

# Projekt Konrad

## ÜsiKo, Los 3 „Unterkritikalität in der Betriebsphase“

### Phase 1: Ermittlung des Überprüfungsbedarfs

Präsentation zum Entwurf des vorläufigen  
Abschlussbericht

Auftragnehmer

TÜV Rheinland Industrie Service GmbH

Dr.-Ing. Christoph Pohl

# ÜsiKo, Los 3 „Unterkritikalität in der Betriebsphase“

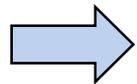
## Inhalt

- Einleitung
- Aufgabenstellung
- Kriterien und Maßstäbe der Überprüfung
- Historie der Sicherheitsanalysen zur Kritikalitätssicherheit
- Stand von W&T des PFB zur Kritikalitätssicherheit
- Aktueller Stand von W&T zur Kritikalitätssicherheit / Abweichungen (Deltas) zum PFB
- Sicherheitstechnische Bewertung der Abweichungen (Deltas)
- Bewertung von Unsicherheiten
- Fazit

# ÜsiKo, Los 3 „Unterkritikalität in der Betriebsphase“

## Einleitung

- 2002: Planfeststellungsbeschluss (PFB) für Errichtung und Betrieb des Bergwerks Konrad mit sicherheitstechnischen Nachweisen u.a. zur Kritikalitätssicherheit, basierend auf verschiedenen Sicherheitsanalysen zum Thema „Nachweis der Kritikalitätssicherheit“, Festlegung und Weiterentwicklung der Endlagerungsbedingungen (ELB, aktuell 2014)
- 2002: Gutachterliche Bestätigung, dass die vorliegenden Sicherheitsanalysen den aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik (W&T) berücksichtigen
- Aktuell: Entscheidung des Betreibers BGE, die Aktualität der Sicherheitsanalysen hinsichtlich Stand von W&T erneut zu überprüfen



Projekt ÜsiKo: Überprüfung der sicherheitstechnischen Anforderungen des Endlagers Konrad nach dem Stand von W&T  
- Phase 1: Ermittlung des Überprüfungsbedarfs



Teilprojekt: Unterkritikalität in der Betriebsphase (Start: November 2017)

# ÜsiKo, Los 3 „Unterkritikalität in der Betriebsphase“

## Aufgabenstellung

- Ziel: Überprüfung des Standes von W&T des PFB und der ihm zugrunde liegenden Sicherheitsanalysen im Hinblick auf die Sicherstellung der Unterkritikalität (Kritikalitätssicherheit) in der Betriebsphase – Ermittlung des Überprüfungsbedarfs (Phase 1)
  
- Aufgabengliederung
  - Identifizierung des Standes von W&T, der dem PFB zugrunde liegt
  - Festlegung von Kriterien und Maßstäben
  - Feststellung und Beurteilung der Sicherheitsrelevanz eines möglichen Deltas zu einem angemessenen Stand von W&T (Stand November 2017)
  - Bewertung von Ungewissheiten

Anmerkung: Abweichungen hinsichtlich der Konservativitäten im PFB wurden als Sicherheitsgewinn/-verlust bewertet. Die Konservativitäten selbst (z.B. Moderationsmaterial und -verhältnis, Löslichkeit) waren nicht zu bewerten.

# ÜsiKo, Los 3 „Unterkritikalität in der Betriebsphase“

## Kriterien und Maßstäbe der Überprüfung der Sicherheitsanalysen I

- Bewertungskriterien 1 bis 4:
  1. Gesetzliche Vorgaben zur Kritikalitätssicherheit (z. B. AtG, StrlSchV)
  2. Normative Grundlagen für Berechnung und Bewertung der Kritikalitätssicherheit (z. B. DIN, ISO, technische Grundlagen)
  3. Grundanforderungen und zulässige Konzentrationen von Spaltstoffen in Abfallprodukten gemäß ELB (abfallprodukt- und gebindespezifisch, für Spaltstoff und spezielle Moderatormaterialien)
  4. Berechnungsverfahren zur Kritikalitätsbestimmung (Berechnungsprogramme, nukleare Daten, geometrische Anordnungen für die Bestimmung der kleinsten kritischen Massen)

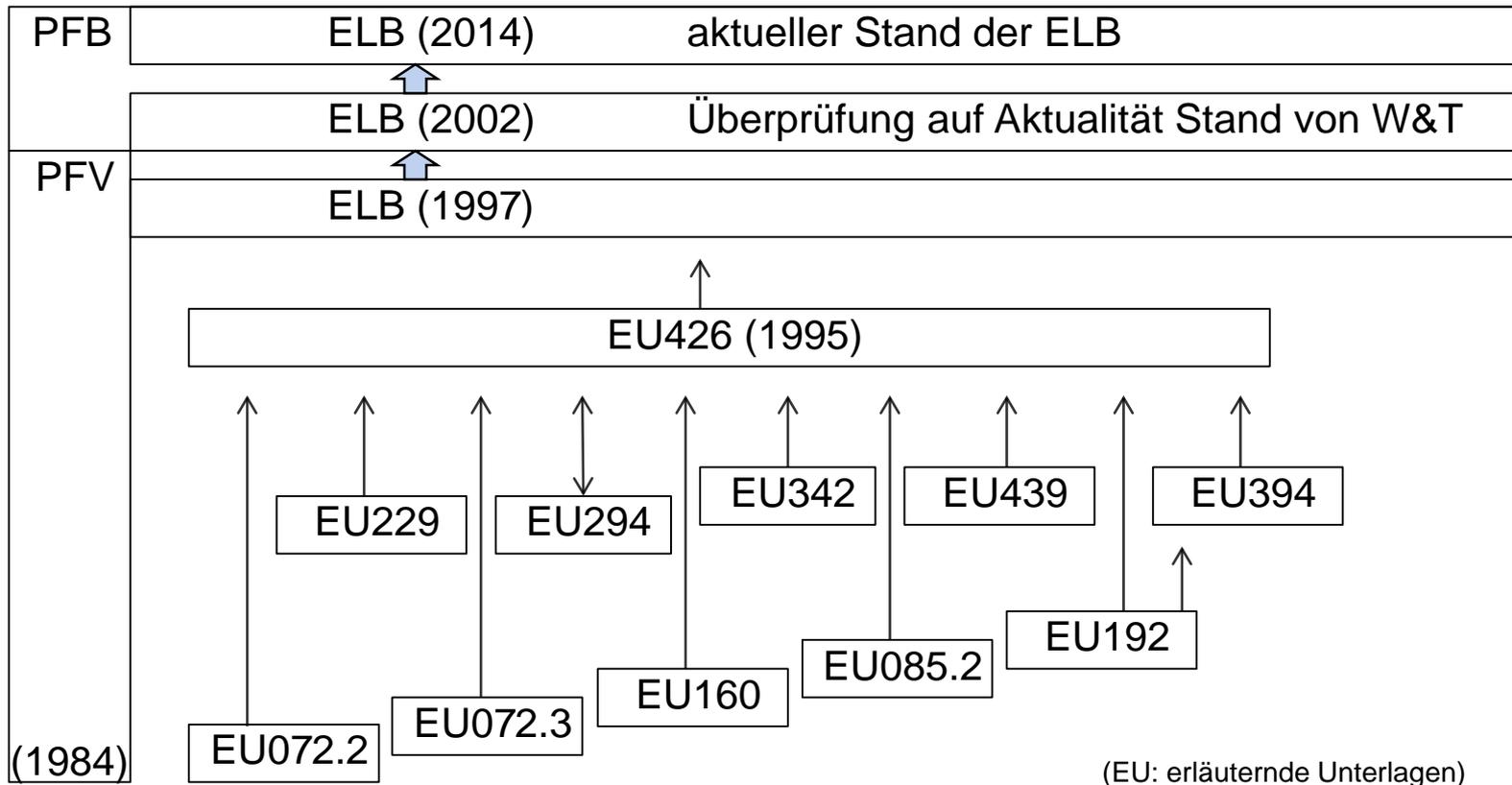
# ÜsiKo, Los 3 „Unterkritikalität in der Betriebsphase“

## Kriterien und Maßstäbe der Überprüfung der Sicherheitsanalysen II

- übergeordnete Bewertungsmaßstäbe I bis III (Projektvorgabe) :
  - I. Auswirkungen auf die Belastbarkeit der vorhandenen Aussagen zur Sicherstellung der Unterkritikalität in der Betriebsphase
  - II. Notwendigkeit der Berücksichtigung zusätzlicher Erkenntnisse und Informationen hinsichtlich Sicherheitsrelevanz
  - III. Möglicher Sicherheitsgewinn bzw. -verlust bei Anwendung des heutigen Standes von W&T
    - „Messgröße“ für Sicherheitsgewinn/-verlust: Sicherheitsfaktor = Abstand zwischen der zulässigen Massenkonzentration bzw. Aktivität eines Spalt nuklids (Anforderungen aus den ELB) und seiner kleinsten kritischen Masse (unter konservativen Annahmen bzgl. Verteilung, Moderationsverhältnis, Moderator material, Reflexionsbedingungen, Löslichkeit)

# ÜsiKo, Los 3 „Unterkritikalität in der Betriebsphase“

## Historie der Sicherheitsanalysen (EU)



# ÜsiKo, Los 3 „Unterkritikalität in der Betriebsphase“

## Stand von W&T des PFB hinsichtlich Kritikalitätssicherheit I

1. Gesetzliche Vorgaben: AtG (§4, §7, §9 a, b) (besondere spaltbare Stoffe: U-233, U-235, Pu-239, Pu-241); StrlSchV (1997) §6, §31, §74
2. Normative Grundlagen: DIN 25403-1 (12/1991), DIN 25474 (7/1996), Sicherheitsanforderungen für Kernbrennstoffversorgungsanlagen des BMI/BMU, (9/1996), ISO-Normen 1709 (11/1995) und 7753 (8/1987), GRS-Handbuch zur Kritikalität (1995), ARH-600 Handbuch (1971), ANSI/ANS-8.15 (1981)
3. Grundanforderungen / zulässige Konzentrationen (restriktivster Wert maßgebend):
  - Für durch thermische Neutronen spaltbare Stoffe : 50 g/0,1 m<sup>3</sup>
  - Massenbegrenzung pro Gebinde für U-233, U-235, Pu-239, Pu-241 und höhere spaltbare Actinoide, Summenkriterium für gemischte Einlagerung (U-233, U-235, Pu-239, Pu-241)
  - Spaltstoff-Fixierung in nicht-brennbarer Matrix ( $m_{\text{Spaltstoff}} > 1$  g/Gebinde)
  - Homogenisierungsnachweis oberhalb von 1/20 der kleinsten kritischen Masse

## Stand von W&T des PFB hinsichtlich Kritikalitätssicherheit II

4. Berechnungsverfahren zur Kritikalitätsbestimmung:
  - Referenzgeometrie für kleinste kritische Masse eines Spaltstoffes: Kugelanordnung, optimal moderiert, reflektiert mit reinem Wasser oder Beton
  - Bestimmung von  $k_{\text{eff}}$  (Maß für die Kritikalität einer Anordnung) mit Spektralrechnungen und dem Monte-Carlo (MC) Programm Keno mit 27-Gruppen-Wirkungsquerschnitten (WQ)
  - Reaktivitätsmindernde Wirkung von U-238 in Natururan, abgereichertem Uran und U-235/U-238-Gemisch (mit  $\leq 5$  Mass.-% U-235)

# ÜsiKo, Los 3 „Unterkritikalität in der Betriebsphase“

## Aktueller Stand von W&T / Abweichungen I

### 1. Gesetzliche Vorgaben:

- AtG: es werden mehr Spaltstoffe betrachtet (früher: Pu-239, Pu-241, U-233, U-235; aktuell: alle spaltbaren Stoffe, die eine Kettenreaktion erhalten können)
- StrSchV (Stand 27.1.2017): keine inhaltlichen Abweichungen bzgl. Kritikalität

### 2. Normative Grundlagen:

- Aktualisierte DIN- und ISO-Normen liegen vor (keine inhaltlichen Abweichungen)
- Aktualisierte ANSI/ANS-8.15 liegt vor:
  - Erweiterung der Liste zu betrachtender Spaltstoffe (U-232, U-234, Pu-236, Pu-240, Pu-242, Cm-242, Cm-246)
  - Änderung in den Angaben zu kleinsten kritischen Massen  $m_{krit}$ , insbesondere kleinere  $m_{krit}$  bei Am-242m, Cm-243, Cm-245, Cm-247
  - Angabe einer max. Konzentration für Spaltstofflösungen für Am-242m und Cf-251 ( $<50\text{g}/0,1\text{m}^3$ )

# ÜsiKo, Los 3 „Unterkritikalität in der Betriebsphase“

## Aktueller Stand von W&T / Abweichungen II

3. Grundanforderungen / zulässige Konzentrationen:
  - Keine Berücksichtigung homogenisierter Abfälle
  - Hohes Maß an Kritikalitätssicherheit durch die in den ELB vorgegebenen Konzentrationswerte (entsprechen geringen  $k_{\text{eff}}$ -Werten  $\leq 0,71$ , vgl. sichere Unterkritikalität in der Kerntechnik bei  $k_{\text{eff}} < 0,95$ )
  - Kritikalitätszustand von Spaltstoffgemischen ist inzwischen direkt berechenbar (Alternative zum Summenkriterium)
4. Berechnungsverfahren zur Kritikalitätsbestimmung:
  - Spaltstoff-Moderator-Gemische mit Resonanzabsorber in heterogener Anordnung berechenbar (Ergänzung zu homogener Spaltstofflösung)
  - Kritikalitätsberechnung mit Gruppen-WQ auf Basis von WQ-Bibliotheken mit höherer Datendichte (Punktdaten) möglich

# ÜsiKo, Los 3 „Unterkritikalität in der Betriebsphase“

## Sicherheitstechnische Bewertung der Abweichungen – Kriterien I

### 1. Gesetzliche Vorgaben:

- Keine sicherheitstechnisch relevanten Auswirkungen (ELB (Stand 2014) berücksichtigen schon höhere spaltbare Actinoide)

### 2. Normative Grundlagen:

- ANSI/ANS-8.15: Die zusätzlichen Nuklide U-232, U-234, Pu-236, Pu-240, Pu-242, Cm-242 und Cm-246 werden in den ELB schon mit Aktivitätsbegrenzungen erfasst,
  - Nachweis erforderlich, dass die bestehenden Aktivitätsbegrenzungen die restriktivsten Konzentrationswerte darstellen -> dann keine sicherheitstechnisch relevanten Auswirkungen
- Änderungen der kleinsten kritischen Massen  $m_{krit}$  wirken sich vermindern/erhöhend auf den Sicherheitsfaktor aus (PFB: 1/50 von  $m_{krit}$ )
- Keine sicherheitstechnisch relevanten Auswirkungen aus den Konzentrationsvorgaben für Spaltstofflösungen (Am-242m, Cf-251), da diese nicht die restriktivsten Werte darstellen (restriktivster Wert: Massenkonzentration pro Abfallgebinde)

## Sicherheitstechnische Bewertung der Abweichungen – Kriterien II

### 3. Grundanforderungen / zulässige Konzentrationen:

- Eine prozessbedingt eintretende Homogenisierung des Abfallprodukts wirkt sich sicherheitstechnisch positiv aus (Verminderung des Kritikalitätszustandes).
- $K_{\text{eff}}$  - Werte im Bereich von  $0,71 \leq k_{\text{eff}} < 0,95$  würden sich auf den Sicherheitsfaktor auswirken, bewirken aber keine qualitative Änderung des Sicherheitsniveaus „sicher unterkritisch“.
- Eine direkte Kritikalitätsberechnung von Spaltstoffgemischen (statt Anwendung des Summenkriteriums) erhöht die kleinsten kritischen Massen für dieses Gemisch (Erhöhung des Sicherheitsfaktors).

### 4. Berechnungsverfahren zur Kritikalitätsbestimmung:

- Eine heterogene Spaltstoff-Verteilung kann zu kleineren kritischen Massen führen als homogene Spaltstofflösungen (Reduzierung des Sicherheitsfaktors), dieser Effekt ist jedoch klein gegenüber den weiteren, angenommenen Spaltstoffbedingungen (optimales Wasservolumen, unbegrenzte Löslichkeit, Kugelform, reflektiert).

# ÜsiKo, Los 3 „Unterkritikalität in der Betriebsphase“

## Sicherheitstechnische Bewertung der Abweichungen – Maßstäbe

- I. Auswirkungen auf die Belastbarkeit vorhandener Aussagen:
  - Keine
- II. Notwendigkeit zur Berücksichtigung zusätzlicher Erkenntnisse:
  - Bewertung höherer spaltbarer Actinoide gemäß ANSI/ANS-8.15 (2014), Nachweis, dass die restriktivsten Werte in den ELB weiterhin gültig sind
  - Bewertung der aktualisierten kleinsten kritischen Massen gemäß ANSI/ANS-8.15 (2014) hinsichtlich Sicherheitsfaktor
- III. Sicherheitsgewinn oder -verlust:
  - Sicherheitsverlust, wenn ergänzende Betrachtungen bei höheren spaltbaren Actinoiden die aktuell restriktivsten zulässigen Werte unterschreiten
  - Sicherheitsgewinn oder -verlust durch Aktualisierung der kleinsten kritischen Massen für Spaltstoffe
  - ggf. Sicherheitsverlust für heterogene Spaltstoff-Verteilung (Auswirkung gering gegenüber der Kritikalitätswirkung der weiteren Annahmen zum Spaltstoffgemisch)

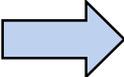
# ÜsiKo, Los 3 „Unterkritikalität in der Betriebsphase“

## Bewertung von Unsicherheiten

- Unsicherheiten bei Bestimmung kleinster kritischer Massen in moderierten Systemen
  - Bestimmung von kritischen Massen bestimmter Spaltstoffe (Np-237, Pu-238, Pu-242, Am-241 und Cm-244): Reaktivitätskoeffizient-Messung statt kritischer Experimente
  - Spaltstoffanordnung und -zusammensetzung: abgedeckt durch konservative Annahmen in den Kritikalitätsberechnungen der Sicherheitsanalysen (Ausnahme: heterogene Anordnungen)
  - Statistische Unsicherheiten bei der Bestimmung von  $k_{\text{eff}}$ -Werten: abgedeckt durch die Wahl eines sehr niedrigen  $k_{\text{eff}}$ -Wertes
  - nukleare Datenbasis: Reduzierung von Unsicherheiten durch Verwendung aktueller Datenbibliotheken
- Unsicherheiten in der Spaltstoffverteilung (Moderations- und Reflektionszustand): abgedeckt durch Berücksichtigung der reaktivsten Spaltstoffanordnung und Berücksichtigung der Kritikalitätssicherheit in der Nachbetriebsphase (Wasserzutritt)
- Unsicherheiten hinsichtlich der homogenen Verteilung des U-238 Anteils: abgedeckt mit der Anwendung des Summenkriteriums

# ÜsiKo, Los 3 „Unterkritikalität in der Betriebsphase“

## Fazit hinsichtlich des Überprüfungsbedarfs (Phase 1)

- Hinsichtlich der Sicherstellung der Unterkritikalität wurden 13 Abweichungen zwischen dem aktuellen Stand von W&T und dem Stand von W&T des PFB festgestellt
  - 4 Abweichungen wirken sich auf den Sicherheitsfaktor aus und weisen damit eine sicherheitstechnische Relevanz auf:
    - 3 Abweichungen können zu einer Verminderung des Sicherheitsfaktors führen und weisen damit einen Überprüfungsbedarf in Phase II der ÜsiKo auf:
      - Erweiterung der Spaltstoffliste gemäß ANSI/AN-8.15
      - Änderung bei den kleinsten kritischen Massen gemäß ANSI/AN-8.15 (ggf. auch Erhöhung des Sicherheitsfaktors)
      - Bewertung heterogener Spaltstoffanordnungen
    - eine Abweichung kann zu einer Erhöhung des Sicherheitsfaktors führen:
      - Direkte Berechnung von Stoffgemischen (statt Summenkriterium) möglich
-  **Sicher unterkritischer Systemzustand durch vielfältige konservative Annahmen ist gewährleistet, Ergänzungsbedarf zu einzelnen Kritikalitätsnachweisen bzgl. aktuellem Stand von W&T**

**Vielen Dank  
für Ihre Aufmerksamkeit**