetzung der Abfallprodukte ergibt sich damit keine sicherheitstechnisch relevante Auswirkung. Hinsichtlich des ELB-Konzepts, die jeweils restriktivste Anforderung bezüglich der zulässigen Aktivitäten der Radionuklide und Radionuklidgruppen in einem Abfallgebinde einzuhalten, ist ein Nachweis zu ergänzen, dass die Aktivitätsbegrenzung aus der Analyse zur thermischen Beeinflussung des Wirtsgesteins abdeckend gegenüber der jeweiligen kritikalitätssicheren Aktivität ist.

Aus Konzentrationsangaben für die ergänzten Nuklide, die unterhalb der zulässigen Konzentration nach ELB [3], Tab. 11, liegen, resultieren keine sicherheitstechnisch relevanten Auswirkungen, da

Projekt Konrad, ÜSiKo Los 3 „Unterkritikalität in der Betriebsphase“

Phase 1: Ermittlung des Überprüfungsbedarfs

Seite: 28 von 46

die zulässigen Konzentrationen für einzelne höhere spaltbare Actinoide unabhängig voneinander ausgeschöpft werden dürfen (ELB [3], Anhang III.4). In diesem Zusammenhang weist EU192 [10] in Kapitel 2 darauf hin, dass nicht zu erwarten ist, dass Abfallgebinde höhere spaltbare Actinoide in Mengen und Konzentrationen, für die eine Anreicherung und chemische Abtrennung die Voraussetzung wäre, enthalten.

Mit ANSI/ANS-8.15 (2014) [33] werden zusätzlich stahlreflektierte schnelle und thermische Spaltstoffanordnungen betrachtet und hierfür kleinste kritische Massen bestimmt. Im Vergleich mit den in ANSI/ANS-8.15 (1981) [32] angegebenen kritischen Massen liegen für die Nuklide Np-237, Pu-238, Am-243 und Cm-244 die kritischen Massen höher, während für die Nuklide Am-242m, Cm-243, Cm-245 und Cm-247 die kritischen Massen niedriger liegen. Maximal vermindert sich der Wert für die kleinste kritische Masse um den Faktor 2,6 (Cm-247). Bei Berücksichtigung der aktualisierten kleinsten kritischen Massen für höhere spaltbare Actinoide ändert sich der nuklidspezifisch berücksichtigte Sicherheitsfaktor (1/50 der kleinsten kritischen Masse). Sicherheitstechnisch relevante Auswirkungen können sich ergeben, wenn die aus der Analyse der Kritikalitätssicherheit abgeleitete zulässige Konzentration die restriktivste Anforderung für das jeweilige Nuklid darstellt und das Nuklid im Abfallprodukt in einer höheren als der zulässigen Konzentration auftritt. Für den Fall einer Überschreitung eines zulässigen Konzentrationswertes sehen die ELB [3] eine Einzelfallprüfung (gesonderte Kritikalitätsberechnung) durch den Betreiber vor.

In ANSI/ANS-8.15 (2014) [33] werden für die Nuklide Am-242m und Cf-251 maximale Konzentrationen für homogene, kritikalitätssichere Wasser-Spaltstofflösungen angegeben, die kleiner als die Grundanforderung an die Massenkonzentration von 50g/0,1m³ in den ELB [3] sind. Hieraus ergibt sich jedoch keine sicherheitstechnisch relevante Auswirkung, da die restriktivste Anforderung für diese beiden Nuklide durch die Festlegung der zulässigen Masse im Abfallgebinde gegeben ist (ELB, Tab. 11 [3]). Die zulässigen Massen sind auch unter Beachtung der neuen kritikalitätssicheren Spaltstofflösungskonzentrationen aus ANSI/ANS-8.15 (2014) [33] die restriktivste Anforderung für diese Nuklide, entsprechende Konzentrationsanforderungen kommen daher nicht zum Tragen. Ergänzend sei darauf hingewiesen, dass die Grundanforderung an die Massenkonzentration in den ELB [3] summarisch für durch thermische Neutronen spaltbare Stoffe (U-233, U-235, Pu-239 und Pu-241) sowie die höheren Actinoide Am-242m, Cm-243, Cm-245, Cm-247, Cf-249 und Cf-251 gilt. Ein Vergleich mit dem Konzentrationswert nur eines Spaltnuklides ist daher nur zulässig, wenn in dem betrachteten Abfallprodukt ausschließlich dieses Spaltnuklid vorliegt.

Aus der Empfehlung ANSI/ANS-8.15 (2014) [33], für Isotopengemische aus Pu, Am und Cm die jeweiligen kritischen Massen neu zu berechnen, ergeben sich keine sicherheitstechnisch relevanten Auswirkungen, da der PFB [2] und die ELB [3] nur Daten für Einzelnuklide aus ANSI/ANS-8.15 (2014) [33] heranziehen.

Aus der Anwendung der neuen Version der Norm ANSI/ANS-8.15 ergeben sich sicherheitsrelevante Deltas, da die Liste zu betrachtender Spaltstoffe erweitert wurde und sich bei bestimmten Spaltstoffen die kleinsten kritischen Massen geändert haben.

Projekt Konrad, ÜSiKo Los 3 „Unterkritikalität in der Betriebsphase“

Phase 1: Ermittlung des Überprüfungsbedarfs

Seite: 29 von 46

6.1.3 Kriterium 3: Grundanforderungen und zulässige Konzentrationen

- Spaltstoffverteilung

Hinsichtlich der Kritikalitätssicherheit in der Betriebsphase des Endlagers Konrad wird (außer für Natururan, abgereichertes Uran und U-235/U-238-Gemische mit < 5 Massen-% U-235) keine homogene Isotopenverteilung in den Abfallgebinden gefordert und in den Sicherheitsanalysen auch nicht zugrunde gelegt. Eine prozessbedingt eintretende Homogenisierung des Abfallprodukts wirkt sich hinsichtlich der Kritikalitätssicherheit damit positiv aus. Es liegt kein sicherheitsrelevantes Delta vor.

- Niveau der Unterkritikalität (repräsentiert durch k_{eff})

Die als Maß für die sichere Unterkritikalität von durch thermische Neutronen spaltbaren Spaltstoffen herangezogenen k_{eff} -Werte ($\leq 0,71$) sind deutlich konservativer als die Richtwerte, die in der Kerntechnik für sicher unterkritische Anordnungen Anwendung finden ($k_{\text{eff}} \leq 0,95$). Bei Berücksichtigung der k_{eff} -Werte aus der Kerntechnik ergeben sich aus den Kritikalitätsanalysen höhere zulässige Massenkonzentrationen und damit höhere Abstände gegenüber den tatsächlich vorliegenden Massenkonzentrationen, der Sicherheitsfaktor gegenüber der kleinsten kritischen Masse vermindert sich jedoch. Hinsichtlich des qualitativen Sicherheitsniveaus „sicher unterkritisch“ ergibt sich gegenüber einer kritischen Spaltstoffanordnung keine Änderung. Es liegt kein sicherheitsrelevantes Delta vor.

- Summenkriterium

Für Stoffgemische aus U-233, U-235, Pu-239 oder Pu-241 wird zur Sicherstellung der Kritikalitätssicherheit ein Summenkriterium zugrunde gelegt, das auf der Kritikalitätsbewertung der einzelnen Nuklide und insbesondere des Nuklids mit der kleinsten kritischen Masse aufbaut. Im Vergleich zum Summenkriterium liefern direkte Berechnungen zum Kritikalitätszustand eines Spaltstoffgemisches größere kritische Massen und damit größere Sicherheitsfaktoren bzw. einen Nachweis zur Konservativität des Summenkriteriums. Es liegt ein sicherheitsrelevantes Delta vor, da sich mit der direkten Berechnung von Spaltstoffgemischen eine höhere kritische Masse ergibt als bei Anwendung des Summenkriteriums.

6.1.4 Kriterium 4: Berechnungsverfahren zur Kritikalitätsbestimmung

- Heterogene Spaltstoffverteilung

Eine detaillierte Kritikalitätsbetrachtung von heterogen, im Moderator verteilten Spaltstoff-Resonanzabsorber-Gemischen ist mit heutigen Berechnungsmöglichkeiten umsetzbar und kann unter Umständen zu kleineren kritischen Massen führen als die Betrachtung einer homogenen Spaltstoffgemischlösung. In diesen Fällen hat die heterogene Verteilung Einfluss auf den Sicherheitsfaktor, der bei der Festlegung von Aktivitätsbegrenzungen hinsichtlich Kritikalitätssicherheit berücksichtigt wird. Im Vergleich zu den zugrunde gelegten Sicherheitsfaktoren (z.B. 1/50 der kleinsten kritischen Masse höherer spaltbarer Actinoide) und der konservativen Modellannahmen (idealisierte, optimal moderierte und reflektierte Spaltstoffanordnungen, Spaltstoffherauslösung aus Gebinden mit nachfolgender optimierter Spaltstoffanordnung; Vernachlässigung

Projekt Konrad, ÜSiKo Los 3 „Unterkritikalität in der Betriebsphase“

Phase 1: Ermittlung des Überprüfungsbedarfs

Seite: 30 von 46

der tatsächlichen Löslichkeit von Spaltstoffverbindungen in Wasser) ist der Einfluss auf k_{eff} durch die Betrachtung einer optimierten Heterogenität voraussichtlich gering. Es liegt ein sicherheitsrelevantes Delta vor, da mit einem heterogen verteilten Spaltstoffgemisch unter bestimmten Umständen eine kleinere kritische Masse erreicht werden kann als mit einer homogenen Spaltstofflösung.

- Berechnungsverfahren zur Bestimmung von k_{eff}

Nach aktuellem Stand von W&T ist für die beschriebene Kritikalitätsberechnungsmethode (Spektralrechnung, MC-basierte Kritikalitätsberechnung) eine WQ-Gruppenbibliothek ausreichend für belastbare Aussagen zu kleinsten kritischen Massen, da diese 27-Gruppen-Bibliothek aus einer umfangreicheren WQ-Bibliothek, die wiederum auf WQ-Punktdateien basiert, unter Erhaltung der entsprechenden Reaktionsraten bestimmt wird. Für die betrachteten Spaltstoffanordnungen ist auch nach aktuellem Stand von W&T die Berechnung mit dem MC-Berechnungsprogramm Keno 4 und der darin verfügbaren Geometriebeschreibung belastbar. Mit der Leistungsfähigkeit moderner Computer sind Berechnungen von Kritikalitätszuständen für sehr detaillierte Spaltstoffanordnungen möglich. Da aber derartige Spaltstoffanordnungen für die Abfallgebinde nicht garantiert werden können, liefern Kritikalitätsberechnungen zu hypothetischen, detaillierten Spaltstoffanordnungen nur Aussagen hinsichtlich der Konservativität bestehender Anforderungen. Hinsichtlich der Verwendung von WQ-Daten der ENDB/B-IV Datenbibliothek sind gegenüber Berechnungen mit aktuellen WQ-Daten keine wesentlichen Unterschiede in den Kritikalitätsergebnissen zu erwarten, da schon die ENDF/B-IV Daten anhand von Kritikalitätsbenchmarks insbesondere für thermische Systeme erfolgreich validiert wurden (siehe EU294 [8]). Mit der Verwendung aktueller WQ-Daten eröffnet sich die Möglichkeit, Unsicherheiten, die aus der Verwendung einer begrenzten Datenbasis resultieren, zu verringern. Es liegt kein sicherheitsrelevantes Delta vor.

6.2 BEWERTUNG ANHAND VON MASSSTÄBEN

6.2.1 Auswirkungen auf die Belastbarkeit vorhandener Aussagen

Hinsichtlich der Belastbarkeit vorhandener Aussagen zur Sicherstellung der Unterkritikalität in der Betriebsphase ergeben sich aus den identifizierten Abweichungen beim Stand von W&T keine Auswirkungen.

6.2.2 Notwendigkeit zur Berücksichtigung zusätzlicher Erkenntnisse

Aus den identifizierten Abweichungen zwischen Stand von W&T des PFB [2] und aktuellem Stand von W&T ergibt sich hinsichtlich ihrer Sicherheitsrelevanz für die nachfolgenden Punkte die Notwendigkeit zur Berücksichtigung zusätzlicher Erkenntnisse:

1. Mit der Ergänzung der Liste zu betrachtender höherer spaltbarer Actinoide in ANSI/ANS-8.15 (2014) [33] ergibt sich die Notwendigkeit nachzuweisen, dass die in den ELB [3], Tab. 5 und 6, für diese Actinoide festgelegten zulässigen Aktivitäten auch hinsichtlich der Kritikalitätssicherheit die restriktivsten Anforderungen darstellen. Es ist zu zeigen, dass für

Projekt Konrad, ÜSiKo Los 3 „Unterkritikalität in der Betriebsphase“

Phase 1: Ermittlung des Überprüfungsbedarfs

Seite: 31 von 46

das jeweilige Actinoid die zulässige Konzentration, berechnet anhand der Kriterien für die Kritikalitätssicherheit, durch die in den ELB [3] angegebene zulässige Aktivität abgedeckt wird.

2. Aus der Aktualisierung der kleinsten kritischen Massen und der Berücksichtigung von wassermodierten und stahlreflektierten Spaltstoffanordnungen in ANSI/ANS-8.15 (2014) [33] ergeben sich für einige Actinoide Änderungen bei dem Sicherheitsfaktor zwischen der zulässigen Massenkonzentration und der kleinsten kritischen Masse (siehe Tab. 3). Kann nicht ausgeschlossen werden, dass die betreffenden Actinoide in den Abfallbinden in signifikanter Menge auftreten, ergibt sich die Notwendigkeit, die aktualisierten kleinsten kritischen Massen hinsichtlich der zulässigen Massenkonzentration zu berücksichtigen. Hierzu sind mit den in den ELB [3] verwendeten Sicherheitsfaktoren neue zulässige Massenkonzentrationen zu bestimmen und diese hinsichtlich ihrer Abweichung gegenüber den bestehenden zulässigen Massenkonzentrationen zu bewerten. In diesem Zusammenhang sind die Höhe der Sicherheitsfaktoren und der entsprechenden k_{eff} -Werte hinsichtlich des Sicherheitsniveaus „sicher unterkritisch“ nach aktuellem Regelwerk zu bewerten.

6.2.3 Sicherheitsgewinn oder -verlust

Als Maß für die Sicherheit wird die Veränderung des Sicherheitsfaktors herangezogen, der sich aus der restriktivsten Anforderung nach ELB [3] ergibt.

Bei Anwendung des heutigen Stands von W&T können sich aus nachfolgenden Aspekten Sicherheitsverluste oder -gewinne ergeben:

- Spaltstoff-Resonanzabsorber-Gemische, die heterogen in einem Moderator verteilt vorliegen, können eine kleinere kritische Masse aufweisen als eine vergleichbare homogene Spaltstofflösung. Damit vermindert sich der Sicherheitsfaktor (Abstand zwischen zulässiger Massenkonzentration und kritischer Anordnung). Ein sicherheitstechnisch relevanter Sicherheitsverlust ergibt sich daraus dann, wenn die Wirkung einer heterogenen Verteilung signifikant gegenüber den Annahmen wird, die bei der Bestimmung der kleinsten kritischen Massen konservativ getroffen werden (Vorhandensein einer beliebigen Menge an Moderatormaterial, optimale Moderation und Reflektion, optimale Spaltstoffanordnung, Vernachlässigung der maximalen Spaltstofflöslichkeit). Es ist zu zeigen, dass die Erhöhung des k_{eff} -Werts klein gegenüber den Auswirkungen bei Variation der anderen Berechnungsannahmen sowie gegenüber der absoluten Höhe des k_{eff} -Werts ist.
- Bei der Festlegung der zulässigen Massenkonzentrationen für höhere spaltbare Actinoide in den ELB [3] werden, unter Anwendung eines Sicherheitsfaktors von 1/50, Angaben zu kleinsten kritischen Massen aus ANSI/ANS-8.15 (1981) [32] verwendet. Aus der Aktualisierung der kleinsten kritischen Massen und der Berücksichtigung von wassermodierten und stahlreflektierten Spaltstoffanordnungen in ANSI/ANS-8.15 (2014) [33] ergeben sich für einige Actinoide Veränderungen hinsichtlich dieses Sicherheitsfaktors. Ein sicherheitstechnisch relevanter Sicherheitsgewinn oder -verlust tritt dann auf, wenn dieser Sicherheitsfaktor auch die restriktivste Anordnung nach ELB [3] repräsentiert und die Spaltnuklidmasse bei

Projekt Konrad, ÜSiKo Los 3 „Unterkritikalität in der Betriebsphase“

Phase 1: Ermittlung des Überprüfungsbedarfs

Seite: 32 von 46

Berücksichtigung der neuen kritischen Massen signifikant ist. Hierzu sind unter Anwendung der entsprechenden Sicherheitsfaktoren die Massenkonzentrationen zu den aktualisierten kleinsten kritischen Massen zu bestimmen und bzgl. der zulässigen Massenkonzentrationen nach ELB [3] zu bewerten.

- Die Anwendung neuerer Berechnungsmethoden für Spaltstoffanordnungen (inhomogen verteilter Spaltstoff, direkte Kritikalitätsberechnung zu Spaltstoffgemischen) liefern exaktere und realistischere Aussagen zum Kritikalitätszustand der Anordnung und damit eine Möglichkeit, die Konservativität früherer Untersuchungen zu verdeutlichen. Alternativ zur Anwendung des Summenkriteriums ergibt sich darüber hinaus eine Erhöhung des Sicherheitsfaktors.

Projekt Konrad, ÜSiKo Los 3 „Unterkritikalität in der Betriebsphase“

Phase 1: Ermittlung des Überprüfungsbedarfs

Seite: 33 von 46

7 BEWERTUNG VON UNSICHERHEITEN

Hinsichtlich der Kritikalitätssicherheit unterliegen die Feststellungen der Sicherheitsanalysen, die in die ELB [3] eingegangen sind, nachfolgenden Unsicherheiten:

- Bestimmung kleinster kritischer Massen in moderierten Systemen:
 - Kritische Massen bestimmter Spaltstoffe (Np-237, Pu-238, Pu-242, Am-241 und Cm-244) basieren nicht auf direkten kritischen Experimenten mit den Nukliden, sondern auf Messungen von Reaktivitätskoeffizienten (ANSI/ANS-8.15 (2014), Appendix B [33]). Auch wenn aus solchen Messwerten mithilfe verschiedener WQ-Bibliotheken nuklidspezifische kritische Massen berechnet und aus der Variation dieser Ergebnisse Mittelwerte bestimmt werden können, unterliegen diese abgeleiteten kritischen Massen einer höheren Unsicherheit als direkt gemessene kritische Massen.
 - Unsicherheiten in der Spaltstoffanordnung und -zusammensetzung werden durch konservative Annahmen in den Kritikalitätsberechnungen der Sicherheitsanalysen abgedeckt (Ausnahme: heterogene Anordnungen, siehe dazu Kapitel 6.1.4).
 - Statistische Unsicherheiten bei der Bestimmung von k_{eff} -Werten werden dadurch abgedeckt, dass sicher unterkritische Zustände durch im Verhältnis zu entsprechenden Werten in der Kerntechnik niedrigere k_{eff} -Werte ($\leq 0,71$) beschrieben werden.
 - Unsicherheiten in der nuklearen Datenbasis können durch die Verwendung aktueller Datenbibliotheken reduziert werden.
- Spaltstoffverteilung
 - Mit dem Verfahren, schon bei Auftreten von geringen Anteilen kritischer Massen (1/20) für U-233, U-235, Pu-239 und Pu-241 eine gleichmäßige Spaltstoffverteilung sicherzustellen, werden Unsicherheiten in der Spaltstoffverteilung abgedeckt. In den entsprechenden Kritikalitätsbetrachtungen wird das Spaltstoffinventar demgegenüber in seiner reaktivsten Anordnung (lokale Aufkonzentration) berücksichtigt.
 - Unsicherheiten hinsichtlich der Anforderung, für Natururan, abgereichertes Uran und U-235/U-238-Gemische mit < 5 Massen-% U-235 ein homogenes Isotopengemisch sicherzustellen, werden mit der Anwendung des Summenkriteriums abgedeckt.
 - Zu weiteren abdeckenden Betrachtung von stofflichen Unsicherheiten werden die restriktivsten Anforderungen für ein Nuklid in den ELB [3] als maßgebend herangezogen. Hierbei gehen auch Betrachtungen zur Nachbetriebsphase (unterstellte Auslaugung und Aufkonzentration von Spaltstoffen) ein.

Es ergeben sich keine sicherheitsrelevanten Deltas hinsichtlich der aufgeführten Unsicherheiten bei der Berechnung der kleinsten kritischen Massen und der Spaltstoffverteilung.

Projekt Konrad, ÜSiKo Los 3 „Unterkritikalität in der Betriebsphase“

Phase 1: Ermittlung des Überprüfungsbedarfs

Seite: 34 von 46

8 FAZIT

Bei der sicherheitstechnischen Bewertung der identifizierten 13 Abweichungen hat sich gezeigt, dass von den 4 Abweichungen mit einem sicherheitsrelevanten Delta für 3 Abweichungen ein Überprüfungsbedarf in Phase II der ÜSiKo besteht, da eine Verminderung des Sicherheitsfaktors nicht auszuschließen ist (Abweichungen, die den Sicherheitsfaktors erhöhen können, sind in der nachfolgenden Liste nicht aufgeführt):

1. Neue Version von ANSI/AN-8.15, Erweiterung der Spaltstoffliste:

Zum Nachweis, dass die in den ELB [3] aufgeführten zulässigen Aktivitäten für die Kritikalitätssicherheit abdeckend sind, sind auf Basis der neuen Daten aus ANSI/AN-8.15 die nach ELB-Methodik [3] kritikalitätssicheren, zulässigen Aktivitäten zu bestimmen und zu bewerten (siehe hierzu auch Kap. 6.2.2) .

2. Neue Version von ANSI/AN-8.15, Änderung bei den kleinsten kritischen Massen:

Auf Basis der mit ANSI/AN-8.15 aktualisierten kleinsten kritischen Massen sind nach der ELB-Methodik [3] Massenkonzentrationen zu ermitteln und gegenüber den zulässigen Massenkonzentrationen nach ELB [3] hinsichtlich des in den ELB [3] angewendeten Sicherheitsfaktors zu bewerten. Bei der sicherheitstechnischen Bewertung ist auch die tatsächlich vorliegende maximale Ausnutzung der zulässigen Massenkonzentrationen nach ELB [3] in den Abfallgebinden zu berücksichtigen (siehe hierzu Kap. 6.2.2).

3. Bewertung heterogener Spaltstoffanordnungen:

Mit Hilfe von Kritikalitätsberechnungen ist der Nachweis zu führen, dass der Effekt einer heterogenen Spaltstoffanordnung klein ist gegenüber dem Niveau des herangezogenen k_{eff} sowie kleinen Variationen in den weiteren Modelannahmen (z.B. Kugelanordnung, optimaler Moderationszustand, unbegrenzte Spaltstofflöslichkeit, Reflektionsbedingungen). Hierfür sind die gemäß ELB [3] zu berücksichtigenden Spaltstoffe und Resonanzabsorber in für heterogene Anordnungen typischen Partikelgrößen zu betrachten (siehe hierzu Kap.6.2.3).

Das vierte Delta mit sicherheitstechnischer Bedeutung, welches bei der Überprüfung festgestellt wurde („Stoffgemische können mit ihrer Verteilung methodisch besser (gleichzeitig) gerechnet werden (sofern entsprechende Daten vorliegen).“, siehe Anhang 1, lfd. Nr. 10) wird hier nicht weiter betrachtet, da sich aus der Behebung dieses Deltas eine Erhöhung des Sicherheitsfaktors ergibt und somit nicht Gegenstand einer weiteren Überprüfung in Phase II sein wird.

Abschließend sei erneut darauf hingewiesen, dass in diesem Bericht die Sicherheitsanalysen überprüft wurden, die dem PFB [2] hinsichtlich Kritikalitätssicherheit in der Betriebsphase zugrunde liegen. In diesen Sicherheitsanalysen sind jedoch maßgeblich auch Störfallannahmen aus der Nachbetriebsphase eingeflossen (Wasserzutritt, Herauslösung von Spaltstoffen aus dem Abfall). Mit der Übernahme der Ergebnisse der Sicherheitsanalysen in die ELB [3] ergeben sich für die Betriebsphase zusätzliche Konservativitäten hinsichtlich der Kritikalitätssicherheit.

Projekt Konrad, ÜSiKo Los 3 „Unterkritikalität in der Betriebsphase“

Phase 1: Ermittlung des Überprüfungsbedarfs

Seite: 35 von 46

9 ÜBERARBEITUNG HINSICHTLICH REVIEW-BERICHT UND WORKSHOP

Der Entwurf dieses Berichts war Gegenstand eines Reviews, dessen Ergebnisse in einem entsprechenden Bericht [39] zusammengestellt und im Rahmen des Workshops vom 23.01.2019 diskutiert wurden. Anmerkungen aus dem Review-Bericht sowie dem Workshop wurden in der vorliegenden finalen Version des Berichts wie folgt berücksichtigt.

Nr	Anmerkung im Review-Bericht / Workshop	im finalen Bericht vorgenommenen Anpassung
1	Hervorhebung, Kommentierung und Bewertung von unrealistischen und überkonservativen Vorgehen	In Kapitel 8 wurde ein Abschnitt ergänzt, der würdigt, dass mit der Betrachtung der maßgeblichen Sicherheitsanalysen zwangsläufig Störfallannahmen aus der Nachbetriebsphase in die Betrachtung der Betriebsphase einfließen und sich daraus zusätzliche Konservativitäten für die Kritikalitätssicherheit in der Betriebsphase ergebenden.
2	Berücksichtigung der/Anpassung an die aktuell gültige StrSchV und das StrSchG	Gemäß Leistungsbeschreibung der Beauftragung war hinsichtlich des aktuellen Stands von W&T der Zeitpunkt zu Beginn der Arbeiten für diesen Bericht zugrunde zu legen (11/2017). Zur Verdeutlichung wurde in Kap. 2 eine entsprechende Erläuterung ergänzt.
3	Seitenbezug in Kap. 3.2 in Referenz EU426	wurde korrigiert
4	Fehlende Erläuterung zu dem vierten Delta mit sicherheitstechnischer Bedeutung in Kap. 8	In Kap. 8 wurde eine Erläuterung ergänzt, warum das vierte identifizierte Delta mit sicherheitstechnischer Bedeutung nicht Gegenstand des Fazits hinsichtlich Phase II der ÜSiKo ist.
5	Fehlender Hinweis auf die erhebliche Überkonservativität durch Berücksichtigung von Störfallannahmen aus der Nachbetriebsphase	Hierzu wurde in Kap. 8 ein Abschnitt ergänzt, der diesen Sachverhalt würdigt (siehe hierzu Punkt 1 dieser Auflistung).

Tab. 5: Berücksichtigung von Anmerkungen aus Review und Workshop

Projekt Konrad, ÜSiKo Los 3 „Unterkritikalität in der Betriebsphase“

Phase 1: Ermittlung des Überprüfungsbedarfs

Seite: 36 von 46

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Technischer Überwachungs-Verein Hannover/Sachsen-Anhalt e. V., „Endlager für radioaktive Abfälle Schachtanlage Konrad Salzgitter - Ergänzendes Gutachten im Planfeststellungsverfahren“, TÜV Hannover/Sachsen-Anhalt e. V., Hannover, 2002.
- [2] Niedersächsisches Umweltministerium, 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, 2002.
- [3] Bundesamt für Strahlenschutz, Anforderungen an endzulagernde radioaktive Abfälle (Endlagerungsbedingungen, Rev. 2, Stand: Februar 2014) - Endlager Konrad -, K. Kugel und K. Möller, Hrsg., Salzgitter, 2014.
- [4] Bundesamt für Strahlenschutz, „Anforderungen an die zulässige Massenkonzentration an spaltbaren Stoffen in Abfallgebinden für das geplante Endlager Konrad (EU426)“, BfS, Salzgitter, 1995.
- [5] Bundesamt für Strahlenschutz, „Zusätzliche Kritikalitätsbetrachtung auf Basis der Hinweise im TÜV-Zwischenbericht (EU439)“, BfS, Salzgitter, 1991.
- [6] Bundesamt für Strahlenschutz, „Betrachtung höherer spaltbarer Aktiniden im Hinblick auf die Kritikalitätssicherheit des geplanten Endlagers Konrad (EU394)“, BfS, Salzgitter, 1991.
- [7] Bundesamt für Strahlenschutz, „Kritikalitätssicherheit in der Nachbetriebsphase des geplanten Endlagers Konrad unter Berücksichtigung der Gesamtaktivität relevanter Radionuklide am Ende der Betriebsphase (EU342)“, BfS, Salzgitter, 1991.
- [8] Physikalisch-Technische Bundesanstalt, „Systemanalyse Teil 3 - Ergänzende Analysen zur Kritikalitätssicherheit für spaltstoffhaltige Abfallgebinde (EU294)“, PTB, Braunschweig, 1989.
- [9] Physikalisch-Technische Bundesanstalt, „Stellungnahme zum Statusbericht, Endlager Schachtanlage Konrad, Stand Dezember 1988, des TÜV Hannover e. V. - hier: Kapitel 27: Kritikalitätssicherheit (EU229)“, PTB, Braunschweig, 1988.
- [10] Physikalisch-Technische Bundesanstalt, „Zusätzliche Aspekte zum Nachweis der Kritikalitätssicherheit des geplanten Endlagers Konrad (EU192)“, PTB, Braunschweig, 1988.
- [11] Physikalisch-Technische Bundesanstalt, „Systemanalyse Konrad, Teil 3: Kritikalitätsrechnungen zur Massen- und Konzentrationsbegrenzung für Spaltstoffreste in Abfallgebinden (EU085.2)“, PTB, Braunschweig, 1988.
- [12] Physikalisch-Technische Bundesanstalt, „Systemanalyse Konrad Teil 3: Ergänzende Kritikalitätsrechnungen zur Massen- und Konzentrationsbegrenzung für spaltbare Radionuklide in Abfallgebinden (EU160)“, PTB, Braunschweig, 1987.
- [13] Physikalisch-Technische Bundesanstalt, „Systemanalyse Konrad, Teil 2: Zur Kritikalitätssicherheit im Endlager Konrad bei inhomogener Spaltstoffverteilung (EU072.3)“, PTB, Braunschweig, 1985.
- [14] Physikalisch-Technische Bundesanstalt, „Systemanalyse Konrad Teil 2: Zur Kritikalitätssicherung im Endlager Konrad (EU072.2)“, PTB, Braunschweig, 1984.
- [15] Bundesamt für Strahlenschutz, „Beantwortung eines vom TÜV Hannover im Statusbericht August 1991 angeführten Hinweises zur Kritikalitätssicherheit (EU443)“, BfS, Salzgitter, 1991.

Projekt Konrad, ÜSiKo Los 3 „Unterkritikalität in der Betriebsphase“

Phase 1: Ermittlung des Überprüfungsbedarfs

Seite: 37 von 46

- [16] Bundesamt für Strahlenschutz, „Stellungnahme des BfS zum Statusbericht des TÜV Hannover, Stand August 1991; Kapitel 2.7 Kritikalitätssicherheit (EU445),“ BfS, Salzgitter, 1991.
- [17] Deutsches Institut für Normung e. V., DIN 25403-1 Kritikalitätssicherheit bei der Verarbeitung und Handhabung von Kernbrennstoffen, Berlin: Beuth, 12/1991
- [18] Deutsches Institut für Normung e. V., DIN 25403-1 Kritikalitätssicherheit bei der Verarbeitung und Handhabung von Kernbrennstoffen, Berlin: Beuth, 2013.
- [19] Deutsches Institut für Normung e. V., DIN 25474 Maßnahmen administrativer Art zur Einhaltung der Kritikalitätssicherheit in kerntechnischen Anlagen, ausgenommen Kernreaktoren, Berlin: Beuth, 7/1996
- [20] Deutsches Institut für Normung e. V., DIN 25474 Maßnahmen administrativer Art zur Einhaltung der Kritikalitätssicherheit in kerntechnischen Anlagen, ausgenommen Kernreaktoren, Berlin: Beuth, 2014.
- [21] Bundesamt für Strahlenschutz, „Sicherheitsanforderungen für Kernbrennstoffversorgungsanlagen,“ BfS, Salzgitter, 9/1996 (aktuelle Version 2005).
- [22] Internationale Organisation für Normung, „Nuclear energy - Fissile Materials - Principles of criticality safety in storing, handling and processing,“ ISO 1709, Genf, 11/1995
- [23] Internationale Organisation für Normung, „Nuclear energy - Fissile Materials - Principles of criticality safety in storing, handling and processing,“ ISO 1709, Genf, 2018.
- [24] Internationale Organisation für Normung, „Kernenergie; Funktions- und Prüfforderungen für Kritikalitätsdetektions- und -alarmsysteme,“ ISO 7753, Genf, 1987.
- [25] Internationale Organisation für Normung, „Kernenergie; Funktions- und Prüfforderungen für Kritikalitätsdetektions- und -alarmsysteme,“ ISO 7753, Genf, 12/1991
- [26] GRS gGmbH, Handbuch zur Kritikalität, Köln: GRS, 2015.
- [27] W. A. Blyckert, R. D. Carter und K. R. Ridgway, ARH-600 Criticality Handbook, Volume III, La Grange Park: ANS, 1971.
- [28] Bundesregierung, Strahlenschutzverordnung vom 20. Juli 2001 (BGBl. I S. 1714; 2002 I S. 1459), die zuletzt nach Maßgabe des Artikel 10 durch Artikel 6 des Gesetzes vom 27. Januar 2017 (BGBl. I S. 114) geändert worden ist, Berlin, 2017.
- [29] Deutsches Institut für Normung, DIN 25478 Einsatz von Berechnungssystemen beim Nachweis der Kritikalitätssicherheit, Berlin: Beuth, 07/1994.
- [30] Deutsches Institut für Normung, DIN 25478 Einsatz von Berechnungssystemen beim Nachweis der Kritikalitätssicherheit, Berlin: Beuth, 2014.
- [31] A. M. Hathout, R. M. Westfall und H. L. J. Dodds, „SCALE System Cross-Section Validation for Criticality Safety Analysis,“ US-DOE, Washington, 1980.
- [32] American Nuclear Society, „American National Standard ANSI/ANS-8.15-1981: Nuclear criticality control of special actinide elements,“ American Nuclear Society, La Grange Park, 1981.
- [33] American Nuclear Society, „American National Standard ANSI/ANS-8.15-2014: Nuclear criticality safety control of selected actinide nuclides,“ American Nuclear Society, La Grange Park, 2014.
- [34] IAEA, „Advisory Material for the IAEA Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material - Safety Guide No. TS-G-1.1 (ST2),“ IAEA, Wien, 2002.

Projekt Konrad, ÜSiKo Los 3 „Unterkritikalität in der Betriebsphase“ Phase 1: Ermittlung des Überprüfungsbedarfs

Seite: 38 von 46

- [35] Bundesamt für Strahlenschutz, „Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke,“ BfS, Salzgitter, 2015.
- [36] G. Kindleben, „Kritikalitätssicherheit - KTG-Seminar Band 3,“ TÜV Rheinland Verlag, Köln, 1986.
- [37] Bundesregierung, „Atomgesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 15. Juli 1985 (BGBl. I S. 1565), das zuletzt durch das nach Maßgabe des Artikel 10 nach Maßgabe des Artikel 10 durch Artikel 3 des Gesetzes vom 27. Januar 2017 (BGBl. I S. 114) geändert worden ist“, Bundesregierung, Berlin, 2017.
- [38] Produktkontrolle radioaktiver Abfälle Schachtanlage Konrad (EU240), 18.02.1997, zuletzt aktualisiert in Oktober 2010
- [39] Röhlig, Küppers, Schäfer, Walther, „Überprüfung der sicherheitstechnischen Anforderungen des Endlagers Konrad nach dem Stand von Wissenschaft und Technik (ÜSiKo), Review der Phase 1 „Ermittlung des Überprüfungsbedarfs“, Januar 2019

Projekt Konrad, ÜSiKo Los 3 „Unterkritikalität in der Betriebsphase“

Phase 1: Ermittlung des Überprüfungsbedarfs

Seite: 39 von 46

GLOSSAR

Radioaktiver Abfall:	Radioaktive Stoffe im Sinne des § 2 Abs. 1 und 2 des Atomgesetzes, die nach § 9a Abs. 1 Nr. 2 des Atomgesetzes geordnet beseitigt werden müssen.
Abfallgebinde:	Endzulagernde Einheit aus Abfallprodukt und Abfallbehälter.
Abfallprodukt:	Verarbeiteter radioaktiver Abfall ohne Verpackung oder unverarbeiteter radioaktiver Abfall in einem Behälter verpackt.
Kritikalitätssicherheit:	Nachweis, dass die Spaltstoffanordnung sicher unterkritisch ist, wird synonym zu „Nachweis der Unterkritikalität“ verwendet.
Unterkritisch, Unterkritikalität:	Die Zustandsform der radioaktiven Stoffe erlaubt keine sich selbst erhaltende nukleare Kettenreaktion.
homogene Spaltstoffverteilung:	Der Spaltstoff wird als atomar im Moderator/Strukturmaterial gelöst und gleichmäßig verteilt betrachtet (Spaltstofflösung).
heterogene Spaltstoffverteilung:	Der Spaltstoff wird als Partikel betrachtet, der mit einem Moderator/Strukturmaterial gleichmäßig vermischt ist (Spaltstoffgemisch).
inhomogene Spaltstoffverteilung:	Der Spaltstoff ist in dem betrachteten Volumen ungleichmäßig verteilt (dies kann sowohl homogen als auch heterogen sein).
Resonanzabsorber:	Dies ist ein Material, dass Neutronen unterschiedlicher Energie mit ungleichmäßiger Stärke über eine Einfangreaktion absorbiert. Insbesondere werden Materialien so bezeichnet, wenn sie Spaltneutronen während ihrer schrittweisen Abbremsung an anderen Materialien im epithermischen Energiebereich ($E_n > 0,1 \text{ eV}$) sehr stark absorbieren (Resonanzen bei dem Absorptionswirkungsquerschnitt), z.B. U-238.
Sicherheitsfaktor:	Der Sicherheitsfaktor bezeichnet den Abstand zwischen der zulässigen Massenkonzentration bzw. Aktivität eines Spaltnuklids nach ELB [3] und seiner kleinsten kritischen Masse. Er kann quantifiziert werden (z.B. 1/50 für höhere spaltbare Actinoide). Bei einer Erhöhung des Sicherheitsfaktors verbessert sich die Sicherheit der Anlage.
Delta:	Abweichung zwischen Stand von W&T zum Zeitpunkt des PFB und des aktuellen Stand von W&T
Sicherheitsrelevantes Delta:	Veränderungen des Sicherheitsfaktors (des Abstands zwischen der zulässigen Massenkonzentration bzw. Aktivität eines Spaltnuklids und seiner kleinsten kritischen Masse)

Projekt Konrad, ÜsiKo Los 3 „Unterkritikalität in der Betriebsphase“ **Phase 1: Ermittlung des Überprüfungsbedarfs**

Seite: 40 von 46

Konservativität:	Konservativität umfasst alle Annahmen und Maßnahmen, die getroffen werden, um nicht näher bekannte Sachverhalte (z.B. genaue Spaltstoffverteilung im Abfallgebinde) sicher zu erfassen bzw. abzudecken. Konservativität ist ein qualitatives Bewertungsmaß.
Wirkungsquerschnitt (nuklear):	Dieser energieabhängige, nuklidspezifische Wert gibt die Wahrscheinlichkeit für eine bestimmte Teilchenreaktion an (z.B. Spaltung, Absorption, Streuung).
Sicherheitsniveau „sicher unterkritisch“	Beschreibt den Zustand, in dem für eine Spaltstoffanordnung sicher ausgeschlossen ist, dass sich eine selberhaltender Kettenreaktion einstellt. Das Sicherheitsniveau ist eine qualitative Größe, kann aber über den Abstand zu einem kritischen Zustand quantifiziert werden. In der Kerntechnik wird als Maß dafür ein Wert von $k_{\text{eff}} \leq 0,95$ (Abstand $\Delta k_{\text{eff}} = 5\%$) herangezogen [35].

Projekt Konrad, ÜSiKo Los 3 „Unterkritikalität in der Betriebsphase“ Phase 1: Ermittlung des Überprüfungsbedarfs

9KE/25232/B/RB/0002/00 B2820248

Seite: 41 von 46

ANHANG 1: ZUSAMMENFASSUNG – ABWEICHUNGEN UND SICHERHEITSTECHNISCHE RELEVANZ

Ifd. Nr	Kriterium	Identifizierte Abweichung (Delta) im Stand W&T (PFB vs. 02/2018)	Sicherheitstechnische Relevanz ¹ (sicherheitsrelevantes Delta), mit Kurzbegründung	Tendenz (Keine/ Verminderung/ Erhöhung des Sicherheitsfaktors) ²
1.	1	AtG, §2, (1), 4: Die Definition von Kernbrennstoffen wurde erweitert auf generell spaltbare Stoffe mit Potenzial, eine selbstablaufende Kettenreaktion zu erhalten. Diese spaltbaren Stoffe sind in einer Rechtsverordnung festzulegen.	Nein Formal: Es liegt keine entsprechende Rechtsverordnung vor für weitere spaltbare Stoffe vor. Technisch: Spaltbare Stoffe jenseits U-233, U-235, Pu-239 und Pu-241 mit Potenzial für einen Beitrag zur kritischen Masse einer Spaltstoffanordnung werden in den Grundanforderungen und bei den höheren spaltbaren Actinoiden in den ELB schon berücksichtigt (zulässige Aktivitäten und Massenkonzentration).	Keine
2.	1	AtG, §2, (3): Ergänzung (gegenüber AtG, Stand 1985, zitiert in den ELB) einer Konzentrationsangabe zur Unterscheidung zwischen sonstigen radioaktiven Stoffen und Kernbrennstoffen (insgesamt 15g/100kg).	Nein In den ELB wird hinsichtlich Kritikalitätssicherheit kein Kredit von der Unterscheidung zwischen Kernbrennstoffen und sonstigen radioaktiven Stoffen genommen.	Keine
3.	1	StrSchV: Die Paragraphen und einzelne Formulierungen bzgl. Kritikalitätssicherheit haben sich geändert.	Nein Aus der Neuformulierung und der Umstrukturierung der Vorgaben zur Kritikalitätssicherheit ergibt sich kein inhaltlicher Unterschied.	Keine

¹ Sicherheitstechnische Relevanz: Bewertung, ob die bei der Überprüfung des Stands von W&T identifizierten Abweichungen gegenüber dem Stand von W&T des PFB für die Kritikalitätssicherheit in der Betriebsphase des Endlagers Konrad relevant sein können. Zu Definition des Begriffs „sicherheitstechnische Relevanz“ siehe Glossar.

² Der Sicherheitsfaktor beschreibt den Abstand zwischen der zulässigen Massenkonzentration bzw. Aktivität eines Spaltnuklids und seiner kleinsten kritischen Masse.

**Projekt Konrad, ÜSiKo Los 3 „Unterkritikalität in der Betriebsphase“
Phase 1: Ermittlung des Überprüfungsbedarfs**

9KE/25232/B/RB/0002/00 B2820248

Seite: 42 von 46

lfd. Nr	Kriterium	Identifizierte Abweichung (Delta) im Stand W&T (PFB vs. 02/2018)	Sicherheitstechnische Relevanz¹ (sicherheitsrelevantes Delta), mit Kurzbegründung	Tendenz (Keine/ Verminderung/ Erhöhung des Sicherheitsfaktors)²
4.	2	DIN 25403-1: Umformulierung von Doppelereignisprinzip zu Einzelfallkriterium	Nein Für das Sicherheitsprinzip „Eintrittswahrscheinlichkeit und Ereignisablauf“ wurde unter Einhaltung der Randbedingungen nur eine Umformulierung vorgenommen.	Keine
5.	2	DIN 25403-1: Expliziter Verweis auf DIN 25478	Nein Die Forderung, dass für Kritikalitätsberechnungen nur validierte Berechnungsprogramme eingesetzt werden dürfen, bestand schon zum Zeitpunkt des PFB. Zu diesem Zeitpunkt lag auch schon eine frühere Version der DIN 25478 vor, nur wurde auf diese Norm nicht explizit verwiesen. Aus der neuen Version der DIN 25478 ergeben sich keine zusätzlichen Anforderungen an die Validierung von Berechnungsprogrammen hinsichtlich Kritikalitätssicherheit.	Keine
6.	2	DIN 25747: Verschärfung von Formulierungen bzgl. technischer oder administrativer Maßnahmen oder Kontrollen oder einer Kombination Beider (von „Möglichkeit“ zu „Forderung“). Ergänzung einer grundsätzlichen Priorisierung zu den Maßnahmen oder Kontrollen. Zusätzlich werden Forderungen zu zulässigen Moderatoren und Reflektoren (Festlegung und Kontrolle) sowie zu kritikalitätssicherheitsrelevanten Umbauten	Nein Die neue Version der DIN 25474 stimmt inhaltlich mit der Version, die zum Zeitpunkt des PFB maßgebend war, überein. Die im PFB vorgesehenen administrativen Maßnahmen entsprechen der höchsten Priorität (passive technische Maßnahmen). Der zusätzlichen Forderung bzgl. zulässiger Moderatoren und Reflektoren wird im PFB und den ELB schon entsprochen. Umbauten von kritikalitätssicherheitsrelevanten	Keine

**Projekt Konrad, ÜSiKo Los 3 „Unterkritikalität in der Betriebsphase“
Phase 1: Ermittlung des Überprüfungsbedarfs**

9KE/25232/B/RB/0002/00 B2820248

Seite: 43 von 46

Ifd. Nr	Kriterium	Identifizierte Abweichung (Delta) im Stand W&T (PFB vs. 02/2018)	Sicherheitstechnische Relevanz¹ (sicherheitsrelevantes Delta), mit Kurzbegründung	Tendenz (Keine/ Verminderung/ Erhöhung des Sicherheitsfaktors)²
		formuliert.	Bereichen betreffen den Genehmigungszustand der Endlagers Konrad und unterliegen damit den entsprechenden Verfahren für beantragte Änderungen.	
7.	2	ISO 1709 (02/2018): Neuformulierung von Kriterien zur Bewertung der Kritikalitätssicherheit.	Nein Die in der neuen Version der ISO 1709 (02/2018) genannten Kriterien zur Bewertung der Kritikalitätssicherheit werden mit dem PFB und den ELB schon erfüllt.	Keine
8.	2	ISO 7753 (12/1991): Ergänzung eines nationales Vorwort und einer Anerkennungsnotiz.	Nein Inhaltlich stimmt Version 12/1991 mit der im PFB zitierten Version 1987 überein.	Keine
9.	2	ANSI/ANS-8.15, Stand 2014: Ergänzung der Liste spaltbarer Actinoide, die eine Kettenreaktion unterstützen können, um: U-232, U-234, Pu-236, Pu-240, Pu-242, Cm-242 und Cm-246.	Ja Diese zusätzlichen Actinoide 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.	Keine/ Verminderung In Abhängigkeit davon, ob der Nachweis gelingt, dass die bestehende Aktivitätsbegrenzung für die Kritikalitätsbetrachtung abdeckend ist.
		Änderungen bei den kritischen Massen einiger höherer spaltbarer Actinoide (erhöht bei: Np-237, Pu-238, Am-243, Cm-244; vermindert bei:	Ja Die bei den Grundanforderungen und den zulässigen Massen für höhere spaltbare Actinoide	Verminderung/Erhöhung In Abhängigkeit von der Änderung der kritischen

**Projekt Konrad, ÜSiKo Los 3 „Unterkritikalität in der Betriebsphase“
Phase 1: Ermittlung des Überprüfungsbedarfs**

9KE/25232/B/RB/0002/00 B2820248

Seite: 44 von 46

lfd. Nr	Kriterium	Identifizierte Abweichung (Delta) im Stand W&T (PFB vs. 02/2018)	Sicherheitstechnische Relevanz¹ (sicherheitsrelevantes Delta), mit Kurzbegründung	Tendenz (Keine/ Verminderung/ Erhöhung des Sicherheitsfaktors)²
		Am-242m, Cm-243, Cm-245, Cm-247). Ergänzung von kritischen Massen für stahlreflektierte, thermische Systeme.	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 Abfallgebinde, kann analog zu dem Vorgehen beim Summenkriterium behandelt werden (>1% der zulässigen Konzentration).	Masse (keine, wenn die betreffenden Actinoide nicht in signifikanter Menge auftreten).
		Angabe maximaler Konzentrationen für kritikalitätssichere, homogene Wasser-Spaltstofflösungen. Für die Einzelnuklide Am-242m und Cf-251 wird die Grundanforderung von 50g/0,1m ³ unterschritten.	Nein Die für Am-242m und Cf-251 anzuwendenden restriktivsten Werte sind durch die zulässigen Massen im Abfallgebinde gegeben. Die Konzentrationsanforderungen kommen daher nicht zum Tragen.	Keine
10.	3	Stoffgemische können mit ihrer Verteilung methodisch besser (gleichzeitig) gerechnet werden (sofern entsprechende Daten vorliegen).	Ja Die Berechnung mit explizit verteilten Spaltstoffen liefert eine realistischere Aussage zum Kritikalitätszustand des Abfallgebundes 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.	Erhöhung Die explizite Berechnung des Kritikalitätszustandes von Spaltstoffgemischen im Verhältnis zu der jeweiligen kleinsten kritischen Masse resultiert in einer Erhöhung des Sicherheitsfaktors und zum Nachweis der

**Projekt Konrad, ÜSiKo Los 3 „Unterkritikalität in der Betriebsphase“
Phase 1: Ermittlung des Überprüfungsbedarfs**

9KE/25232/B/RB/0002/00 B2820248

Seite: 45 von 46

lfd. Nr	Kriterium	Identifizierte Abweichung (Delta) im Stand W&T (PFB vs. 02/2018)	Sicherheitstechnische Relevanz ¹ (sicherheitsrelevantes Delta), mit Kurzbegründung	Tendenz (Keine/ Verminderung/ Erhöhung des Sicherheitsfaktors) ²
				Konservativität.
11.	3	charakteristische k_{eff} -Werte für sichere Unterkritikalität	Nein K_{eff} -Werte < 0,71 für sicher unterkritische Spaltstoffanordnungen liegen deutlich tiefer als entsprechende Werte in der Kerntechnik (k_{eff} < 95%). Die Anwendung höherer k_{eff} -Werte als Maß für sicher unterkritische Anordnungen resultiert in höheren zulässigen Massenkonzentrationen und damit einer Erhöhung des Sicherheitsabstandes gegenüber der tatsächlichen Konzentration.	Keine Das Sicherheitsniveau „sicher unterkritisch“ bleibt erhalten.
12.	4	Stoffgemische mit Resonanzabsorber in heterogener, moderierter Anordnung berechenbar.	Ja Ein Stoffgemisch aus Spaltstoff und stark neutronenabsorbierendem Material (Resonanzabsorber, z.B. U-238), das heterogen in einem Moderator verteilt ist, kann zu einer kleineren kritischen Masse führen als eine homogene Spaltstofflösung. Der Sicherheitsbeitrag, der aus der Annahme einer für eine optimale Moderation erforderlichen Menge Wasser folgt, ist von einer heterogenen Spaltstoffanordnung unabhängig gültig.	Keine/ Verminderung Abhängig von Art des Stoffgemisches und seiner Verteilung im Moderator. Effekt klein gegenüber herangezogenen k_{eff} -Werten und Konservativitäten in der Spaltstoffanordnung.
13.	4	Berechnungsprogramm SCALE mit Modul Keno 4.	Nein Die Methode zur Kritikalitätsberechnung (Spektralrechnung, Erzeugung einer WQ-Gruppenbibliothek, Kritikalitätsberechnung mit MC) ist weiterhin Stand von W&T.	Keine Verminderung der Unsicherheit bei der rechnerischen Bestimmung kleinster

**Projekt Konrad, ÜsiKo Los 3 „Unterkritikalität in der Betriebsphase“
Phase 1: Ermittlung des Überprüfungsbedarfs**

9KE/25232/B/RB/0002/00 B2820248

Seite: 46 von 46

Ifd. Nr	Kriterium	Identifizierte Abweichung (Delta) im Stand W&T (PFB vs. 02/2018)	Sicherheitstechnische Relevanz¹ (sicherheitsrelevantes Delta), mit Kurzbegründung	Tendenz (Keine/ Verminderung/ Erhöhung des Sicherheitsfaktors)²
			Mit der Verwendung aktualisierter WQ-Daten werden die statistische Sicherheit und der Vertrauensbereich der Ergebnisse verbessert.	kritischer Massen.
			Nein Höhere Computerleistung erlaubt die Berechnung ungleichmäßiger Spaltnuklidverteilungen (Nachweis von Konservativitäten).	Keine