

Sicherstellung der Unterkritikalität in der Betriebsphase

Fachöffentliche Ergebnispräsentation ÜsiKo Phase 2, 23.10.2024

Überblick

- **Δ5: Neue Version von ANSI/ANS-8.15, Erweiterung der Spaltstoffliste**
 - Die ELB führen auf Basis der Norm ANSI/ANS-8.15 zehn spaltbare Nuklide auf, für die maximal zulässige Massen (mzM) pro Gebinde in den ELB definiert sind, nämlich jeweils nuklidweise 1/50 der laut Norm sicher unterkritischen Masse (suM)
 - Die den ELB zugrundeliegende Spaltstoffliste nach ANSI/ANS-8.15 wurde im Jahr 2014 erweitert. Danach sind sieben weitere Nuklide als spaltbar aufgeführt, für die in den ELB keine diesbezüglichen, kritikalitätssicherheitsbezogenen mzM angegeben sind
 - In ÜsiKo Phase 2 wird gezeigt, dass aufgrund anderweitiger Aktivitätsbegrenzungen dieser sieben Nuklide in den ELB die Unterkritikalität gewährleistet ist
 - ✓ Es wurde festgestellt, dass die Unterkritikalität gewährleistet ist.

- **Δ6: Neue Version von ANSI/ANS-8.15, Änderung bei den kleinsten kritischen Massen**
 - Für vier Nuklide, die in den ELB explizit genannt sind, führt die Fassung von 2014 geringere sicher unterkritische Massen (suM) auf als die Fassung von 1981
 - In ÜsiKo Phase 2 wird gezeigt, dass entweder aufgrund anderer Aktivitätsbegrenzungen dieser vier Nuklide in den ELB oder mittels Kritikalitätsrechnungen, die Unterkritikalität gewährleistet ist
 - ✓ Es wurde festgestellt, dass die Unterkritikalität gewährleistet ist.

- **Δ7: Bewertung heterogener Spaltstoffanordnungen**
 - In Spaltstoffsystemen mit sog. Resonanzabsorbern wie z. B. U-238 können heterogene Anordnungen u. U. zu höheren Werten von k_{inf} führen als entsprechende homogene Anordnungen
 - In ÜsiKo Phase 2 wird gezeigt, dass die Kritikalitätssicherheit in der Betriebsphase auch bei Beachtung von weiteren Heterogenitätseffekten gewährleistet ist
 - ✓ Es wurde festgestellt, dass die Unterkritikalität gewährleistet ist.

Einführung (1)

Verwendete Anforderungen aus den ELB Konrad in Hinblick auf die ELB-Methodik zur Sicherstellung der Unterkritikalität

Einführung: Verwendete Anforderungen aus den ELB Konrad in Hinblick auf die ELB-Methodik zur Sicherstellung der Unterkritikalität (1/4)

- Endlagerungsbedingungen Konrad, Kap. 4.1 Grundanforderungen, u. a.
 - Die Abfallprodukte dürfen 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) außer Natururan und abgereichertem Uran nur in einer Massenkonzentration bis zu 50 g pro 0,1 m³ [Anm.: = 100-l] Abfallprodukt enthalten.
 - Bei Containern mit einer Spaltstoffmasse von mehr als einem Zwanzigstel der kleinsten kritischen Masse ist sicherzustellen, dass in jedem beliebig angeordneten kubischen 100-l-Volumen im Abfallgebinde maximal ein Zwanzigstel der kleinsten kritischen Masse des betreffenden Spaltstoffes enthalten ist.
 - Für Natururan, abgereichertes Uran und U-235/U-238-Gemische mit < 5 Massen-% U-235 muss sichergestellt sein, dass die chemisch-physikalische Form der U-235- und U-238-Isotope gleich ist und eine homogene Mischung dieser Isotope vorliegt, so dass eine Abtrennung von U-235 nur mit Verfahren der Isotopentrennung möglich ist.

Einführung: Verwendete Anforderungen aus den ELB Konrad in Hinblick auf die ELB-Methodik zur Sicherstellung der Unterkritikalität (2/4)

- Endlagerungsbedingungen Konrad, Kap. 4.1 Grundanforderungen, u. a.
 - Brennbare radioaktive Abfälle, die spaltbare Stoffe außer Natururan und abgereichertem Uran mit einer Masse von mehr als 1 g pro Abfallgebinde enthalten, müssen in einer nicht brennbaren Abfallmatrix fixiert oder allseitig von einer inaktiven Schicht mit einem Wärmeleitwiderstand (Produkt aus Schichtdicke und reziproker Wärmeleitfähigkeit) von mindestens $0,1 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ umgeben oder in einem Abfallbehälter verpackt sein, der der Abfallbehälterklasse II (Abschnitt 5.2) zugeordnet wird.
 - Bei Abfallgebinden mit mehr als 15 g Spaltstoff ist der Nachweis zu erbringen, dass bei thermischer Belastung des Abfallgebindes eine lokale Aufkonzentrierung ausgeschlossen werden kann.
- In Anhang II Tabelle 7b sind die maximal zulässigen Massen an U-233, U-235, Pu-239 und Pu-241 außer Natururan und abgereichertem Uran, die aus der Analyse zur Kritikalitätssicherheit resultieren, in g pro Abfallgebinde angegeben.
- In Anhang III.4 ist neben einer Summenformel für Mischungen der vier spaltbaren Nuklide auch der Umgang mit zehn höheren spaltbaren Actinoiden festgelegt.

Einführung: Verwendete Anforderungen aus den ELB Konrad in Hinblick auf die ELB-Methodik zur Sicherstellung der Unterkritikalität (3/4)

- Höhere spaltbare Actinoide aus Sicht der Kritikalitätssicherheit
 - Für die zulässigen Aktivitäten bzw. Massen von höheren spaltbaren Actinoiden, die sich aus der Analyse zur Kritikalitätssicherheit ergeben, sind folgende Werte pro Abfallbinde abgeleitet worden (Tabelle III.4-1 der ELB):

Höheres spaltbares Actinoid	Zulässige Aktivität (Bq)	Zulässige Masse (g)
Np-237	$1,0 \cdot 10^{10}$	400
Am-241	$4,0 \cdot 10^{13}$	320
Am-242m	$9,3 \cdot 10^{10}$	0,26
Am-243	$3,6 \cdot 10^{12}$	500
Cm-243	$3,4 \cdot 10^{12}$	1,8
Cm-244	$1,7 \cdot 10^{14}$	60
Cm-245	$3,8 \cdot 10^9$	0,6
Cm-247	$6,1 \cdot 10^7$	18
Cf-249	$3,0 \cdot 10^{10}$	0,2
Cf-251	$5,8 \cdot 10^9$	0,1

Einführung: Verwendete Anforderungen aus den ELB Konrad in Hinblick auf die ELB-Methodik zur Sicherstellung der Unterkritikalität (4/4)

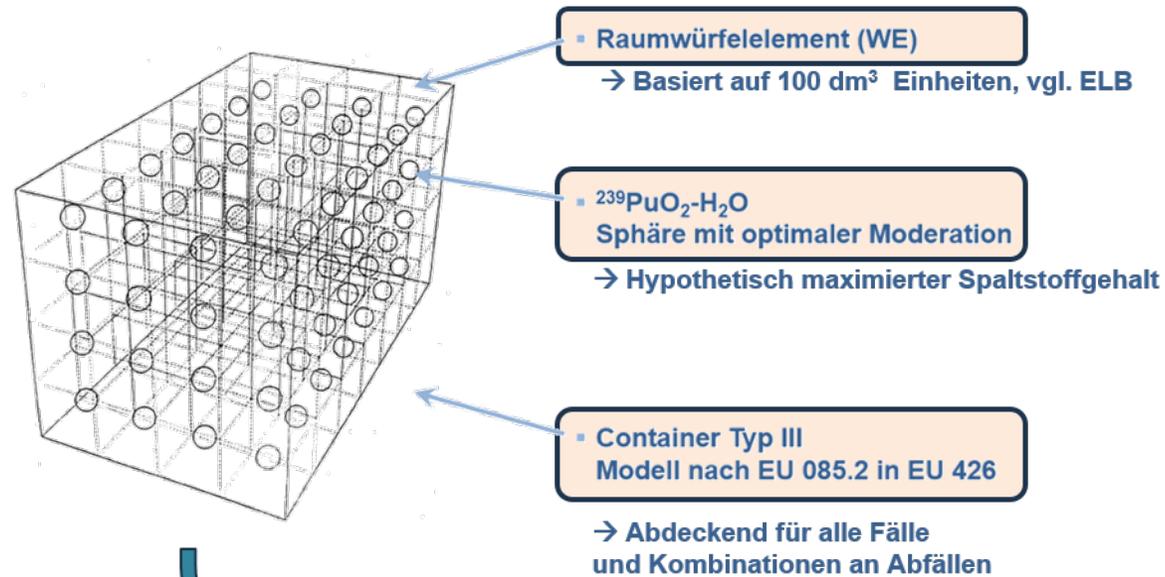
■ Höhere spaltbare Actinoide aus Sicht der Kritikalitätssicherheit

- Die Aktivitäten bzw. Massen der höheren spaltbaren Actinoide sind unabhängig von einem Deklarationswert anzugeben. Die Werte aus Tabelle III.4-1 können gleichzeitig und unabhängig von der Aktivität bzw. Masse der Radionuklide U-233, U-235, Pu-239 und Pu-241 in einem Abfallgebinde ausgeschöpft werden. Diese Werte können überschritten werden; bei ihrer Überschreitung ist eine Einzelfallprüfung (gesonderte Kritikalitätsrechnung) durch das BfS erforderlich.
- Die in Tabelle III.4-1 der ELB angegebenen Massenbegrenzungen der einzelnen Nuklide ergeben sich aus 1/50 der sicher unterkritischen Masse (suM) wie sie in der US-amerikanischen Norm ANSI/ANS-8.15-1981 (R2005) angegeben sind.
 - Grundgedanke ist, dass so kleine Massen aus Sicht der Kritikalitätssicherheit vernachlässigt werden können.
- Unabhängige Begrenzungen aus der thermischen Beeinflussung des Wirtsgesteins, der Störfallanalyse und der Kritikalitätssicherheit
→ das restriktivste Kriterium greift

Einführung (2)

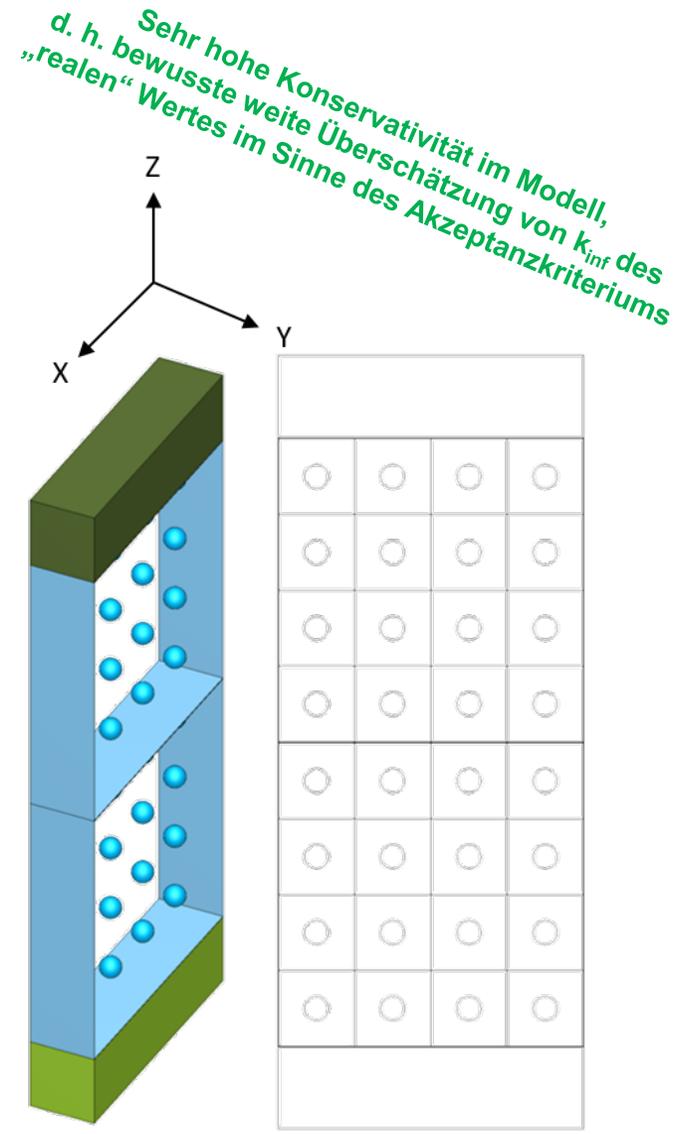
Zugrunde liegendes Rechenmodell

Einführung: ELB-Methodik, Bezug zu $\Delta 5$ und $\Delta 6$ (#1/3)



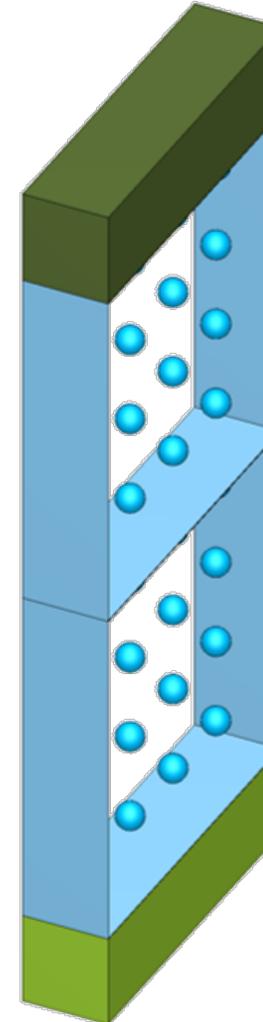
Abdeckende ELB-Methodik nach EU 426

- „Pufferhalle-Modell“
- Zwei Container Typ III übereinander (Z)
- In $\pm X$ -Richtung mit Behälterwandung unendlich fortgesetzt
- In $\pm Y$ -Richtung ohne Behälterwandung unendlich fortgesetzt
- Referenzmodell, errechneter $k_{inf} = 0,750$



Einführung: Rechenmodell zur ELB-Methodik, $\Delta 5$ und $\Delta 6$ (#2/3)

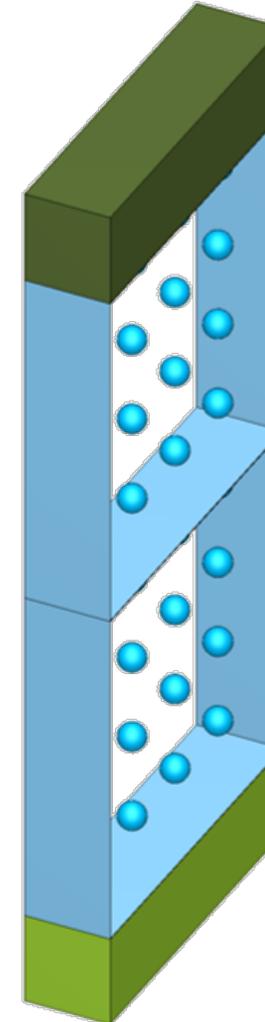
- **Konservativ** auf das maßgebliche Rechenergebnis, den **Neutronenmultiplikationsfaktor k_{inf}** , wirken sich im **Pufferhalle-Modell** folgende, übertrieben unrealistische Modellannahmen aus
 - Annahme des Spaltstoffes als reines Plutonium (Pu)-239 (**Reaktivität**)
 - Anordnung des Spaltstoff-Moderator-Gemisches $\text{PuO}_2 / \text{H}_2\text{O}$ sphärisch unter optimaler Moderation (**Geometrie, Moderationsverhältnis**)
 - Kugel zentral schwebend in allen 100 Liter Raumwürfelementen (**Geometrie**)
 - **Vernachlässigung der Begrenzung der Spaltstoffmasse pro Gebinde**, Modellierung von 5.600 g Pu-239 statt maximal zulässigen 220 g pro Gebinde (Faktor ≈ 25)
 - Vergrößertes (äquivalentes) Volumen des Container Typ III mit $11,2 \text{ m}^3$ im Modell gegenüber $8,7 \text{ m}^3$ real (**Geometrie, modellierte Spaltstoffmenge**)



Einführung: Rechenmodell zur ELB-Methodik, $\Delta 5$ und $\Delta 6$ (#3/3)

- **Konservativ** auf das maßgebliche Rechenergebnis, den **Neutronenmultiplikationsfaktor k_{inf}** , wirken sich im **Pufferhalle-Modell** folgende, übertrieben unrealistische Modellannahmen aus (Fortsetzung)
 - **Unendliche Anzahl an Containern** durch reflektive Randbedingungen, damit inhärent auch unendliche Spaltstoffmasse im Gesamtmodell
 - Zwischenvolumen der Spaltstoffkugeln aufgefüllt mit Wasser als Moderator in variierter, insbesondere auch stark reduzierter Dichte (**Moderationsverhältnis, neutronische Wechselwirkung** zwischen den spaltstoffhaltigen Kugeln)
 - Vernachlässigung der Containerwandung an den Stirnseiten durch infinite Wiederholung der Einheitszelle ohne die Wandung in der $\pm y$ -Richtung; dies ist konservativ da Stahl ein milder Neutronenabsorber ist (**Neutronenabsorption**)

- Berechneter Neutronenmultiplikationsfaktor für dieses **Referenzmodell**
 - $k_{inf} = 0,750 \ll 1,0$, Antragsunterlagen von 1995 (EU 426)
 - $k_{inf} = 0,767 \ll 1,0$, Neuberechnung mit modernen Methoden (vorl. Arbeit)
 - **Gute Reproduzierbarkeit, neu berechneter Wert geringfügig höher, aber weit unterhalb eins**



Delta 5

Neue Version von ANSI/ANS-8.15
Erweiterung der Spaltstoffliste

Δ5: Neue Version von ANSI/ANS-8.15 Erweiterung der Spaltstoffliste – Beschreibung

- Liste der **spaltbaren höheren Actinoide** in den **ELB** basieren auf der Norm **ANSI/ANS-8.15**
 - Aus Sicht der Unterkritikalität ist die nuklidweise, maximal zulässige Masse auf **1/50** der in der Norm angegebenen **sicher unterkritischen Masse (suM)** begrenzt → Prinzip der Vernachlässigbarkeit
- In der **aktualisierten Fassung** der Norm **ANSI/ANS-8.15** von **2014** ist die Liste der spaltbaren höheren Actinoide um **sieben weitere Nuklide** samt deren **suM** ergänzt
 - U-232, U-234, Pu-236, Pu-240, Pu-242, Cm-242 und Cm-246
- *Zum Nachweis, dass die in den ELB aufgeführten zulässigen Aktivitäten aufgrund anderer Analysen für die Kritikalitätssicherheit abdeckend sind, sind die nach ELB-Methodik kritikalitätssicheren, zulässigen Aktivitäten zu bestimmen und zu bewerten.*

Δ5: Neue Version von ANSI/ANS-8.15 Erweiterung der Spaltstoffliste – Bewertung

▪ Vorgehensweise

- Ableitung hypothetischer, nuklidweiser maximal zulässiger Massen zur Unterkritikalität analog zu den Werten in den ELB → 1/50 der jew. sicher unterkritischen Masse (suM)
- Vergleich mit den zu den zulässigen Aktivitäten aus der Störfallanalyse und der thermischen Beeinflussung des Wirtsgesteins äquivalenten Nuklidmassen (Akzeptanzkriterien)
 - 1/50 suM größer als aus den Aktivitäten abgeleitet
→ Aktivitätsbegrenzung ist limitierend ✓
 - 1/50 suM kleiner als aus den Aktivitäten abgeleitet
→ hypothetische Massenbegrenzung aus Kritikalitätssicherheit wäre limitierend
- Durchführung von Kritikalitätsrechnungen
 - Pufferhalle-Modell, ergänzt um sieben Nuklide einzeln und in Kombination zu jew. 1/50 suM zu jeder Spaltstoffkugel im unendlich ausgedehnten Pufferhalle-Modell
 - Weiterführende nuklidweise Betrachtungen falls Einhaltung des Akzeptanzkriteriums so nicht für alle Nuklide darstellbar
 - Weiterführende Betrachtungen zum Summenkriterium $S_w(B)$
 - Weiterführende Betrachtungen zum 1 g / 15 g Kriterium aus der Störfallanalyse
- Anschließende **Bewertung**

Δ5: Neue Version von ANSI/ANS-8.15 Erweiterung der Spaltstoffliste – Bearbeitung

- **Gebindeweise Betrachtungen**
 - Es werden zusätzliche Kritikalitätsrechnungen zur Feststellung der Kritikalitätssicherheit benötigt, da die in den ELB angegebenen Massengrenzwerte aus anderen Sicherheitsanalysen nicht zum Nachweis ausreichen. Kritikalitätsrechnungen am Pufferhalle-Modell unter hypothetischer Einbringung aller aufgeführten höheren Actinoide zu 1/50 suM in jede der Spaltmaterial-Sphären **zeigen Einhaltung der Unterkritikalität** mit $\text{max. } k_{\text{inf}} = 0,7961 \ll 1,0$ (nur U-232 + Cm-246; spaltbar)
 - Kritikalitätsrechnungen am Pufferhalle-Modell unter hypothetischer Einbringung von 4,0 kg Pu-242 in jede der Spaltmaterial-Sphären **zeigen Einhaltung der Unterkritikalität** mit $\text{max. } k_{\text{inf}} = 0,7827 \ll 1,0$
- **Weiterführende Überlegungen** zur Berücksichtigung des Summenkriteriums $S_{\text{W}}(\text{B})$ und Betrachtungen zu dem Kriterium 1 g / 15 g **zeigen Einhaltung der Unterkritikalität**

Δ5: Neue Version von ANSI/ANS-8.15

Erweiterung der Spaltstoffliste – Bearbeitung

▪ Resümee

- Das **Entstehen einer kritischen Anordnung** ist in der **Betriebsphase** des Endlagers Konrad bei Einhaltung der ELB auch unter Berücksichtigung der Erweiterung der Spaltstoffliste der ANSI/ANS-8.15 (2014) **ausgeschlossen**
- Das in der ersten Phase der ÜsiKo identifizierte Delta 5 erweist sich als **nicht sicherheitsrelevant**

Delta 6

Neue Version von ANSI/ANS-8.15
Änderung bei den kleinsten kritischen Massen

Δ6: Neue Version von ANSI/ANS-8.15

Änderung bei den kleinsten kritischen Massen – Beschreibung

- Liste der spaltbaren höheren Actinoide in den ELB basieren auf der Norm ANSI/ANS-8.15 mit Stand 1981
 - Aus Sicht der Unterkritikalität ist die nuklidweise, maximal zulässige Masse auf $1/50$ der in der Norm angegebenen sicher unterkritischen Masse (suM) der spaltbaren Actinoide begrenzt → Prinzip der Vernachlässigbarkeit
- In der aktualisierten Fassung der Norm ANSI/ANS-8.15 von 2014 weisen einige der in der ELB-Liste der spaltbaren höheren Actinoide eine veränderte suM auf
 - Bei den vier Nukliden Am-242m, Cm-243, Cm-245 und Cm-247 liegen die aktualisierten suM niedriger als in der Fassung von 1981
- *Auf Basis der mit ANSI/ANS-8.15 aktualisierten kleinsten kritischen Massen sind nach der ELB-Methodik Massenkonzentrationen zu ermitteln und gegenüber den zulässigen Massenkonzentrationen nach ELB hinsichtlich des in den ELB angewendeten Sicherheitsfaktors zu bewerten.*

Δ6: Neue Version von ANSI/ANS-8.15

Änderung bei den kleinsten kritischen Massen – Bewertung

▪ Vorgehensweise

- Vergleich mit den zu den zulässigen Aktivitäten aus der Störfallanalyse und der thermischen Beeinflussung des Wirtsgesteins äquivalenten Nuklidmassen (Akzeptanzkriterien)
- Überprüfung, ob die suM der vier Nuklide Am-242m, Cm-243, Cm-245 und Cm-247 durch andere Aktivitätsgrenzwerte abgedeckt sind
- Durchführung von Kritikalitätsrechnungen
 - Pufferhalle-Modell, ergänzt um die vier Nuklide einzeln und in Kombination zu jeder Spaltstoffkugel im unendlich ausgedehnten Pufferhalle-Model auf Basis der in den ELB aufgelisteten zulässigen Massen, die über 1/50 suM der in 2014 aufgeführten Massen liegen
- Anschließende **Bewertung**

Δ6: Neue Version von ANSI/ANS-8.15

Änderung bei den kleinsten kritischen Massen – Bearbeitung

- In Fall der vier Nuklide Am-242m, Cm-243, Cm-245 und Cm-247 ist das Akzeptanzkriterium zur Einhaltung der Unterkritikalität das restriktivste
- Kritikalitätsanalysen am Pufferhalle-Modell unter gleichzeitiger Einbeziehung der vier Nuklide in ihren nach ELB zulässigen Maximalmassen
 - zeigen eine Erhöhung des Neutronenmultiplikationsf. auf $\max. k_{inf} = 0,8484 \ll 1,0$
 - zeigen auch unter Einbeziehung dieser Nuklide nach wie vor deutliche Unterkritikalität
 - Anm.: die Anwendung der Summenformel $S_w(B)$ bzgl. der thermischen Beeinflussung des Wirtsgesteins auf die vier Nuklide dieses Deltas hat keine Auswirkungen, da für diese das Kritikalitätskriterium selbst ohne Anwendung dieser Summenformel das restriktivste und damit greifende ist, und gebindeweise gültig ist
- Resümee
 - Das **Entstehen einer kritischen Anordnung** ist in der **Betriebsphase** des Endlagers Konrad bei Einhaltung der ELB auch unter Berücksichtigung der verringerten suM der ANSI/ANS-8.15 (2014) **ausgeschlossen**
 - Das in der ersten Phase der ÜsiKo identifizierte Delta 6 erweist sich als **nicht sicherheitsrelevant**

Delta 7

Bewertung heterogener Spaltstoffanordnungen

Δ7: Bewertung heterogener Spaltstoffanordnungen

Beschreibung

- Diesem Delta liegt die Überlegung zugrunde, dass **Spaltstoffgemische mit Resonanzabsorber** in einer **heterogenen Mischung** mit **Moderatormaterial** unter Umständen zu einer etwas kleineren kritischen Masse führen können als eine **homogene** Spaltstoffanordnung
 - Dies könnte unter Umständen zu **Nichtkonservativitäten** bei der Annahme einer völlig homogenisierten Spaltstoffanordnung führen und hängt insbesondere auch vom betrachteten Moderationsverhältnis ab
 - In ÜsiKo Phase 2 wird gezeigt, dass diese eventuelle Nichtkonservativität **geringfügig** ist gegenüber den **hohen Sicherheitsmargen**, welche durch die **anderen Modellannahmen** eingeführt worden sind
- *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 Modellannahmen (z. B. Kugelanordnung, optimaler Moderationszustand, unbegrenzte Spaltstofflöslichkeit, Reflektionsbedingungen).*

Δ7: Bewertung heterogener Spaltstoffanordnungen

Bewertung

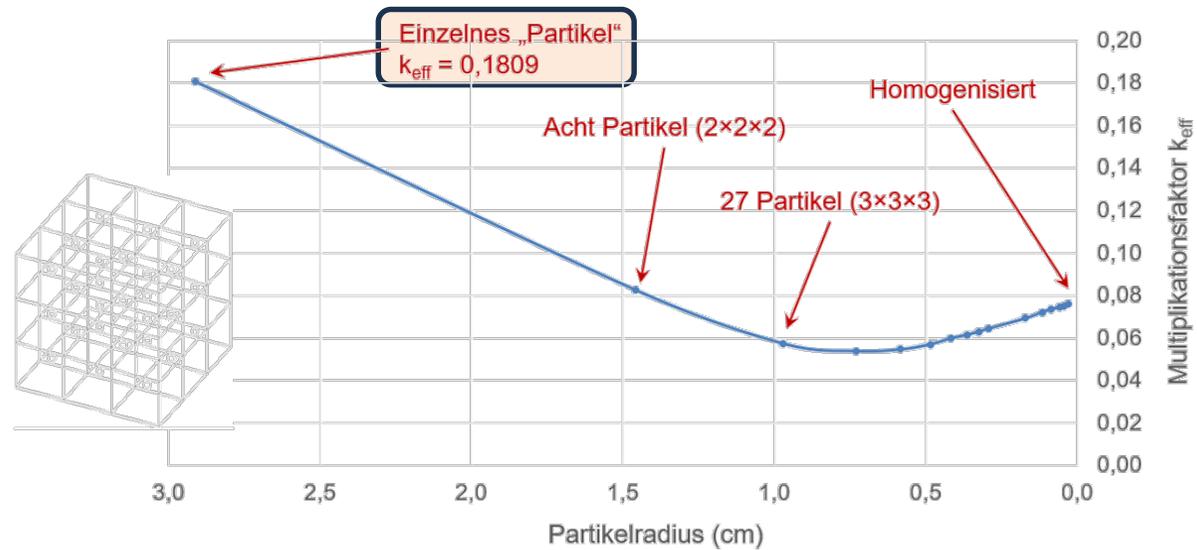
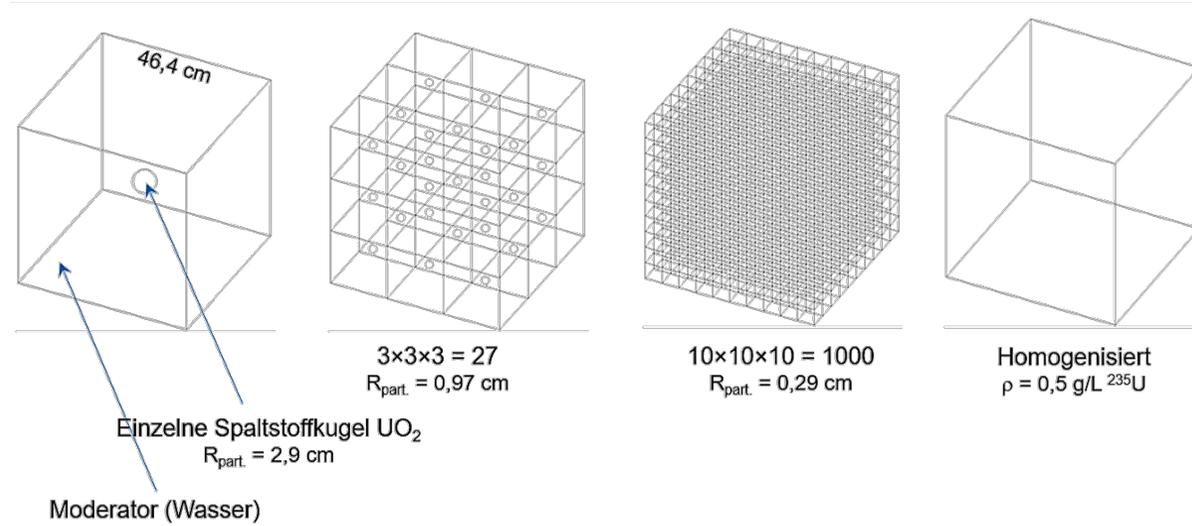
- Die allg. Überlegung, dass eine heterogene Spaltstoffanordnung theoretisch zu einer kleineren kritischen Masse führen könnte ist grds. zutreffend. Dies ist insbesondere auf spezielle physikalische Eigenschaften von Resonanzabsorbern zurückzuführen, v. a. wenn ihr Anteil im Spaltstoffgemisch erheblich ist
- Die wichtigsten **Resonanzabsorber** sind **U-238**, insbesondere bei niedrig angereichertem Uran mit $< 7\%$ U-235, sowie **Pu-240**, und ggf. Pu-242
- Grundsätzlich ist anzumerken, dass **Resonanzabsorber** v. a. **Absorber** sind, weshalb ihre **Vernachlässigung** in **thermischen**, also gut moderierten Systemen wie Lösungen, i. d. R. **konservativ** ist
 - Im **Pufferhalle-Modell** (Referenz) ist **kein Resonanzabsorber** enthalten, weshalb die angestellten Überlegungen als hypothetisch zu betrachten sind

Δ7: Bewertung heterogener Spaltstoffanordnungen Bearbeitung

▪ Kritikalitätsrechnungen

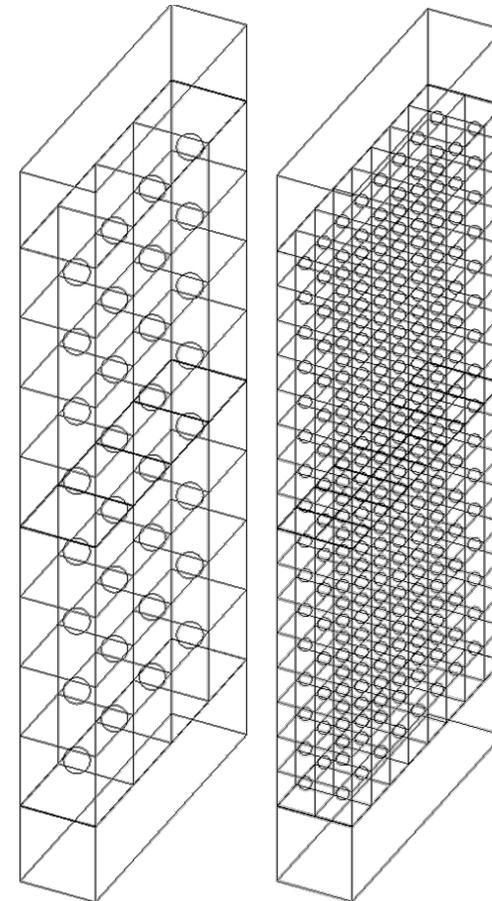
- Um den Einfluss heterogener, im Moderator verteilter Spaltstoff-Resonanzabsorber-Gemische zu bestimmen, wurden zunächst zu Demonstrationszwecken generische Systeme auf Basis von 100 dm^3 Würfleinheiten (WE), mit für Konrad relevanten Spaltstoffmengen und -konzentrationen in Wasser als Moderator, partikelgenau geometrisch explizit modelliert
- Diesem Rechenmodell wurde die maximal zulässige Spaltstoffmasse von 50 g U-235 pro 100 dm^3 WE zugrunde gelegt, d. h. in Konsequenz 1000 g Gesamturan bei 5 % Anreicherung bzw. 1134 g UO_2 pro WE; sie enthält folglich 950 g des Resonanzabsorbers U-238
- Die WE hat an allen sechs Seiten reflektierende Randbedingungen, so dass konservativ ein unendlich ausgedehntes System betrachtet wird und somit eine infinite Spaltstoffmasse
- Unterteilung der Spaltstoffmasse pro WE von solider Kugel über schrittweise Unterteilung in entsprechende kleinere WE bis hin zu vollständiger Homogenisierung unter Beibehaltung von Spaltstoffmasse und Moderationsverhältnis

Δ7: Bewertung heterogener Spaltstoffanordnungen Bearbeitung



Δ7: Bewertung heterogener Spaltstoffanordnungen Bearbeitung

- Kritikalitätsrechnungen
 - Untersuchungen zu Heterogenitätseffekten am Pufferhalle-Modell
 - Vergleich des Pufferhalle-Modells mit in $2 \times 2 \times 2$ unterteilten WE mit entsprechend verkleinerter Spaltstoffkugel (kein Resonanzabsorber enthalten)
 - Variation des Moderationsverhältnisses
 - Referenzfall weist konservativ abdeckend den höchsten errechneten Neutronenmultiplikationsfaktor $k_{inf} = 0,767 \ll 1,0$ auf
 - Parametervariation an Zwischenmoderation, Spaltstoffkonzentration und Radius der Spaltstoffkugel um jeweils $\pm 1\%$ zeigt eine maximale Variation $\Delta k_{inf} \approx 0,0113$ im Referenzfall auf
 - Bei stufenweisem Ersetzen von Pu-239 durch Pu-240 reduziert sich k_{inf} gegenüber dem Referenzfall



Δ7: Bewertung heterogener Spaltstoffanordnungen

Bewertung

▪ Resümee

- Für die im Rahmen der ÜsiKo Phase 2 relevanten Spaltstoffsysteme mit Resonanzabsorbern in den hier relevanten Partikelgrößen wurde die Konservativität der Annahme einer homogenisierten Spaltstoffverteilung gegenüber heterogenen Anordnungen bei gleichen Massen an Spaltstoff und Moderator pro 100 dm³ Volumeneinheit anhand von repräsentativen Beispielen nachgewiesen
- Durch Vergleich mit Parametervariationen am Pufferhalle-Modell wurde gezeigt, dass etwaige Heterogenitätseffekte quantitativ durch mehrere andere Konservativitäten in dem Modell abgedeckt sind, und in jedem Fall eine hohe Marge zum kritischen Zustand $k_{\text{inf}} = 1,0$ verbleibt
- Das **Entstehen einer kritischen Anordnung** durch **Heterogenitätseffekte** ist in der Betriebsphase des Endlagers Konrad für das Δ7 **ausgeschlossen**
- Das in der ersten Phase der ÜsiKo identifizierte Delta erweist sich als **nicht sicherheitsrelevant**

Fazit

✓ Die Sicherstellung der Unterkritikalität in der Betriebsphase des Endlagers Konrad ist auch unter Beachtung der Δ 5, 6 und 7 der ÜsiKo Phase 1 gewährleistet. Die Sicherheitsrelevanz der Deltas ist ausgeschlossen.