

DIN 25472**DIN**

ICS 27.120.30

**Kritikalitätssicherheit bei der Endlagerung ausgedienter
Kernbrennstoffe**

Criticality safety for final disposal of nuclear fuels to be discarded

La sûreté criticité du stockage définitif des combustibles nucléaires être usés

Gesamtumfang 104 Seiten

Normenausschuss Materialprüfung (NMP) im DIN

Inhalt

	Seite
Vorwort	3
Einleitung.....	4
1 Anwendungsbereich	8
2 Normative Verweisungen	8
3 Begriffe und Symbole.....	9
3.1 Begriffe der Kritikalitätssicherheit der Endlagerung ausgedienter Kernbrennstoffe	9
3.2 Begriffe aus Geologie, Geophysik, Chemie und Geochemie, Hydrologie und Geohydrologie sowie Klimatologie.....	16
3.3 Symbole	18
4 Kritikalitätssicherheit	23
4.1 Grundsätze	23
4.2 Auslegungsannahmen und Festlegungen	32
4.3 Parameter und Randbedingungen der Kritikalitätsanalyse eines Endlagers	41
5 Kontrollen der Beladung und der Aufstellung der Lagereinheiten	44
5.1 Allgemeine Anforderungen.....	44
5.2 Feststellung des Abbrandes.....	45
6 Dokumentation.....	45
Anhang A (informativ) Erläuterungen zur „Integralen Kritikalitätssicherheitsauslegung“ (Erläuterungen zu 4.1.2)	46
A.1 Allgemeines	46
A.2 Erläuterungen zur Herleitung der Integralen Kritikalitätssicherheitsauslegung aus der Deterministischen Kritikalitätssicherheitsauslegung.....	46
A.3 Erläuterungen zu den Grundlagen der Berechnung der Wahrscheinlichkeit des Eintretens von Kritikalität in Kernbrennstoffanordnungen.....	50
A.4 Kurze Beschreibung von Methoden zur Berechnung oder Abschätzung der Eintrittswahrscheinlichkeit eines Ereignisses oder Ereignisablaufs.....	59
Anhang B (informativ) Erläuterungen zur Anwendung der Integralen Kritikalitätssicherheitsauslegung auf die Nachbetriebsphase und zu den erforderlichen Betrachtungszeiträumen (Erläuterungen zu 4.1.3)	62
Anhang C (informativ) Darstellung dynamischer Regelkreise klimatischer, geologischer, hydrologischer und zivilisatorischer Einflussfaktoren, die für die Analyse nach 4.1.2.2 zu betrachtender Ereignisabläufe sowie für die Ausarbeitung nach 4.1.3 zu entwickelnder Szenarien von Interesse sein können (Erläuterungen zu 4.3 d) und e))	66
Anhang D (informativ) Erläuterungen in Anhang C gebrauchter Begriffe aus Geologie, Geophysik, Chemie und Geochemie, Hydrologie und Geohydrologie sowie Klimatologie	87
Literaturhinweise	102

Vorwort

Das vorliegende Dokument wurde vom Fachbereich 7 — Kerntechnik im NMP, Arbeitsausschuss NA 062-07-45 AA „Kritikalitätssicherheit“ erarbeitet und erstellt.

Es wird auf die Möglichkeit hingewiesen, dass einige Texte dieses Dokuments Patentrechte berühren können. Das DIN ist nicht dafür verantwortlich, einige oder alle diesbezüglichen Patentrechte zu identifizieren.

Einleitung

Dieses Dokument enthält Anforderungen, die die Einhaltung der Sicherheit gegen potentielle Kritikalität bei der Endlagerung ausgedienter Kernbrennstoffe sicherstellen:

- Für die Betriebsphase eines Endlagers für ausgediente Kernbrennstoffe stellen diese Anforderungen die Einhaltung der Kritikalitätssicherheit beim Umgang mit den ausgedienten Kernbrennstoffen sowie bei der Lagerung dieser Stoffe sicher.
- Für die Nachbetriebsphase eines Endlagers für ausgediente Kernbrennstoffe stellen diese Anforderungen sicher, dass die Eintrittswahrscheinlichkeit von Kritikalität und erforderlichenfalls die Folgen postulierter Kritikalitätsexkursionen hinreichend begrenzt werden.

Diese Anforderungen gelten

- unabhängig vom Standort eines Endlagers für ausgediente Kernbrennstoffe und
- unabhängig vom Endlagerwirtsgestein.

Entsprechend den gestellten Anforderungen wird die Einhaltung der Kritikalitätssicherheit in der Betriebsphase eines Endlagers durch die Einhaltung von Sicherheitsprinzipien in der Kritikalitätssicherheitsauslegung der Anlagen, Einrichtungen und Komponenten gewährleistet, die dem Umgang mit den ausgedienten Kernbrennstoffen sowie der Lagerung dieser Stoffe dienen. Die Einhaltung der Sicherheitsprinzipien wird durch Anwendung von Sicherheitsmaßnahmen gewährleistet, deren Einhaltung durch ein Sicherheitsmanagement, das Kontrollen und Prüfungen der für die Kritikalitätssicherheit relevanten Parameter vorsieht, sichergestellt wird.

Das grundlegende Sicherheitsprinzip ist durch das sogenannte „Einzelfallkriterium“ definiert. Dieses Kriterium fordert, dass bei Eintreten eines einzelnen, im bestimmungsgemäßen Betrieb einer Anlage, Einrichtung oder Komponente, die den oben genannten Zwecken dient, nicht zu erwartenden Ereignisablaufs die Kritikalitätssicherheit gewährleistet bleiben muss. Bei einer Abweichung von diesem Kriterium sind, nach DIN 25403-1:2007-06, 5.1.1, die Eintrittswahrscheinlichkeit von Kritikalität und die Folgen eines entsprechend postulierten Kritikalitätsereignisses zu berücksichtigen. In dem hier vorliegenden Dokument ist festgelegt, dass eine Abweichung vom Einzelfallkriterium vorliegt, wenn die Eintrittswahrscheinlichkeit von Kritikalität größer als 10^{-6} ist. Erläuterungen zu dieser Festlegung sind in Anhang A gegeben.

Die Definition des Einzelfallkriteriums bezieht sich nur auf den Betrieb von Anlagen, Einrichtungen und Komponenten, die dem Umgang mit Kernbrennstoffen außerhalb der Spaltzone von Kernreaktoren dienen. Mit dem endgültigen Verschluss eines Endlagers endet dessen Betriebsphase. Damit endet auch das Sicherheitsmanagement, so dass die Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit von Sicherheitsmaßnahmen nicht mehr gewährleistet werden können. Ein in der Nachbetriebsphase hypothetisch möglicher Ereignisablauf, d. h. eine auf wissenschaftlich fundierten Annahmen beruhende Sequenz von Ereignissen, deren möglicher Eintritt auf der Basis des vorhandenen Wissens nicht widerlegbar ist, kann nicht mehr mit Begriffen wie „bestimmungsgemäßer Betrieb“ oder „Störfall“ in Zusammenhang gebracht, sondern nur noch als „Szenario“ definiert werden. Das Einzelfallkriterium ist somit auf die Nachbetriebsphase eines Endlagers nicht anwendbar.

Um bei der Kritikalitätssicherheitsauslegung eines Endlagers hinsichtlich der Sicherheitsprinzipien einen konsistenten Übergang von der Betriebsphase in die Nachbetriebsphase zu gewährleisten, wird im vorliegenden Dokument die Nichtanwendbarkeit des Einzelfallkriteriums auf die Nachbetriebsphase einer Nichtanwendung dieses Kriteriums auf die Betriebsphase in folgender Hinsicht gleichgestellt: Für die in der Nachbetriebsphase hypothetisch möglichen Ereignisabläufe sind jeweils die Eintrittswahrscheinlichkeit und erforderlichenfalls die Auswirkung von Kritikalität zu ermitteln.

Beim Nachweis, dass in der Nachbetriebsphase eines Endlagers für ausgediente Kernbrennstoffe die Eintrittswahrscheinlichkeit von Kritikalität und erforderlichenfalls die Folgen einer postulierten Kritikalität hinreichend begrenzt sind, interessieren nur solche Szenarien, die zu einer Reaktivitätserhöhung der eingelagerten ausgedienten Kernbrennstoffe führen. In dem vorliegenden Dokument wird dementsprechend gefordert, solche Szenarien unter Berücksichtigung der natürlichen Randbedingungen eines Endlagers und ihrer möglichen zeitlichen Änderungen sowie unter Berücksichtigung der Auslegung der technischen Barrieren und deren möglicher Degradation zu entwickeln und zu untersuchen. In dem vorliegenden Dokument werden keine zu untersuchenden Szenarien festgelegt. Eine solche Festlegung ist schon deshalb nicht möglich, da die im Dokument festgelegten Anforderungen unabhängig vom Endlagerstandort und den dort gegebenen natürlichen Randbedingungen gelten müssen, weil sie Anforderungen an die Sicherheit gegen Kritikalität sind. Andererseits sind die Randbedingungen und Einflussfaktoren, die bei der Entwicklung von Szenarien für einen einmal gewählten Endlagerstandort für den Nachweis, dass das an diesem Standort errichtete Endlager die Anforderungen dieses Dokuments erfüllt, von Bedeutung sein werden, natürlich zu benennen. Daher sind in Anhang C entsprechende klimatische, geologische und zivilisatorische Randbedingungen und Einflussfaktoren in Form von Regelkreisen aufgeführt, um ihre wechselseitigen Abhängigkeiten und dynamischen Beeinflussungen darzustellen.

Dabei sind sehr langzeitliche Entwicklungen dieser Randbedingungen und Einflussfaktoren berücksichtigt, da die zum Nachweis, dass ein Endlager den Anforderungen dieses Dokuments genügt, zu betrachtenden Untersuchungszeiträume durch die Menge und die nuklearen Zerfallseigenschaften der in den einzulagernden ausgedienten Kernbrennstoffen enthaltenen Radionuklide entscheidend mitbestimmt werden. Die für neutronisch voneinander isolierte Kernbrennstoffeinheiten zu betrachtenden Untersuchungszeiträume sind je nach den in diesen Einheiten vorhandenen Nuklidinventaren individuell bestimmt. Der Endpunkt des für ein gegebenes Nuklidinventar erforderlichen Untersuchungszeitraums ist dann erreicht, wenn das Nuklidinventar sich so verändert hat, dass unter den in Rechnung zu stellenden Entwicklungen die Eintrittswahrscheinlichkeit von Kritikalität nicht größer als ein bestimmter Wert ist, der sich aus folgenden Maßnahmen zur Minimierung des Gesamtrisikos aller mit einem Endlager in dessen Betriebs- und Nachbetriebsphase verbundenen Vorgänge und möglichen oder nicht ausschließbaren Ereignisabläufe ergibt:

Da eine durch ein Szenario S beschriebene Situation per definitionem als hypothetisch möglich gesetzt ist, diese Situation sich daher nach ihren kritikalitätsrelevanten Merkmalen parametrisieren lässt, wird die Bestimmung der Wahrscheinlichkeit, dass Kritikalität unter der Bedingung eintritt, dass das Szenario S vorliegt, im Allgemeinen problemlos möglich sein. Ungleich schwieriger wird die Abschätzung der Eintrittswahrscheinlichkeit des Szenarios S sein; und sie wird um so schwieriger sein, je größer die Zeitspanne zwischen dem endgültigen Verschluss des Endlagers und dem Eintreten des Szenarios S ist. Ab einer von S abhängigen Zeitspanne wird es nicht mehr möglich sein, die Eintrittswahrscheinlichkeit von S sinnvoll abzuschätzen. Ist diese Wahrscheinlichkeit nicht mehr sinnvoll abschätzbar, so ist sie, wie auch sonst in der Kritikalitätssicherheitsauslegung üblich, auf den Wert 1 zu setzen. Um nicht die Zunahme der Unsicherheit der Abschätzung der Eintrittswahrscheinlichkeit von S mit zunehmender Zeit nach dem endgültigen Verschluss eines Endlagers und die schließliche Wahl des Wertes 1 für diese Wahrscheinlichkeit durch eine Erhöhung von Risiken, die mit Umladevorgängen, Handhabungs- und Aufbereitungsprozessen sowie Transporten zur Vorbereitung und Durchführung der Einlagerung in ein Endlager während der Betriebsphase verbunden sind, kompensieren zu müssen, enthält vorliegendes Dokument folgende Festlegungen:

- Es wird ein kontinuierlicher Anstieg der Eintrittswahrscheinlichkeit von Kritikalität nach einer im vorliegenden Dokument definierten, in Anhang B näher begründeten Relation von 10^{-6} zum Zeitpunkt des endgültigen Verschlusses eines Endlagers auf 10^{-4} zu dem Zeitpunkt zugelassen, zu dem für die Eintrittswahrscheinlichkeit von S der Wert 1 zu setzen ist.
- Dementsprechend wird für Zeiten nach dem Zeitpunkt, ab dem für die Eintrittswahrscheinlichkeit von S der Wert 1 zu wählen ist, ein Kritikalitätsereignis unter dem Szenario S als „unwahrscheinliches Ereignis“ klassifiziert, wenn die Eintrittswahrscheinlichkeit von Kritikalität nicht größer als 10^{-4} ist.
- Für Zeiten zwischen dem endgültigen Verschluss des Endlagers und dem Zeitpunkt, ab dem für die Eintrittswahrscheinlichkeit von S der Wert 1 zu wählen ist, darf das Endlager unter dem Szenario S nicht die sich für die Eintrittswahrscheinlichkeit von Kritikalität nach der oben erwähnten Relation ergebende Grenze überschreiten.

Die in Anhang C aufgeführten klimatischen und geologischen sowie zivilisatorischen Einflussfaktoren und Randbedingungen enthalten Elemente, die zur Entwicklung der relevanten Szenarien für den Nachweis, dass für einen einmal gewählten Endlagerstandort den in diesem Dokument an die Nachbetriebsphase gestellten Anforderungen genügt wird, erforderlich sind. Die Entwicklung der relevanten Szenarien für diesen Nachweis erfordert die konzertierte Zusammenarbeit vieler Fachdisziplinen, z. B. die Kooperation zwischen Kern- und Neutronenphysikern, Klimatologen, Geologen, Geophysikern, Geochemikern und Materialwissenschaftlern. Solch eine konzertierte Kooperation ist auch erforderlich, um der Tatsache zu genügen, dass die hinsichtlich Kritikalität relevanten Szenarien nicht deckungsgleich sein müssen mit Szenarien, die hinsichtlich anderer Aspekte, z. B. radiologischer Aspekte von Interesse sind. Dies ist schon deshalb offensichtlich, weil die Nuklidsätze, die für die Kritikalität von Interesse sind, verschieden von den Nuklidsätzen sind, die hinsichtlich anderer Aspekte zu berücksichtigen sind.

Zudem erfordert die Ausführung von Kritikalitätsberechnungen im Allgemeinen erheblich höhere Detaillierungsgrade bei der Abbildung der zu untersuchenden Kernbrennstoffkonfigurationen in Rechenmodellen, als es bei Untersuchungen sonstiger sicherheitstechnischer Aspekte eines Endlagers üblich ist. Die Durchführung einer Kritikalitätsanalyse einer durch ein Szenario beschriebenen Situation erfordert es, den Zustand und die räumliche Anordnung der an dieser Situation beteiligten Materialien detailliert in einem Rechenmodell zu beschreiben, d. h. diese Situation als fest gegebene Konfiguration darzustellen. Diese Situation ist damit als gegeben gesetzt. Die Frage, ob sie möglich ist, ist somit in der Kritikalitätsanalyse allein eine Frage nach ihrer Eintrittswahrscheinlichkeit, und die Frage, wie unsicher das Eintreten dieser Situation ist, ist daher eine Frage der Unsicherheit der Quantifizierung der Eintrittswahrscheinlichkeit dieser Situation. Diese Fragen können im Allgemeinen nicht von der Kritikalitätsanalyse beantwortet werden. Ihre Beantwortung erfordert die oben angesprochene konzertierte Zusammenarbeit vieler Fachdisziplinen.

Zusammenfassend ergeben sich folgende Feststellungen und Schlussfolgerungen:

- Dieses Dokument enthält Anforderungen, deren Einhaltung die Sicherheit gegen potentielle Kritikalität bei der Endlagerung ausgedienter Kernbrennstoffe gewährleistet.
- Diese Anforderungen gelten unabhängig vom Standort eines Endlagers für ausgediente Kernbrennstoffe und unabhängig vom Endlagerwirtsgestein.
- In dem vorliegenden Dokument werden daher keine zu untersuchenden Szenarien festgelegt.
- Für die bei der Kritikalitätssicherheitsauslegung eines Endlagers zu erfüllenden Sicherheitskriterien wird ein konsistenter Übergang von der Betriebsphase in die Nachbetriebsphase des Lagers gewährleistet.
- Ein für die Nachbetriebsphase eines Endlagers erforderlicher Untersuchungszeitraum zum Nachweis der Sicherheit gegen potentielle Kritikalität kann nicht für das gesamte Lager a priori festgelegt werden. Der Zeitraum, in der eine Kernbrennstoffeinheit potentiell kritisch werden kann, wird entscheidend durch die Menge und die nuklearen Zerfalleigenschaften der in dieser Einheit eingelagerten Kernbrennstoffe mitbestimmt. Verschiedene Kernbrennstoffeinheiten erfordern daher im Allgemeinen verschiedene Untersuchungszeiträume.
- Die Eintrittswahrscheinlichkeit von Kritikalität in einer Kernbrennstoffeinheit und damit die Größe des für diese Einheit erforderlichen nachbetrieblichen Untersuchungszeitraums lassen sich z. B. durch Reduzierung der in dieser Einheit eingelagerten Masse an ausgedienten Kernbrennstoffen sowie durch Änderungen der isotopischen Zusammensetzungen dieser Stoffe vermindern.
- Die Reduzierung der Eintrittswahrscheinlichkeit und damit des Risikos hypothetisch möglicher Kritikalität in einem Endlager in dessen Nachbetriebsphase auf Kosten einer Erhöhung tatsächlicher Risiken vor oder während der Betriebsphase — also Risiken, die etwa mit einer Reduzierung der pro Kernbrennstoffeinheit eingelagerten Masse an ausgedienten Kernbrennstoffen oder einer Änderung der isotopischen Zusammensetzungen dieser Stoffe verbunden sind - ist jedoch zu vermeiden.
- Die bei der Kritikalitätssicherheitsauslegung der Nachbetriebsphase eines Endlagers zu erfüllenden Sicherheitskriterien sind so formuliert, dass sie der Vermeidung einer Erhöhung tatsächlicher Risiken vor und während der Betriebsphase des Lagers dienlich sind.

- Zu diesem Zweck kann es, abhängig von den eingelagerten Kernbrennstoffen und den für die Nachbetriebsphase zu untersuchenden Szenarien, erforderlich sein, den Eintritt einer Kritikalitätsexkursion zu postulieren. Ein dann nach den in diesem Dokument aufgeführten Anforderungen erforderlicher Nachweis, dass die Folgen der postulierten Kritikalitätsexkursion hinreichend begrenzt sind, stellt einen wesentlichen Beitrag zum Nachweis dar, dass die mit der Errichtung, der Betriebsphase und der Nachbetriebsphase des Endlagers verbundenen Risiken so ausbalanciert sind, dass das Gesamtrisiko dem Minimierungsgebot genügt.
- Es bleibt aber festzuhalten, dass Kritikalität auch in der Nachbetriebsphase eines Endlagers ein unerwünschtes Ereignis ist. Dies bedeutet aber nicht, dass Kritikalität unter allen Szenarien absolut ausgeschlossen werden kann. Für die Betriebsphase wird schließlich ebenfalls kein absoluter Ausschluss von Kritikalität gefordert: Wie weiter oben ausgeführt, sind bei einer Abweichung vom Einzelfallkriterium die Eintrittswahrscheinlichkeit von Kritikalität und die Folgen eines entsprechend postulierten Kritikalitätsereignisses zu berücksichtigen. Die Anforderungen an die Nachbetriebsphase bezüglich der Gewährleistung der Kritikalitätssicherheit können schon deshalb nicht strenger sein als die Anforderungen an die Betriebsphase, weil mit dem endgültigen Verschluss des Endlagers das Sicherheitsmanagement endet. Ob nun das Auftreten von Kritikalität in der Nachbetriebsphase postuliert wird oder nicht, zu gewährleisten ist der sichere Einschluss der eingelagerten Stoffe.

1 Anwendungsbereich

Dieses Dokument legt Anforderungen fest, die die Einhaltung der Sicherheit gegen potentielle Kritikalität bei der Endlagerung ausgedienter Kernbrennstoffe sicherstellen.

Dieses Dokument gilt im Bereich der Endlagerung ausgedienter Kernbrennstoffe für die Betriebs- und Nachbetriebsphase eines Endlagers und ist anzuwenden auf sämtliche im Endlager eingelagerten ausgedienten Kernbrennstoffe jeglicher Zusammensetzung, Verpackung und Konfiguration.

Dieses Dokument ist außerdem anzuwenden auf die in der Betriebsphase erforderlichen Tätigkeiten und Vorgänge zur Handhabung oder Überprüfung der Behälter oder Gebinde mit den ausgedienten Kernbrennstoffen.

ANMERKUNG Bei den ausgedienten Kernbrennstoffen kann es sich handeln um Brennstoffe für oder aus Leichtwasserreaktoren (LWR), Schnellen Brutreaktoren (SBR), Hochtemperaturreaktoren (HTR), Thorium-Hochtemperaturreaktoren (THTR), Forschungs- und Materialtestreaktoren (FR bzw. MTR) sowie sonstigen Reaktoren oder kritischen Anordnungen. Der ausgediente Kernbrennstoff kann in Form von Brennstäben, Brennstoffplatten, Brennelementen aus Brennstäben, Brennstoffplatten oder -partikeln oder in sonstiger Form und Zusammensetzung vorliegen. Der ausgediente Kernbrennstoff kann außerdem in radioaktiven Abfällen oder Strahlenquellen jeglicher Form und Zusammensetzung enthalten sein.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden zitierten Dokumente sind für die Anwendung dieses Dokuments erforderlich. Bei datierten Verweisungen gilt nur die in Bezug genommene Ausgabe. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments (einschließlich aller Änderungen).

DIN 4047-3, *Landwirtschaftlicher Wasserbau — Begriffe — Teil 3: Bodenkunde, Bodensystematik und Bodenuntersuchung*

DIN 4049-1, *Hydrologie — Grundbegriffe*

DIN 5491, *Stoffübertragung — Diffusion und Stoffübergang, Grundbegriffe, Größen, Formelzeichen, Kenngrößen*

DIN 6814-2, *Begriffe in der radiologischen Technik — Teil 2: Strahlungsphysik*

DIN 13301, *Spezielle Funktionen der mathematischen Physik — Zeichen und Begriffe*

DIN 13303-2, *Stochastik — Mathematische Statistik — Begriffe und Zeichen*

DIN 25401 (alle Teile), *Begriffe der Kerntechnik*

DIN 25403-1, *Kritikalitätssicherheit bei der Verarbeitung und Handhabung von Kernbrennstoffen — Teil 1: Grundsätze*

DIN 25471, *Kritikalitätssicherheit unter Anrechnung des Brennelementabbrands bei der Lagerung und Handhabung von Brennelementen in Brennelementlagerbecken von Kernkraftwerken mit Leichtwasserreaktoren*

DIN 25474, *Maßnahmen administrativer Art zur Einhaltung der Kritikalitätssicherheit in kerntechnischen Anlagen, ausgenommen Kernreaktoren*

DIN 25478, *Einsatz von Berechnungssystemen beim Nachweis der Kritikalitätssicherheit*

DIN 25712, *Kritikalitätssicherheit unter Anrechnung des Brennstoffabbrands bei Transport und Lagerung bestrahlter Leichtwasserreaktor-Brennelemente in Behältern*

DIN 54400, *Ionenaustausch — Begriffe*

DIN 55350-21, *Begriffe der Qualitätssicherung und Statistik — Begriffe der Statistik — Zufallsgrößen und Wahrscheinlichkeitsverteilungen*

DIN 55350-23, *Begriffe der Qualitätssicherung und Statistik — Begriffe der Statistik — Beschreibende Statistik*

DIN 55350-24, *Begriffe der Qualitätssicherung und Statistik — Begriffe der Statistik — Schließende Statistik*

KTA 3101.2:1987-12, *Auslegung der Reaktorkerne von Druck- und Siedewasserreaktoren — Teil 2: Neutronenphysikalische Anforderungen an Auslegung und Betrieb des Reaktorkerns und der angrenzenden Systeme*

KTA 1401, *Allgemeine Forderungen an die Qualitätssicherung*

KTA 3602, *Lagerung und Handhabung von Brennelementen und zugehörigen Einrichtungen in Kernkraftwerken mit Leichtwasserreaktoren*

AtG, *Gesetz über die friedliche Verwendung der Kernenergie und den Schutz gegen ihre Gefahren (Atomgesetz) in der Fassung der Bekanntmachung vom 15. Juli 1985 (BGBl. I S. 1565), zuletzt geändert durch Artikel 1 des Gesetzes vom 31. Juli 2011 (BGBl. I S. 1704)*

3 Begriffe und Symbole

3.1 Begriffe der Kritikalitätssicherheit der Endlagerung ausgedienter Kernbrennstoffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die Begriffe nach DIN 6814-2, DIN 13301, DIN 13303-2, den Normen der Reihe DIN 25401, DIN 25403-1, DIN 25471, DIN 25474, DIN 25478, DIN 25712, DIN 55350-21, DIN 55350-23, DIN 55350-24, KTA 3101.2:1987-12, KTA 3602 sowie die im AtG angegebenen und die folgenden Begriffe.

3.1.1

abdeckende Abschätzung

durch Benutzung eines abdeckenden Modells erhaltene Abschätzung einer einem System, Zustand oder Ereignisablauf zugeordneten Kennzahl

3.1.2

abdeckendes Modell

zur Beschreibung eines Systems, Zustands oder Ereignisablaufs benutztes Modell, das aus physikalischen Gründen nicht zu einer Überschätzung des Abstandes führen kann, den eine diesem System, Zustand bzw. Ereignisablauf zugeordnete Kennzahl in ihrem erlaubten Wertebereich von ihrem höchstzulässigen oder, je nach Fall, von ihrem mindestens erforderlichen Wert tatsächlich besitzt

BEISPIEL 1 Ein zur Berechnung des Neutronenmultiplikationsfaktors k_{eff} einer Kernbrennstoffanordnung benutztes Modell dieser Anordnung ist abdeckend, wenn es aus physikalischen Gründen nicht zu einer Unterschätzung des k_{eff} -Wertes und somit nicht zu einer Überschätzung des Abstandes dieses k_{eff} -Wertes von seinem administrativ höchstzulässigen Wert führen kann. Ein abdeckendes Modell ist beispielsweise erforderlich, wenn die Beladung von Lagerpositionen einer Lagereinheit für bestrahlte DWR-Urandioxid-Brennelemente nicht nach einem spezifischen Beladungsmuster erfolgen soll, das nach 4.2.1.2 a) 3) die individuellen Abbrände der Brennelemente berücksichtigt, sondern wenn jede Lagerposition gleichberechtigt sein soll, d. h. jedes beliebige Brennelement des interessierenden Typs aufnehmen darf, sofern dieses Brennelement mindestens einen durch eine Beladungskurve nach 4.2.1.2 a) 1) spezifizierten Mindestabbrand besitzt (siehe auch Anmerkung zu 3.1.20).

BEISPIEL 2 Wird bei der Kritikalitätssicherheitsauslegung einer Lagereinheit bestrahlten Kernbrennstoffs der Abbrand des Kernbrennstoffs nach 4.2.1.2 a) angerechnet und werden dabei die Spaltprodukte nicht berücksichtigt, so stellt diese Vorgehensweise zunächst ein konservatives Modell dar (siehe 3.1.20). Sie führt zu einer bewusst gewollten Überschätzung des tatsächlichen k_{eff} -Wertes und somit zu einer bewusst gewollten Unterschätzung des Abstandes des k_{eff} -Wertes von seinem administrativ höchstzulässigen Wert. Ist jedoch zu irgendeinem Zeitpunkt nach 4.3 g) 1) mit einer Trennung der Spaltprodukte von den Actinoiden zu rechnen, so ist das ursprünglich konservative Modell ab diesem Zeitpunkt nur noch abdeckend.

BEISPIEL 3 Werden bei der Kritikalitätssicherheitsauslegung einer Lagereinheit ausgedienter Kernbrennstoffe alle Unsicherheiten und Toleranzen der Zusammensetzung der Kernbrennstoffe und der sonstigen Materialien sowie der geometrischen Abmessungen und Abstände der Anordnung der Kernbrennstoffeinheiten in der Lagereinheit so berücksichtigt, dass sich unter sonst gleichen Randbedingungen der maximal mögliche k_{eff} -Wert ergibt, so stellt diese Vorgehensweise ein abdeckendes Modell dar.

3.1.3

ausgedienter Kernbrennstoff

Kernbrennstoff, der nicht mehr zur Kernspaltung genutzt oder einer sonstigen Verwendung zugeführt werden soll

ANMERKUNG Siehe auch Anmerkung zu Abschnitt 1.

3.1.4

Barriere

<Endlagerung> System zur Rückhaltung von ausgedienten Kernbrennstoffen, radioaktiven Abfällen oder Strahlenquellen

3.1.5

bedingte Wahrscheinlichkeit

Wahrscheinlichkeit eines bedingten Ereignisses

Wahrscheinlichkeit $P(A|B)$ eines Ereignisses A unter der Bedingung, dass das Ereignis B eingetreten ist

ANMERKUNG $P(A|B)$ heißt bedingte Wahrscheinlichkeit von A unter B oder auch Wahrscheinlichkeit des bedingten Ereignisses A|B und drückt die Änderung der Wahrscheinlichkeit des Ereignisses A durch das Eintreten des Ereignisses B aus. Es gilt:

$$P(A \cap B) = P(A|B) \cdot P(B) = P(B|A) \cdot P(A) \quad (1)$$

mit den unbedingten Wahrscheinlichkeiten $P(A)$ und $P(B)$ der Ereignisse A und B.

Verallgemeinert auf n Ereignisse A_i , $i = 1, \dots, n$, gilt:

$$P\left(\bigcap_{i=1}^n A_i\right) = P(A_1) \cdot P(A_2|A_1) \cdot P(A_3|A_2 \cap A_1) \cdot \dots \cdot P(A_n|A_1 \cap A_2 \cap \dots \cap A_{n-1}) = \prod_{i=1}^n P\left(A_i \mid \bigcap_{j=1}^{i-1} A_j\right) \quad (2)$$

3.1.6

Betriebsphase

<Kritikalitätssicherheitsauslegung eines Endlagers> Zeitraum vom Beginn der Einlagerung der ausgedienten Kernbrennstoffe, radioaktiven Abfälle und Strahlenquellen bis zum endgültigen Verschluss des Endlagers

ANMERKUNG 1 Die Betriebsphase schließt eine eventuelle Beobachtungsphase nach der Einlagerung der ausgedienten Kernbrennstoffe bis zum endgültigen Verschluss des Endlagers ein.

ANMERKUNG 2 In der Praxis kann die Errichtung von Einlagerungsstrecken parallel zur Beladung bereits errichteter Einlagerungsstrecken und zur eventuellen Beobachtung bereits beladener Einlagerungsstrecken sowie zum Verschluss bereits beladener Einlagerungsstrecken erfolgen.

3.1.7

Brennelement

<Endlagerung> in allen ihren Komponenten geometrisch fixierte Einheit, in der ausgedienter Kernbrennstoff eines gegebenen Typs so angeordnet ist, wie es für den Einsatz in einem Reaktorkern eines gegebenen Typs erforderlich gewesen wäre oder erforderlich war

ANMERKUNG Bei den Brennstoff enthaltenden Komponenten eines Brennelements handelt es sich je nach Brennelementtyp um Brennstäbe (wie bei LWR- oder SBR-Brennelementen), ebene oder gebogene Brennstoffplatten (wie bei FR- oder MTR-Brennelementen) oder Brennstoffpartikel (wie bei HTR- oder THTR-Brennelementen).

3.1.8

Doppelereignisprinzip der Kritikalitätssicherheitsauslegung

Doppelereignisprinzip

Bezeichnung der Forderung, dass mindestens zwei voneinander unabhängige, gleichzeitig wirkende und im bestimmungsgemäßen Betrieb nicht zu erwartende Ereignisse oder Ereignisabläufe eintreten müssen, bevor Kritikalität erreicht werden kann

ANMERKUNG In der Praxis der Kritikalitätssicherheitsauslegung wird dieses Prinzip meistens als „Doppelstörfallprinzip“ bezeichnet, obgleich dieses Prinzip dort nicht nur auf Störfälle angewendet wird, sondern auch auf Einzelfehler (was z. B. zu redundanter oder diversifizierter Auslegung von Systemteilen einer Sicherheitseinrichtung führen kann, die der Gewährleistung der Kritikalitätssicherheit im bestimmungsgemäßen Betrieb oder in Störfällen dient). Die Bezeichnung dieses Prinzips als „Doppelereignisprinzip“ beschreibt seine Anwendung in der Praxis der Kritikalitätssicherheitsauslegung zutreffender als die Bezeichnung „Doppelstörfallprinzip“ und stimmt überdies mit dem in angelsächsischen Regelwerken und Sicherheitsleitfäden gebrauchten Begriff des „double contingency principle“ überein. In der Tat wird in angelsächsischen Regelwerken und Sicherheitsleitfäden beim Gebrauch des Begriffs „double contingency principle“ entweder kein Bezug genommen auf „Störfälle“ (so heißt es z. B. in [1], § 474, „The double contingency approach requires that unintended criticality cannot occur unless at least two unlikely, independent concurrent changes in the conditions originally specified as essential to criticality safety have occurred.“), oder es werden gleichberechtigt die Begriffe „incident“ (Vorkommnis) und „accident“ (Störfall) benutzt (so heißt es z. B. in [2]: „..., by virtue of the double-contingency principle, two unlikely independent and concurrent incidents or postulated accidents are beyond the scope of the required analysis.“). Zur Anwendung des „double contingency principle“ in der Kritikalitätssicherheitsauslegung in den USA siehe auch [3].

3.1.9

Einzelfehler

Fehler, der bei der Auslegung einer Sicherheitsmaßnahme für den Anforderungsfall unabhängig von dem die Anforderung auslösenden Ereignis als zufällig eintretendes Ereignis einschließlich resultierender Folgefehler zusätzlich unterstellt wird, der also nicht als Folge des Anforderungsfalls im bestimmungsgemäßen Betrieb oder bei Störfällen zu erwarten ist

ANMERKUNG Ein solcher Fehler liegt z. B. vor, wenn ein Systemteil (z. B. ein elektronisches Bauteil) einer Sicherheitseinrichtung seine Funktion aufgrund stochastischen Versagens nicht erfüllt.

3.1.10

Einzelfallkriterium der Kritikalitätssicherheitsauslegung

Einzelfallkriterium

Forderung, dass bei Eintreten eines einzelnen im bestimmungsgemäßen Betrieb nicht zu erwartenden Ereignisses oder Ereignisablaufs die Kritikalitätssicherheit gewährleistet bleibt

ANMERKUNG 1 In der Kritikalitätssicherheitsauslegung wird das Einzelfallkriterium auf Einzelfehler und auf Störfälle angewendet.

ANMERKUNG 2 Zur Erfüllung des Einzelfallkriteriums wird häufig das Doppelereignisprinzip angewendet.

3.1.11

endgültiger Verschluss eines Endlagers

Überführung des gesamten Endlagers in einen Zustand, in dem der Zugriff auf die eingelagerten Stoffe nicht mehr vorgesehen ist

3.1.12

Endlager

Anlage zur endgültigen Lagerung (Endlagerung) ausgedienter Kernbrennstoffe, radioaktiver Abfälle oder von Strahlenquellen

3.1.13

Exkursion

Kritikalitätsexkursion

durch unerwartete, unbeabsichtigte, unkontrollierte oder unkontrollierbare Reaktivitätszufuhr verursachtes Erreichen des kritischen oder eines überkritischen Zustandes in einem Spaltstoffsysteem, so dass es infolge des dadurch bewirkten Leistungsanstiegs zu einer Freisetzung von Energie (kinetische Energie der primären Spaltfragmente) und zur Emission energiereicher Neutronen- und Gammastrahlung kommt

3.1.14

Fernfeld

Umfeld eines Endlagers außerhalb der Nahfelder des Endlagers

3.1.15

Gleichzeitigkeit zweier voneinander unabhängiger, im bestimmungsgemäßen Betrieb nicht zu erwartender Ereignisse oder Ereignisabläufe

Gleichzeitigkeit

zwei voneinander unabhängige, im bestimmungsgemäßen Betrieb nicht zu erwartende Ereignisse oder Ereignisabläufe wirken gleichzeitig, wenn der Zeitpunkt des Eintritts des nachfolgenden Ereignisses oder Ereignisablaufs in die Zeitspanne $[\tau_E, \tau_B] = [\tau_E, \tau_D] \cap [\tau_D, \tau_B]$ fällt

ANMERKUNG 1 $[\tau_E, \tau_D]$ ist die Zeitspanne vom Eintritt des ersten Ereignisses bzw. Ereignisablaufs zum Zeitpunkt τ_E bis zu dessen Detektierung zum Zeitpunkt τ_D und $[\tau_D, \tau_B]$ ist die Zeitspanne vom Zeitpunkt der Detektierung bis zum Zeitpunkt τ_B , an dem die kritikalitätssicherheitsrelevanten Folgen des ersten Ereignisses oder Ereignisablaufes beseitigt sind.

ANMERKUNG 2 Die Zeitspannen $[\tau_E, \tau_D]$ und $[\tau_D, \tau_B]$ unterliegen üblicherweise dem Minimierungsgebot.

3.1.16

hypothetisch möglich

auf wissenschaftlich fundierten Annahmen beruhende Folgerungen, Vorhersagen oder Konsequenzen, deren Gültigkeit bzw. deren Eintritt auf der Basis des vorhandenen Wissens nicht widerlegt werden kann

3.1.17

inhärent sicheres Kernbrennstoffsystem

Kernbrennstoffsystem, dessen isotopische Zusammensetzung so beschaffen ist, dass das System in unendlicher Ausdehnung unter allen Moderationsbedingungen sowie in endlicher Ausdehnung unter allen Moderations- und anzunehmenden Reflexionsbedingungen stets unterkritisch ist oder dessen Masse bei gegebener isotopischer Zusammensetzung auf die für dieses System stets sichere Masse beschränkt ist, derart, dass der Neutronenmultiplikationsfaktor des Systems unter keinen Bedingungen größer als 0,98 werden kann

ANMERKUNG 1 Welcher Sicherheitsfaktor bei der Ableitung der stets sicheren Masse aus der kleinsten kritischen Masse des Systems angewendet wird, hängt davon ab, ob eine versehentliche Massenverdopplung während der Betriebsphase des Endlagers unterstellt werden muss.

ANMERKUNG 2 Führen mögliche Szenarien in der Nachbetriebsphase eines Endlagers zu einer Trennung von Elementen, wie z. B. von Uran und Plutonium, so kann die kleinste kritische Masse kleiner werden.

3.1.18**Kernbrennstoffeinheit**

geometrisch abgeschlossene oder für sich vollständige Einheit aus Kernbrennstoff

ANMERKUNG Beispiele für Kernbrennstoffeinheiten:

- Kernbrennstoffpulver in einem Behälter stellt eine geometrisch abgeschlossene Kernbrennstoffeinheit dar;
- ein Brennelement nach 3.1.7 stellt eine für sich vollständige Kernbrennstoffeinheit dar;
- eine beliebige Anzahl von HTR- oder THTR-Brennelementen in einem Behälter stellt eine geometrisch abgeschlossene Kernbrennstoffeinheit aus für sich vollständigen Kernbrennstoffeinheiten dar.

3.1.19**konservative Abschätzung**

durch bewusste Benutzung eines konservativen Modells erhaltene Abschätzung einer einem System, Zustand oder Ereignisablauf zugeordneten Kennzahl

3.1.20**konservatives Modell**

zur Beschreibung eines Systems, Zustands oder Ereignisablaufs benutztes Modell, das aus physikalischen Gründen zu einer Unterschätzung des Abstandes führt, den eine diesem System, Zustand bzw. Ereignisablauf zugeordnete Kennzahl in ihrem erlaubten Wertebereich von ihrem höchstzulässigen oder, je nach Fall, von ihrem mindestens erforderlichen Wert tatsächlich besitzt

ANMERKUNG Konservatives Modell und abdeckendes Modell unterscheiden sich durch ihre Modellannahmen. Die Annahme unbestrahlten Kernbrennstoffs ohne jeglichen Gehalt an Neutronengiften in einer Kritikalitätsanalyse eines Lagerbehälters für abgebrannte Brennelemente definiert beispielsweise ein konservatives Modell. Solche konservativen Modelle werden auf Grund ihrer Simplizität bevorzugt gewählt. Sie werden aber auch gewählt, wenn es an zugänglichen Daten sowie Berechnungsmodellen und -systemen mangelt, die eine Quantifizierung und Validierung der Unsicherheiten ermöglichen, die mit der Reduzierung der Konservativität eines Modells verbunden sein können. Aber selbst wenn man einmal über ein Berechnungssystem verfügte, dass den wahren Wert des Neutronenmultiplikationsfaktors exakt berechnete, so dass man kein konservatives Modell mehr benötigte, so bliebe doch im Allgemeinen die Notwendigkeit bestehen, ein abdeckendes Modell zu benutzen. Wird beispielsweise der eben erwähnte Lagerbehälter für abgebrannte Brennelemente nach 4.2.1.2 ausgelegt, so erfordert die Bestimmung der Beladungskurve ein abdeckendes Modell für die Berechnung des abbrandabhängigen Nuklidinventars, da die Beladungskurve diejenige Leistungsgeschichte abdecken muss, die jeweils für gegebenen Abbrand zur höchsten Reaktivität der für den Lagerbehälter vorgesehenen Brennelemente nach deren Betriebszeit führt.

3.1.21**Lagereinheit**

durch eine gemeinsame Barriere (z. B. einen Behälter) eingeschlossene Anordnung von ausgedienten Kernbrennstoffen, radioaktiven Abfällen oder Strahlenquellen

3.1.22**Lagerposition**

Ort für die Lagerung einer Kernbrennstoffeinheit in einer Lagereinheit

3.1.23**Maximierungsgebot**

Gebot, den Wert einer Größe so groß zu wählen, wie es unter angemessenem Aufwand möglich oder machbar ist

3.1.24**Minimierungsgebot**

Gebot, den Wert einer Größe so klein zu wählen, wie es unter angemessenem Aufwand möglich oder machbar ist

3.1.25

Nachbetriebsphase des Endlagers

Nachbetriebsphase

Zeit nach dem endgültigen Verschluss des Endlagers

ANMERKUNG Da mit dem endgültigen Verschluss des Endlagers dessen Betriebsphase endet, können in der Nachbetriebsphase hypothetisch mögliche Ereignisse oder Ereignisabläufe nicht mehr mit den Begriffen „bestimmungsgemäßer Betrieb“, „Einzelfehler“ und „Störfall“ beschrieben werden, sondern nur noch als Szenarien (siehe 3.1.31).

3.1.26

Nahfeld

Volumen des durch eine Barriere (wie z. B. durch eine Einlagerungsstrecke oder ein Bohrloch inklusive Versiegelung oder Verschluss) umschlossenen Umfelds einer oder mehrerer Lagereinheiten ohne das Volumen dieser Lagereinheiten

3.1.27

natürliche Barriere

durch die natürlichen Randbedingungen des Standortes des Endlagers gegebene Barriere

ANMERKUNG Zu diesen Randbedingungen zählen die geologischen, geomechanischen, geochemischen und geohydrologischen Bedingungen (siehe dazu auch Anhang C).

3.1.28

Prognose

durch einen hohen Validitätsgrad charakterisierte Vorhersage einer zukünftigen Entwicklung

ANMERKUNG Im Unterschied zur Falsifizierbarkeit/Verifizierbarkeit einer Vorhersage wird unter Validität ein Gütekriterium für die Belastbarkeit einer Vorhersage verstanden. Bezüglich einer Prognose zur Endlagerung geht es im Allgemeinen um die Validität von Aussagen über Kausalzusammenhänge. Solche Aussagen sind zumeist Schlussfolgerungen aus empirischen Daten. Die Beurteilung des Validitätsgrades solcher Aussagen beinhaltet daher die Beurteilung des Zustandekommens, der Gültigkeit und gegebenenfalls auch der Übertragbarkeit der Schlussfolgerungen.

3.1.29

signifikant

Bezeichnung eines Ergebnisses, bei dem es unwahrscheinlich ist, dass es durch Zufall zustande gekommen ist

3.1.30

Störfall

<Endlager> Ereignisablauf, der eine Abweichung vom bestimmungsgemäßen Betrieb eines Endlagers in dessen Betriebsphase darstellt, für die das Endlager in seiner Betriebsphase auszulegen (ausgelegt) ist oder für die vorsorglich Schutzvorkehrungen vorzusehen (vorgesehen) sind, und durch dessen Eintreten jede mit dem Betrieb verbundene Tätigkeit in dem von diesem Ereignisablauf betroffenen Bereich des Endlagers unterbrochen werden muss oder aus sicherheitstechnischen Gründen nicht fortgeführt werden kann

ANMERKUNG Bei einem Störfall kann es sich z. B. handeln um

- ein Vorkommnis oder einen Zwischenfall wie z. B. einen Absturz eines Behälters beim innerbetrieblichen Transport, eine Positionierung einer Lagereinheit an einem für diese Lagereinheit unzulässigen Ort, ein Versagen einer Barriere infolge eines Brands von Betriebsmitteln, oder um
- einen Ausfall einer Sicherheitsmaßnahme, der nicht durch den bei der Auslegung der Maßnahme unterstellten Einzelfehler verursacht ist.

3.1.31**Szenario**

<Nachbetriebsphase eines Endlagers> Beschreibung einer hypothetisch in der Zukunft möglichen Situation oder eines hypothetisch möglichen, in sich konsistenten Ablaufs von zukünftigen Ereignissen, der zu dieser Situation führen kann

ANMERKUNG 1 Ein Szenario zu einem betrachteten System ist keine Prognose über dieses System. Die Gesamtheit alternativer Szenarien zu einem System bildet den Zukunftsraum für dieses System. Szenarien sind holistisch, d. h. beziehen die Wechselwirkungen mit dem Umfeld des betrachteten Systems ein.

ANMERKUNG 2 Siehe auch Anmerkung zu 3.1.25.

3.1.32**technische Barriere**

technisches System, das als Barriere dient

ANMERKUNG Technische Barrieren umfassen:

- Behälter, Matrizen (Bindemittel, z. B. Glas), Hüllrohre von Brennstäben, einhüllende Beschichtungen von Brennstoffplatten, Umhüllungen und Ummantelungen von Brennstoffpartikeln;
- technische Einrichtungen des Endlagers, wie z. B. Einlagerungsstrecken und Bohrlöcher inklusive ihrer Versiegelungen oder Verschlüsse;
- durch technische Maßnahmen bewirkter Einschluss von Lagereinheiten (z. B. Versatz von Einlagerungsstrecken und Bohrlöchern);
- technische Maßnahmen zum Schutz von Barrieren (z. B. Schutzschilde gegen Steinschlag und Tropfwasser über Lagereinheiten).

3.1.33**Unabhängigkeit von Ereignissen oder Ereignisabläufen****Unabhängigkeit**

zwei Ereignisse A und B heißen voneinander unabhängig, wenn gilt:

- 1) Die Wahrscheinlichkeit $P(A \cap B)$ des Eintretens beider Ereignisse ist durch das Produkt der unbedingten Wahrscheinlichkeit $P(A)$ des Eintretens von A und der unbedingten Wahrscheinlichkeit des Eintretens von B gegeben:

$$P(A \cap B) = P(A) \cdot P(B) \quad (3)$$

- 2) Für die bedingten Wahrscheinlichkeiten $P(A|B)$ und $P(B|A)$ gilt:

$$P(A|B) = P(A|\bar{B}) \text{ und } P(B|A) = P(B|\bar{A}) \quad (4)$$

wobei $\bar{B}$ und $\bar{A}$ die Ereignisse sind, die aus allen Ereignissen bestehen, die nicht zu B bzw. nicht zu A gehören (kurz: $\bar{B}$ = „nicht B“; $\bar{A}$ = „nicht A“).

- 3) Die bedingten Wahrscheinlichkeiten $P(A|B)$ und $P(B|A)$ sind gleich ihrer jeweiligen unbedingten Wahrscheinlichkeit $P(A)$ bzw. $P(B)$:

$$P(A|B) = P(A) \text{ und } P(B|A) = P(B) \quad (5)$$

Verallgemeinert auf n wechselseitig voneinander unabhängige Ereignisse $A_i, i = 1, \dots, n$: Gleichung (2) wird

$$P\left(\bigcap_{i=1}^n A_i\right) = \prod_{i=1}^n P(A_i) \quad (6)$$

mit den unbedingten Wahrscheinlichkeiten $P(A_i)$ der Ereignisse $A_i, i = 1, \dots, n$.

ANMERKUNG 1) bis 3) sind gleichwertig. Sie besagen, dass es für das Eintreten des Ereignisses A irrelevant ist, ob das Ereignis B eingetreten ist oder nicht. Auf zwei Sicherheitsmaßnahmen oder Kontrollen M_1 und M_2 angewendet: Für die Verfügbarkeit oder Durchführung von M_1 ist es irrelevant, ob M_2 verfügbar ist oder nicht bzw. ob M_2 durchgeführt wurde oder nicht. Und ebenso gilt umgekehrt: Für die Verfügbarkeit oder Durchführung von M_2 ist es irrelevant, ob M_1 verfügbar ist oder nicht bzw. ob M_1 durchgeführt wurde oder nicht. Die Durchführung von M_2 bedarf nicht der Durchführung oder Nichtdurchführung von M_1 als Voraussetzung und die Durchführung von M_1 bedarf nicht der Durchführung oder Nichtdurchführung von M_2 als Voraussetzung.

3.1.34

Unabhängigkeit von kontinuierlichen Zufallsvariablen

Unabhängigkeit

die kontinuierlichen Zufallsvariablen $\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_n$ sind wechselseitig voneinander unabhängig, wenn ihre gemeinsame Wahrscheinlichkeitsdichte $p(\vec{\eta} | \theta)$ wie folgt faktorisiert ist:

$$p(\vec{\eta} | \theta) = \prod_{i=1}^n p_i(\eta_i | \theta_i) \quad (7)$$

mit $\vec{\eta} = (\eta_1, \dots, \eta_n)^T$.

ANMERKUNG Siehe 3.3, Tabelle 1.

3.2 Begriffe aus Geologie, Geophysik, Chemie und Geochemie, Hydrologie und Geohydrologie sowie Klimatologie

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die Begriffe nach DIN 4047-3, DIN 4049-1, DIN 5491, DIN 54400 und die folgenden Begriffe.

ANMERKUNG Begriffe aus Geologie, Geophysik, Chemie und Geochemie, Hydrologie und Geohydrologie sowie Klimatologie, die im informativen Anhang C gebraucht werden, sind in Anhang D erklärt.

3.2.1

Advektion

Transport eines im Wasser gelösten oder kolloidal vorliegenden Stoffes mit der Strömung des Wassers bei konstanter Konzentration, d. h. mit der mittleren Geschwindigkeit und der mittleren Richtung des Wassers

ANMERKUNG Die Advektion partikulärer Stoffe, wie z. B. Kolloide und Mikroorganismen, wird häufig „partikuläre Advektion“ genannt.

3.2.2

Aktivierungsenergie

<Chemie, Geochemie> Energiebarriere, die von dem Reaktionskomplex zusammentreffender Reaktionspartner überwunden werden muss, damit eine Reaktion ablaufen kann

3.2.3**anaerob**

keinen elementaren, molekularen Sauerstoff (O₂) benötigend

ANMERKUNG Lebewesen, die für ihren Stoffwechsel nicht auf Sauerstoff angewiesen sind oder sogar durch ihn gehemmt oder abgetötet werden, werden entsprechend als Anaerobier oder anaerob bezeichnet.

3.2.4**Dispersion**

Ausgleich von Konzentrationsgradienten aufgrund heterogener Verteilung der Strömungsgeschwindigkeiten des Transportmediums Wasser

ANMERKUNG 1 In Porenräumen eines Grundwasserleiters (Grundwasserkörpers) treten aufgrund z. B. der Viskosität des Wassers und der Reibung an den Porenwänden unterschiedliche Strömungsgeschwindigkeiten auf. Das Auftreten unterschiedlicher Strömungsgeschwindigkeiten wird durch die Tortuosität der Porenräume beeinflusst.

ANMERKUNG 2 Da Diffusion und Dispersion zusammen auftreten und nicht trennbar sind, wird die Summe beider Prozesse meist hydrodynamische Dispersion genannt.

3.2.5**Permeabilität**

<Geowissenschaften> Durchlässigkeit von Böden oder Gestein für Flüssigkeiten oder Gase

3.2.6**Phase**

<physikalische Chemie> räumlicher Bereich, in dem die bestimmenden physiko-chemikalischen Parameter konstant und einheitlich sind

3.2.7**Poren**

Hohlräume in Lockergesteinen und Böden

3.2.8**Porenvolumen**

Gesamtheit des in einem Gestein oder Boden vorhandenen Porenraumes, der mit einem Inhaltsstoff (z. B. Gas, Wasser) ausgefüllt ist

3.2.9**Porosität**

Verhältnis des Porenvolumens eines Gesteins oder Bodens zu dessen Gesamtvolumen

3.2.10**Radiolyse**

Zerlegung einer chemischen Bindung unter Einwirkung ionisierender Strahlung

3.2.11**Tortuosität**

Grad der Gewundenheit von Transportwegen in den Poren poröser Materialien

3.3 Symbole

Tabelle 1 — Symbole

Symbol	Bedeutung
A	Anwendungsfall
A	Ereignis oder Satz von Ereignissen
$\bar{A}$	Ereignisse, die aus allen Ereignissen bestehen, die nicht zu A gehören (kurz: $\bar{A}$ = „nicht A“)
$A_{\min}$	zur Gewährleistung der Kritikalitätssicherheit nach 4.2.1.2 c) 1), Gleichung (23) mindestens erforderlicher Abbrand eines ausgedienten bestrahlten Kernbrennstoffs
B	Ereignis oder Satz von Ereignissen
C_i	Spezifische Kernbrennstoffkonfiguration (spezifischer Anwendungsfall, spezifisches Szenario) mit der Nummer i aus einer Serie verschiedener durchnummerierter Kernbrennstoffkonfigurationen (Anwendungsfälle, Szenarien)
$\text{cov}(\vec{\eta})$	Kovarianzmatrix von $\vec{\eta}$
E	Ereignis oder Ereignisablauf
$E[\vec{\eta}]$	Vektor der Erwartungswerte von $\vec{\eta}$
E_n	Neutronenenergie, Neutroneneinfallsenergie
$F(k_{\text{eff}} E)$	Kumulative Wahrscheinlichkeitsverteilung von k_{eff} unter der Bedingung des Ereignisses oder Ereignisablaufs E
$f(\kappa)$	Wahrscheinlichkeitsdichte der Zufallsvariablen κ
$g(\vec{\xi})$	Wahrscheinlichkeitsdichte von $\vec{\xi}$, siehe A.3.2, Gleichung (A.10)
$H(t)$	Kumulierte Hazardrate
$h(t)$	Hazardrate $dH(t)/dt$
$h(\vec{x})$	Wahrscheinlichkeitsdichte von $\vec{x}$, siehe A.3.2, Gleichung (A.10)
$I(\vec{r}, t)$	Nuklidinventar eines ausgedienten Kernbrennstoffs und dessen räumliche Verteilung zum Zeitpunkt t
$I(\vec{r}, t = 0)$	Nuklidinventar eines ausgedienten Kernbrennstoffs am Ende seiner Bestrahlung (seiner Betriebszeit) Ist der einzulagernde ausgediente Kernbrennstoff unbestrahlt oder wird er als unbestrahlt angenommen, so gilt $I(\vec{r}, t = 0) = I_a(\vec{r})$
$I_a(\vec{r})$	Anfangsinventar eines Kernbrennstoffs zu Beginn seiner Bestrahlung
k	$k \equiv k_{\text{eff}}$
k_{eff}	Effektiver Neutronenmultiplikationsfaktor einer Kernbrennstoffkonfiguration
$k_{O\gamma}$	Zum Wahrscheinlichkeitsgehalt $(1-\gamma)$ korrespondierende obere Konfidenz- oder Kreditabilitätsintervallgrenze, siehe [4]

Tabelle 1 (fortgesetzt)

Symbol	Bedeutung
$k(\vec{x}, \vec{\xi}; \vec{z})$	Mit einem Berechnungssystem für eine Kernbrennstoffkonfiguration (einen Anwendungsfall) mit den explanatorischen Daten $\vec{z}$ für den Neutronenmultiplikationsfaktor k_{eff} in Abhängigkeit von den Parametern $\vec{x}$ und $\vec{\xi}$ erhaltenes Rechenergebnis
$k^{(s)}$	Monte-Carlo-Stichprobe auf $k(\vec{x}, \vec{\xi}; \vec{z})$ in folgenden Formen: $k^{(s)} = k(\vec{x}^{(s)}, \vec{\xi}; \vec{z})$, $k^{(s)} = k(\vec{x}, \vec{\xi}^{(s)}; \vec{z})$ oder $k^{(s)} = k(\vec{x}^{(s)}, \vec{\xi}^{(s)}; \vec{z})$
δk	Sicherheitsabstand zur Kritikalität (siehe 4.1.2.1 a) bis d))
Δk_B	Durch verwendete Näherungsverfahren und möglicherweise vorhandene numerische Schwächen des zur Berechnung des Neutronenmultiplikationsfaktors eingesetzten Berechnungssystems (siehe DIN 25478 Beiblatt 1) bedingte systematische Unsicherheit („Bias“) von $k(\vec{x}, \vec{\xi}; \vec{z})$ in Bezug auf den Anwendungsfall bei gegebenen nuklearen Daten $\vec{\xi}$ Δk_B wird durch Vergleich mit den k_{eff}-Resultaten der Nachrechnung von in Bezug auf die neutronenphysikalischen Eigenschaften und die explanatorischen Daten $\vec{z} = \vec{z}_A$ des Anwendungsfalls adäquat gewählten Benchmark-Experimenten ermittelt. Dabei werden alle Unsicherheiten in Δk_B berücksichtigt, die herrühren aus den Unsicherheiten aller Parameter $\vec{x} = \vec{x}_{\text{exp}}$, die die gewählten Benchmark-Experimente charakterisieren, sowie die Unsicherheiten Δk_R der für die Benchmark-Experimente erhaltenen k_{eff}-Resultate. Außerdem wird die Unsicherheit berücksichtigt, die mit der Inter- oder Extrapolation von den experimentellen Randbedingungen $\vec{z} = \vec{z}_{\text{exp}}$ auf die Randbedingungen $\vec{z} = \vec{z}_A$ des Anwendungsfalls verbunden ist, siehe DIN 25478 Beiblatt 1.
Δk_I	Unsicherheit von $k(\vec{x}, \vec{\xi}; \vec{z})$, die durch Varianzen der räumlichen Verteilung des zur Berechnung des Neutronenmultiplikationsfaktors benutzten Nuklidinventars $I(\vec{r}, t)$ bedingt wird
Δk_N	Unsicherheit von $k(\vec{x}, \vec{\xi}; \vec{z})$, die aus den Unsicherheiten oder Toleranzen des zur Berechnung des Neutronenmultiplikationsfaktors benutzten Nuklidinventars $I(\vec{r}, t)$ resultiert Bei bestrahlten Kernbrennstoffen sowie bei Verfolgung des radioaktiven Zerfalls von bestrahlten oder unbestrahlten Kernbrennstoffen rühren die Unsicherheiten im Nuklidinventar aus den mit der Berechnung dieses Inventars verbundenen Unsicherheiten her; Δk_N ergibt sich dann aus der Validierung des zur Berechnung des Nuklidinventars eingesetzten Berechnungssystems (siehe KTA 3101.2:1987-12, 6.3).
Δk_R	Statistische Unsicherheit oder numerischer Fehler von $k(\vec{x}, \vec{\xi}; \vec{z})$
Δk_S	Administrativ festgelegter Sicherheitsabstand zur Kritikalität bei Nichtfestlegung einer oberen Schranke für P_{krit} , siehe Ungleichung (A.1) in A.2.1
Δk_T	Unsicherheit von $k(\vec{x}, \vec{\xi}; \vec{z})$, die von Unsicherheiten, Varianzen, Toleranzen der Parameter $\vec{s}$ herrührt

Tabelle 1 (fortgesetzt)

Symbol	Bedeutung
Δk_U	Gesamte Unsicherheit von $k_{\text{eff}} = k(\vec{x})$, siehe Ungleichung (A.1) in A.2.1
$\Delta k(\vec{\xi})$	Unsicherheit von $k(\vec{x}, \vec{\xi}; \vec{z})$, die durch Varianzen und Kovarianzen der nuklearen Daten $\vec{\xi}$ bedingt wird
M	Masse
N_B	Anzahl der zur Bestimmung von Δk_B nachgerechneten Benchmark-Experimente
N_E	Anzahl voneinander unabhängiger, gleichzeitig wirkender und im bestimmungsgemäßen Betrieb nicht zu erwartender Ereignisse oder Ereignisabläufe
P, p	Wahrscheinlichkeit
$P(A)$	Wahrscheinlichkeit des Eintretens eines Ereignisses A
$P\left(\bigcap_{i=1}^n A_i\right)$	Wahrscheinlichkeit des Eintretens der Ereignisse A_1 und A_2 und A_3 und ... und A_n (siehe Gleichung (2))
$P(A B)$	Wahrscheinlichkeit des bedingten Ereignisses $A B$ (siehe 3.1.5)
$P(E), P_E$	Wahrscheinlichkeit für den Eintritt eines Ereignisses oder Ereignisablaufs E
$p(\vec{\eta} \boldsymbol{\theta})$	Wahrscheinlichkeitsdichte von $\vec{\eta}$ unter der Bedingung $\boldsymbol{\theta}$
P_G	Obere Schranke von P_{krit} , siehe 4.1.3 e) 2)
P_{krit}	Wahrscheinlichkeit von Kritikalität
$P(k > (1 - \delta k) E)$	Wahrscheinlichkeit, dass k unter der Bedingung, dass E vorliegt (eingetreten ist), größer als $(1 - \delta k)$ ist
$P\left(\bigcap_{i \in N_\mu}^n L_i \setminus \bigcup_{\lambda=1}^{\mu} L_{j_\lambda}\right)$	Wahrscheinlichkeit, dass ein Ereignis E nur in Lagereinheiten eingetreten ist, die nicht der Menge $N_\mu = \{j_1, \dots, j_\mu\}$ angehören, siehe A.3.3.2
$P(t; C_j)$	Eintrittswahrscheinlichkeit einer Kernbrennstoffkonfiguration (eines Szenarios) C_j als Funktion der Zeit $t \in [t_V, t_{Ej}]$
$P_{\text{krit}}(t; C_j)$	Wahrscheinlichkeit von Kritikalität als Funktion der Zeit $t \in [t_V, t_{Ej}]$ bei gegebener Kernbrennstoffkonfiguration (gegebenem Szenario) C_j unter Berücksichtigung der Eintrittswahrscheinlichkeit von C_j , siehe 4.1.3 e) 1), Gleichung (16)
$\vec{r}$	Ortsvektor; $\vec{r}$ ist im Allgemeinen von t abhängig
S	Szenario
$\vec{s}$	Vektor, der alle Komponenten des Parametersatzes $\vec{x}$ einer Kernbrennstoffkonfiguration (eines Anwendungsfalls) abzüglich der Nuklidinventare $I(\vec{r}, t)$ dieser Konfiguration (dieses Anwendungsfalls) enthält; $\vec{s}$ ist im Allgemeinen von t abhängig
T	Wird als hochgestellter Index benutzt, um die Transponierte eines Vektors oder einer Matrix zu kennzeichnen

Tabelle 1 (fortgesetzt)

Symbol	Bedeutung
t	Zeit nach Ende der Bestrahlung eines ausgedienten Kernbrennstoffs. Ist der ausgediente Kernbrennstoff unbestrahlt, oder wird er als unbestrahlt angenommen, so ist $t = 0$ der Zeitpunkt der Beendigung seiner Herstellung.
t_{BK}	Zeitpunkt t , der für die Erstellung einer Beladungskurve gewählt wird
t_{Ej}	Zeitpunkt nach dem endgültigen Verschluss des Endlagers, bis zu dem die Eintrittswahrscheinlichkeit einer Kernbrennstoffkonfiguration (eines Szenarios) C_j noch abgeschätzt werden kann
$[t_{j1}, t_{j2}]$	Zeitintervall, in dem eine Kernbrennstoffkonfiguration C_j nicht die Ungleichung (14) erfüllt, $[t_{j1}, t_{j2}] \subseteq [t_{m1}, t_{m2}]$, siehe 4.1.3 d) 2)
$[t_{m1}, t_{m2}]$	Zeitintervall nach dem endgültigen Verschluss des Endlagers, in dem eine bestimmte Kernbrennstoffkonfiguration C_m als reaktivste Konfiguration nachgewiesen ist
t_V	Zeitpunkt, zu dem der endgültige Verschluss des Endlagers erfolgt ist
v	Neutronengeschwindigkeit
W	Nach 4.1.3 e) 2), der für P_G maximal zulässige Wert
$\vec{x} = (x_1, \dots, x_n)^T$	Parametersatz mit Komponenten $x_j, j = 1, \dots, n$, welcher die räumliche Verteilung sämtlicher Materialien einer Kernbrennstoffkonfiguration (eines Anwendungsfalls) beschreibt. $\vec{x}$ ist im Allgemeinen von t abhängig.
X	Matrix empirischer Datensätze über Parametervektor $\vec{x}$
$\vec{x}^{(s)}$	siehe $\vec{\eta}^{(s)}$
$\vec{z} = (z_1, \dots, z_m)^T$	Satz explanatorischer Daten $z_j, j = 1, \dots, m$, einer Kernbrennstoffkonfiguration (eines Anwendungsfalls) siehe DIN 25478 Beiblatt 1
α	Wahrscheinlichkeit; $(1 - \alpha) = P(\pi_E \leq \gamma)$, siehe A.3.2
ε	Numerischer Fehler, der mit dem Einsatz von nicht-statistischen Berechnungssystemen zur Lösung der Neutronentransportgleichung verbunden ist (siehe DIN 25478)
φ_{Ej}	Größe, die dadurch definiert ist, dass für die in der Nachbetriebsphase zu analysierende Kernbrennstoffkonfiguration C_j die obere Schranke P_G für Kritikalität vom Wert bei $t = t_V$ (Gleichung (18)) auf den Wert bei $t = t_{Ej}$ (Gleichung (20)) nach Gleichung (17) als Funktion von t ansteigen darf, siehe 4.1.3 e) 2).
γ	Wahrscheinlichkeit, Wahrscheinlichkeitsgehalt
γ_E	$\gamma_E \equiv P(k > (1 - \delta k) E)$
$\gamma \left(\prod_{i \in N_\mu}^n j_i \right)$	Wahrscheinlichkeit für Kritikalität, wenn ein Ereignis E nur in Lagereinheiten eingetreten ist, die nicht der Menge $N_\mu = \{j_1, \dots, j_\mu\}$ angehören, siehe A.3.3.2
η	Parameter der Weibull-Verteilung

Tabelle 1 (fortgesetzt)

Symbol	Bedeutung
$\vec{\eta} = (\eta_1, \dots, \eta_n)^T$	n -dimensionaler Zufallsvektor mit den Komponenten $\eta_j, j = 1, \dots, n$. Z. B.: Der zu einem Anwendungsfall (einer Kernbrennstoffkonfiguration) korrespondierende Vektor $\vec{x}$ und der bei der Berechnung des k_{eff} -Werts dieses Anwendungsfalls involvierte Satz $\vec{\xi}$ nuklearer Daten sind im Allgemeinen Zufallsvektoren (siehe A.3.2)
$\vec{\eta}_i$	$\vec{\eta}$ für einen spezifizierten Anwendungsfall mit der Nummer i aus einer Serie verschiedener durchnummerierter Anwendungsfälle
$\vec{\eta}^{(s)}$	Monte Carlo Stichprobe auf $\vec{\eta}$, gezogen aus $p(\vec{\eta} \theta)$
κ	$\kappa = k + \Delta k_B$ oder $\kappa = (k + \varepsilon) + \Delta k_B$, siehe 4.2.2.4, Gleichung (25)
λ	Parameter der Weibull-Verteilung; Hazardrate für den als „Exponentialverteilung“ bekannten Spezialfall $\eta = 1$ der Weibull-Verteilung
π_E	Wahrscheinlichkeit von Kritikalität unter der Bedingung eines eingetretenen Ereignisses oder Ereignisablaufs E
θ	Parametersatz, der die Wahrscheinlichkeitsdichte $p(\vec{\eta} \theta)$ eines Zufallsvektors $\vec{\eta}$ charakterisiert (z. B.: Ist $p(\vec{\eta} \theta)$ eine mehrdimensionale Normalverteilung, so umfasst θ den Vektor der Erwartungswerte $E[\vec{\eta}]$ und die Kovarianzmatrix $\text{cov}(\vec{\eta})$ von $\vec{\eta}$)
$\hat{\theta}$	Schätzer von θ
τ_B	Zeitpunkt, an dem die Folgen eines im bestimmungsgemäßen Betrieb nicht zu erwartenden Ereignisses oder Ereignisablaufs beseitigt sind (siehe 3.1.15).
τ_D	Zeitpunkt der Detektierung eines im bestimmungsgemäßen Betrieb nicht zu erwartenden Ereignisses oder Ereignisablaufs (siehe 3.1.15).
τ_E	Zeitpunkt des Eintritts eines im bestimmungsgemäßen Betrieb nicht zu erwartenden Ereignisses oder Ereignisablaufs (siehe 3.1.15).
$\Omega = \Omega(\vec{x})$	Wertebereich von $\vec{x}$
Ω_{krit}	Teilmenge von $\Omega = \Omega(\vec{x})$ (d. h. $\Omega_{\text{krit}} \subseteq \Omega$), für die $k(\vec{x}, \vec{\xi}; \vec{z}) \geq (1 - \delta k)$ ist, wenn $\vec{x} \in \Omega_{\text{krit}}$
$\vec{\xi} = (\xi_1, \dots, \xi_\nu)^T$	Satz nuklearer Daten (Neutronenwirkungsquerschnitte, Spaltspektren, Anzahl pro Spaltung erzeugter Neutronen, usw.), die bei der Berechnung des k_{eff} -Werts einer Kernbrennstoffkonfiguration (eines Anwendungsfalls) involviert sind
$\vec{\xi}^{(s)}$	siehe $\vec{\eta}^{(s)}$
$\vec{\xi}_{\text{BD}}$	Nukleare Basisdaten (wie z. B. ENDF/B, JEFF, JENDL), siehe DIN 25478 Beiblatt 1
$\vec{\xi}_{\text{BD}}^{(s)}$	siehe $\vec{\eta}^{(s)}$
$\psi(\vec{x}, \vec{\xi})$	Gemeinsame Wahrscheinlichkeitsdichte von $\vec{x}$ und $\vec{\xi}$, siehe A.3.2, Gleichung (A.10)
$\in, \notin$	bedeutet „ist Element von“ bzw. „ist nicht Element von“

Tabelle 1 (fortgesetzt)

Symbol	Bedeutung
$\forall$	bedeutet „für alle“ (z. B.: $\forall t$ bedeutet „für alle t“)
$\subset$	bedeutet „ist echte Teilmenge von“
$\subseteq$	bedeutet „ist Teilmenge von“
$\sim$	bedeutet „folgt der Wahrscheinlichkeitsdichte“, z. B. $\vec{x} \sim h(\vec{x})$ bedeutet: „ $\vec{x}$ folgt der Dichte $h(\vec{x})$ “ (oder auch „ $\vec{x}$ ist $h(\vec{x})$ -verteilt“)
Ξ	Matrix empirisch basierter Basisdatensätze $(\vec{\xi}_{BD})_{j,j=1,2,\dots}$

4 Kritikalitätssicherheit

4.1 Grundsätze

4.1.1 Grundlegende Anforderungen

Unter den Annahmen und Festlegungen in 4.2 und 4.3 ist der Nachweis zu erbringen, dass für die Betriebsphase des Endlagers die Anforderungen nach 4.1.2 und für die Nachbetriebsphase des Endlagers die Anforderungen nach 4.1.3 erfüllt werden.

ANMERKUNG Erläuterungen zu den Anforderungen nach 4.1.2 und 4.1.3 sind in Anhang A bzw. Anhang B gegeben.

Beim Nachweis, dass den Anforderungen nach 4.1.2 bzw. 4.1.3 genügt wird, dürfen die Abbrände bestrahlter ausgedienter Kernbrennstoffe nach 4.2.1.2 angerechnet werden. Dabei ist zu beachten, dass das anfängliche Vorhandensein von Neutronengiften oder von zum Zweck der Konversion (z. B. in Brutonen) eingesetzten Brutstoffen in den ursprünglich unbestrahlten Kernbrennstoffeinheiten zu Reaktivitätserhöhungen der Kernbrennstoffeinheiten mit deren Abbrand geführt haben kann. Ebenso ist zu berücksichtigen, dass der radioaktive Zerfall von Nukliden mit negativen Reaktivitätsbeiträgen in bestrahlten Kernbrennstoffen wie auch in manchen unbestrahlten Kernbrennstoffen (z. B. MOX-Brennstoffen) zu einer Reaktivitätserhöhung der ausgedienten Kernbrennstoffe während der für die Endlagerung zu betrachtenden Zeiträume führen kann. Es ist zu beachten, dass die Größe der für die Endlagerung zu betrachtenden Zeiträume durch die Menge und die nuklearen Zerfallseigenschaften der in den einzulagernden ausgedienten Kernbrennstoffen enthaltenen Radionuklide entscheidend mitbestimmt wird.

Beim Nachweis, dass den Anforderungen nach 4.1.2 bzw. 4.1.3 genügt wird, sind

- alle Kenngrößen der ausgedienten Kernbrennstoffe und ihrer Anordnungen,
- alle Kenngrößen der Lagereinheiten und ihrer Einbauten und
- alle weiteren Einflussgrößen

anzugeben (siehe 4.3 a) bis c)), deren Einhaltung zur Erfüllung der Anforderungen nach 4.1.2 bzw. 4.1.3 sicherzustellen ist.

4.1.2 Betriebsphase

4.1.2.1 Kritikalitätssicherheitsakzeptanzkriterium

Die ausgedienten Kernbrennstoffe sind in ihren Lagereinheiten so anzuordnen und die Lagereinheiten unter Berücksichtigung ihrer Einbauten so auszulegen und anzuordnen, dass die Kritikalitätssicherheit jeder Lagereinheit für sich und jeder Anordnung neutronisch nicht-entkoppelter Lagereinheiten im bestimmungsgemäßen Betrieb sowie nach dem Einzelfallkriterium gewährleistet ist.

Die Kritikalitätssicherheit ist gewährleistet, wenn unter den Annahmen und Festlegungen in 4.2 für alle in der Betriebsphase zu betrachtenden Ereignisse oder Ereignisabläufe nach den Festlegungen in 4.1.2.2 jeweils nachgewiesen ist, dass die jeweilige Eintrittswahrscheinlichkeit von Kritikalität P_{krit} nicht größer als 10^{-6} ist, d. h.

$$P_{\text{krit}} \leq 10^{-6} \quad (8)$$

ANMERKUNG 1 Erläuterungen zur Festlegung der oberen Schranke nach Gleichung (8) für die Eintrittswahrscheinlichkeit von Kritikalität sind in A.2.3.1 gegeben.

Der Nachweis, dass für ein jeweils zu betrachtendes Ereignis E oder einem Ereignisablauf E die Ungleichung (8) erfüllt wird, ist erbracht, wenn das Produkt $P(E) \cdot \gamma_E$

nicht größer als 10^{-6} ist,

$$P_{\text{krit}} \leq P(E) \cdot \gamma_E \leq 10^{-6} \quad (9)$$

mit der bedingten Wahrscheinlichkeit

$$\gamma_E \equiv P(k > (1 - \delta k) | E) \quad (10)$$

Dabei ist

- $P(E)$ die Wahrscheinlichkeit, dass das Ereignis bzw. der Ereignisablauf E eintritt, und
- γ_E die Wahrscheinlichkeit, dass der sich unter der Bedingung, dass das Ereignis bzw. der Ereignisablauf E eingetreten ist, nach 4.2 ergebende Neutronenmultiplikationsfaktor $k = k(\bar{x}, \bar{\xi}; \bar{z}_E)$ einen vorgegebenen Grenzwert $(1 - \delta k)$ überschreitet.

ANMERKUNG 2 Erläuterungen zur Ungleichung (9) und zur Ermittlung von Eintrittswahrscheinlichkeiten $P(E)$ von Ereignissen oder Ereignisabläufen sind in A.3 und A.4 gegeben. (Für Ereignisse oder Ereignisabläufe des bestimmungsgemäßen Betriebes wird $P(E) = 1$ gesetzt.)

ANMERKUNG 3 Zur Berechnung der bedingten Wahrscheinlichkeit Gleichung (10) siehe Erläuterungen in A.3.1 sowie in DIN 25478 Beiblatt 1.

Für den Grenzwert $(1 - \delta k)$ in Gleichung (10) gelten folgende Festlegungen:

- a) Werden die Varianzen und Korrelationen der jeweils involvierten nuklearen Daten $\bar{\xi}$ in der Ermittlung von $k = k(\bar{x}, \bar{\xi}; \bar{z}_E)$ nicht berücksichtigt, so ist für δk in $(1 - \delta k)$ der Wert 0,02 zu wählen.

- b) Für δk in $(1-\delta k)$ darf der Wert 0,01 gewählt werden, wenn bei der Ermittlung von $k = k(\vec{x}, \vec{\xi}; \vec{z}_E)$ die Auswertung einer in Fein- oder Breitgruppenstruktur vorliegenden Kovarianzmatrix $\text{cov}(\vec{\xi})$ der involvierten nuklearen Daten durch Anwendung von Störungstheorie erster Ordnung einbezogen wird.

ANMERKUNG 4 Feingruppenstruktur liegt vor, wenn die Anzahl der Energiegruppen mindestens 60 beträgt.

- c) Für δk in $(1-\delta k)$ darf der Wert 0,005 gewählt werden, wenn folgende Bedingungen erfüllt werden:

- 1) Es steht eine Wahrscheinlichkeitsdichte $p(\vec{\xi}_{\text{BD}}(E_n) | \hat{\theta}(E_n))$ der nuklearen Basisdaten $\vec{\xi}(E_n)$ zur Verfügung, die aus empirisch basierten Datensätzen $\mathcal{E}(E_n)$, welche Messungen von $\vec{\xi}(E_n)$ und empirisch validierte $\vec{\xi}(E_n)$ -Daten sind, nachweislich so hergeleitet ist, dass die dabei für die Parameter $\theta(E_n)$ des der Dichte $p(\vec{\xi}_{\text{BD}}(E_n) | \hat{\theta}(E_n))$ zugrunde liegenden Modells $p(\vec{\xi}_{\text{BD}}(E_n) | \theta(E_n))$ in Abhängigkeit von der Neutronenenergie E_n erhaltenen Schätzer $\hat{\theta}(E_n)$ konsistent und robust sind (siehe [4], [42]).

- 2) Aus $p(\vec{\xi}_{\text{BD}}(E_n) | \hat{\theta}(E_n))$ werden Monte-Carlo-Stichproben $\vec{\xi}_{\text{BD}}^{(s)}(E_n)$ der nuklearen Basisdaten $\vec{\xi}_{\text{BD}}(E_n)$ gezogen,

$$\vec{\xi}_{\text{BD}}^{(s)}(E_n) \sim p(\vec{\xi}_{\text{BD}}(E_n) | \hat{\theta}(E_n)) \quad (11)$$

- 3) Aus jeder Monte-Carlo-Stichprobe $\vec{\xi}_{\text{BD}}^{(s)}(E_n) \sim p(\vec{\xi}_{\text{BD}}(E_n) | \hat{\theta}(E_n))$ werden jeweils mithilfe von Basisdaten-Programmen Punktdatenbibliotheken oder Feingruppenbibliotheken erstellt und unter deren Verwendung die entsprechenden Neutronenmultiplikationsfaktoren $k^{(s)}$ berechnet.
- 4) Die Ermittlung von $k = k(\vec{x}, \vec{\xi}; \vec{z}_E)$ basiert auf der Auswertung der Verteilung der erhaltenen Werte $k^{(s)}$.

- d) Die in 4.1.2.1 a) bis c) festgelegten δk -Werte gelten ausschließlich für den Fall, dass die benutzten Punktdaten- oder Gruppenbibliotheken aus demjenigen File nuklearer Basisdaten $\vec{\xi}_{\text{BD}}(E_n)$ hergeleitet sind, der nachweislich zur größten Unsicherheit $\Delta k(\vec{\xi})$ des Neutronenmultiplikationsfaktors k führt. Ist dies nicht der Fall, so sind die in 4.1.2.1 a) bis c) festgelegten δk -Werte jeweils um die Differenz zwischen dem nachweislich größten $\Delta k(\vec{\xi})$ -Wert und dem $\Delta k(\vec{\xi})$ -Wert zu erhöhen, der sich mit dem der benutzten Bibliothek zugrunde liegenden Basisdatenfile ergibt.

ANMERKUNG 5 Näheres zu 4.1.2.1 b) bis d) siehe DIN 25478 Beiblatt 1.

ANMERKUNG 6 Die mit der Wahl von $\delta k = 0,02$ verbundene Vorgehensweise nach 4.1.2.1 a), Varianzen und Korrelationen der nuklearen Daten nicht explizit zu berücksichtigen, entspricht nur hinsichtlich der Wahl von $\delta k = 0,02$ der in der traditionellen Methodik der Deterministischen Kritikalitätssicherheitsauslegung (siehe A.1) zulässigen Vorgehensweise, in begründeten Fällen unter Berücksichtigung aller - wird von den Unsicherheiten in den nuklearen Daten abgesehen - sonstigen Rechenunsicherheiten und Toleranzen für den Neutronenmultiplikationsfaktor k_{eff} des zu betrachtenden Anwendungsfalls einen höchstzulässigen Wert von 0,98 zu wählen (siehe z. B. KTA 3602:2003-11). Bei dieser traditionellen Wahl wird nur gefordert, dass die obere 95 %/95 %-Toleranzgrenze des erhaltenen k_{eff} -Werts nicht den höchstzulässigen Wert überschreitet. Die Erfüllung dieser Forderung bedeutet, dass, mit einer Wahrscheinlichkeit von 0,95, höchstens ein Anteil (d. i. ein Wahrscheinlichkeitsgehalt) von 0,05 der zum Anwendungsfall korrespondierenden wahren, aber unbekannt bleibenden Wahrscheinlichkeitsverteilung von k_{eff} über dem höchstzulässigen k_{eff} -Wert von 0,98 liegen kann. Die Vorgehensweise nach 4.1.2.1 a) fordert hingegen, dass die Eintrittswahrscheinlichkeit von Kritikalität nach Gleichung (9) nicht größer als 10^{-6} sein darf. So darf nach Gleichung (10) bei $P(E) = 1$ der Anteil der zum Anwendungsfall korrespondierenden Wahrscheinlichkeitsverteilung von k_{eff} , der über 0,98 liegt, nicht größer als 10^{-6} sein.

ANMERKUNG 7 Die in 4.1.2.1 b) formulierten Bedingungen können bei Einsatz z. B. des Moduls TSUNAMI des SCALE-Berechnungssystems¹⁾ [5] erfüllt werden, siehe DIN 25478 Beiblatt 1.

4.1.2.2 Grundlegende Festlegungen zum Nachweis der Gewährleistung der Kritikalitätssicherheit

Für den Nachweis, dass unter den Annahmen und Festlegungen in 4.2 die Anforderungen nach 4.1.2.1 erfüllt werden, gelten folgende Festlegungen:

- a) Für jede einzelne Lagereinheit ist nachzuweisen, dass sie unter maximaler Reflexion die Ungleichung (8) erfüllt. Dabei sind die im Endlager vorhandenen Reflektormaterialien zu berücksichtigen.
- b) Für jede Anordnung neutronisch nicht-entkoppelter Lagereinheiten ist nachzuweisen, dass sie unter optimaler Zwischenmoderation und maximaler Reflexion die Ungleichung (8) erfüllt. Von der Forderung optimaler Zwischenmoderation der Lagereinheiten darf ohne Begründung nicht abgewichen werden.
- c) Wird zur Erfüllung des Einzelfallkriteriums das Doppelereignisprinzip angewendet, derart dass $N_E \geq 2$ voneinander unabhängige, gleichzeitig wirkende und im bestimmungsgemäßen Betrieb nicht zu erwartende Ereignisse oder Ereignisabläufe eintreten müssen, bevor Kritikalität erreicht werden kann, so ist nachzuweisen, dass die Wahrscheinlichkeit des gleichzeitigen Eintretens dieser $N_E \geq 2$ Ereignisse bzw. Ereignisabläufe nicht zu einer Überschreitung der für die Eintrittswahrscheinlichkeit von Kritikalität festgelegten oberen Schranke nach Ungleichung (8) führt.
- d) Für eine Sicherheitsmaßnahme, die der Gewährleistung der Kritikalitätssicherheit in einem Störfall dient, ist nachzuweisen, dass die Wahrscheinlichkeit des gleichzeitigen Eintretens des die Anforderung dieser Sicherheitsmaßnahme auslösenden Störfalls und des bei der Auslegung dieser Maßnahme unterstellten Einzelfehlers nicht zu einer Überschreitung der für die Eintrittswahrscheinlichkeit von Kritikalität festgelegten oberen Schranke nach Ungleichung (8) führt.
- e) Führen infolge derselben Ursache bewirkte Ereignisse oder Ereignisabläufe zu Reaktivitätsänderungen in voneinander neutronisch entkoppelten Anordnungen von Lagereinheiten, so ist es nicht erforderlich, die Summe der Eintrittswahrscheinlichkeiten von Kritikalität, die sich für die jeweiligen Anordnungen aufgrund der Ereignisse bzw. Ereignisabläufe ergeben, zu bilden.
- f) Berechnungen von Eintrittswahrscheinlichkeiten $P(E)$ von Ereignissen oder Ereignisabläufen E sind in 4.1.2.2 a) und 4.1.2.2 b) nicht erforderlich, wenn eine der folgenden Bedingungen erfüllt ist:
 - 1) Es handelt sich um Ereignisse bzw. Ereignisabläufe des bestimmungsgemäßen Betriebes ($P(E) = 1$).
 - 2) Es wird unter den Annahmen und Festlegungen in 4.2 jeweils nachgewiesen, dass die sich unter Berücksichtigung von 4.2.2.3 ergebende obere Konfidenz- oder Kreditibilitätsintervallgrenze $k_{O\gamma}$ des sich jeweils ergebenden Neutronenmultiplikationsfaktors $k = k(\bar{x}, \bar{\xi}; \bar{z}_E)$ die Ungleichung

$$k_{O\gamma} \leq (1 - \delta k) \text{ mit } \gamma = 10^{-6} \quad (12)$$

erfüllt, d. h. dass für die bedingte Wahrscheinlichkeit nach Gleichung (10) folgende Ungleichung gilt:

$$\gamma_E = P(k > (1 - \delta k) | E) \leq \gamma = 10^{-6} \quad (13)$$

ANMERKUNG 1 Die Erfüllung der Ungleichung (12) stellt in der Tat sicher, dass allein schon der Term Gleichung (10) in Ungleichung (9) dafür sorgt, dass das Kriterium Ungleichung (8) erfüllt wird.

1) TSUNAMI im Programmsystem von SCALE ist die Herstellerbezeichnung des Produkts, entwickelt vom Oak Ridge National Laboratory (ORNL). Diese Angabe dient nur zur Unterrichtung der Anwender dieser Norm und bedeutet keine Anerkennung des genannten Produkts durch DIN.

- g) Ist die zu einem Ereignis oder Ereignisablauf E vorliegende Menge an sicherheitstechnischen Informationen zu gering, um die Eintrittswahrscheinlichkeit $P(E)$ abschätzen zu können, so ist $P(E) = 1$ zu setzen und es ist nachzuweisen, dass Ungleichung (12) erfüllt wird.

ANMERKUNG 2 Siehe auch Erläuterungen zur Abschätzung von Eintrittswahrscheinlichkeiten $P(E)$ in A.4.

- h) Handelt es sich bei der jeweils betrachteten Lagereinheit oder Anordnung von Lagereinheiten um ein inhärent sicheres Kernbrennstoffsystem, so brauchen weder Eintrittswahrscheinlichkeiten $P(E)$ von Ereignissen oder Ereignisabläufen E noch die jeweils zugehörigen bedingten Wahrscheinlichkeiten $\gamma_E = P(k > (1 - \delta k) | E)$ berechnet zu werden.

4.1.3 Nachbetriebsphase

Die Kombination natürlicher und vorgesehener technischer Barrieren muss unter Berücksichtigung der langfristig möglichen Änderungen von Barrieren und des möglichen Ausfalls oder Verlustes einiger Barrieren geeignet sein, die Eintrittswahrscheinlichkeit von Kritikalität und erforderlichenfalls die Folgen einer postulierten Kritikalität im Endlager hinreichend zu begrenzen.

Der Nachweis, dass diese Anforderung erfüllt wird, erfordert unter Berücksichtigung

- der natürlichen Randbedingungen des Endlagers und ihrer möglichen Änderungen,
- der Auslegung der technischen Barrieren und deren möglicher Degradation sowie
- der Auslegung der Lagereinheiten und der möglichen Degradation von Einbauten (wie z. B. von Struktur- und Neutronenabsorbermaterialien) dieser Lagereinheiten

diejenigen zueinander alternativen Szenarien nach 4.3 zu entwickeln und zu untersuchen, die solche Änderungen der Anordnung, Dichte, Zusammensetzung, Neutronenmoderation, -absorption und -reflektion der ausgedienten Kernbrennstoffe beschreiben, die im Vergleich zur ursprünglichen Anordnung zu einer signifikanten Erhöhung des Neutronenmultiplikationsfaktors führen.

Mögliche Austräge von Kernbrennstoffen aus Kernbrennstoffeinheiten und Lagereinheiten, verbunden mit möglichen Akkumulationen dieser Stoffe im jeweiligen Nahfeld oder im Fernfeld, sind dabei zu berücksichtigen.

Ebenso sind mögliche Austräge von Nicht-Kernbrennstoffen, insbesondere von Stoffen, die als Neutronenabsorber wirken können, aus den Lagereinheiten bei gleichzeitigem Verbleiben der Kernbrennstoffe in diesen Einheiten zu berücksichtigen.

Es ist sicherzustellen, dass dasjenige Szenario, das im Vergleich zur ursprünglichen Anordnung zur größten Erhöhung des Neutronenmultiplikationsfaktors führt, erfasst ist.

Die Kernbrennstoffkonfigurationen C_i , die den zu untersuchenden Szenarien $i = 1, \dots, N$ entsprechen, sind nach ihren kritikalitätssicherheitsrelevanten Merkmalen zu parametrisieren (siehe 4.3). Der Neutronenmultiplikationsfaktor $k(\vec{x}_i) = k(\vec{x}_i, \vec{\xi}_i; \vec{z}_{C_i})$ einer solchen Konfiguration ist als Funktion der entsprechend erhaltenen Parametersätze $\vec{x}_i = \vec{x}_i(t)$ für die jeweiligen Wertebereiche $\Omega_i \equiv \Omega(\vec{x}_i)$ von $\vec{x}_i$ zu bestimmen.

Es gelten folgende Festlegungen:

- a) Erfüllt die sich entsprechend 4.2.2.3 ergebende obere Konfidenz- oder Kreditabilitätsintervallgrenze $k_{O\gamma}(C_m)$ des Neutronenmultiplikationsfaktors $k(\vec{x}_m)$ der im Zeitintervall $[t_{m1}, t_{m2}]$ nach dem endgültigen Verschluss des Endlagers ($t_{m1} \geq t_V$) nachweislich reaktivsten Konfiguration C_m für den gesamten Zeitraum $[t_{m1}, t_{m2}]$ die Ungleichung

$$\vec{x}_m \in \Omega_m : k_{O\gamma}(C_m(\forall t \in [t_{m1}, t_{m2}])) \leq (1 - \delta k) \text{ mit } \gamma = 10^{-6} \text{ und } \delta k \text{ nach 4.1.2.1,} \quad (14)$$

d. h. gilt

$$\gamma(C_m) = P(k(\vec{x}_m) > (1 - \delta k) | C_m) \leq \gamma = 10^{-6} \text{ für alle } t \in [t_{m1}, t_{m2}], \quad (15)$$

dann ist der Nachweis der Kritikalitätssicherheit für den Zeitraum $[t_{m1}, t_{m2}]$ der Nachbetriebsphase erbracht.

- b) Ist die für alle $t \in [t_{m1}, t_{m2}]$ als reaktivste Konfiguration nachgewiesene Konfiguration C_m für alle $\vec{x}_m \in \Omega_m$ und alle $t \in [t_{m1}, t_{m2}]$ ein inhärent sicheres Kernbrennstoffsystem, dann braucht die bedingte Wahrscheinlichkeit $\gamma(C_m)$ für C_m nicht berechnet zu werden.
- c) Erfüllt die für alle $t \in [t_{m1}, t_{m2}]$ als reaktivste Konfiguration nachgewiesene Konfiguration C_m die Ungleichung (14) nach 4.1.3 a), oder ist diese Konfiguration für alle $\vec{x}_m \in \Omega_m$ und alle $t \in [t_{m1}, t_{m2}]$ ein inhärent sicheres Kernbrennstoffsystem, dann sind eine Berechnung der Eintrittswahrscheinlichkeit von Kritikalität P_{krit} und eine Analyse der Folgen einer postulierten Kritikalität für den Zeitraum $t \in [t_{m1}, t_{m2}]$ nicht erforderlich.
- d) Ist die für alle $t \in [t_{m1}, t_{m2}]$ als reaktivste Konfiguration nachgewiesene Konfiguration C_m nicht für alle $t \in [t_{m1}, t_{m2}]$ ein inhärent sicheres Kernbrennstoffsystem und erfüllt sie nicht für alle $t \in [t_{m1}, t_{m2}]$ die Ungleichung (14) nach 4.1.3 a), so gelten folgende Anforderungen und Festlegungen:
- 1) Es sind alle Konfigurationen C_j zu identifizieren, die nicht für alle $t \in [t_{m1}, t_{m2}]$ inhärent sicher sind und die nicht für alle $t \in [t_{m1}, t_{m2}]$ die Ungleichung (14) nach 4.1.3 a) erfüllen.
 - 2) Für jede dieser Konfigurationen C_j ist die Zeitspanne $[t_{j1}, t_{j2}] \subseteq [t_{m1}, t_{m2}]$ anzugeben, für welche die Ungleichung (14) jeweils nicht erfüllt wird.
 - 3) Für jede der Konfigurationen C_j ist der Zeitpunkt $t_{Ej} = t_E(C_j)$ zu ermitteln, bis zu dem nach dem endgültigen Verschluss des Endlagers zum Zeitpunkt t_V die Eintrittswahrscheinlichkeit $P(t; C_j)$ der jeweiligen Konfiguration als Funktion der Zeit ermittelt werden kann. Dabei ist zu beachten, dass der konfigurationsabhängige Zeitpunkt $t_{Ej} = t_E(C_j)$ so festzulegen ist, dass der jeweilige Zeitraum $[t_V, t_{Ej}]$ nach dem endgültigen Verschluss des Endlagers zum Zeitpunkt t_V dem Maximierungsgebot genügt.
 - 4) Ist $t_{j1} \geq t_{Ej}$ für eine der Konfigurationen C_j , so gelten für diese Konfiguration die Anforderungen und Festlegungen nach 4.1.3 f). Andernfalls gelten für diese Konfiguration die Anforderungen und Festlegungen nach 4.1.3 e).
- e) Ist $t_{j1} < t_{Ej}$ für eine nach 4.1.3 d) 1) identifizierte Konfiguration C_j , so gelten für diese Konfiguration folgende Anforderungen und Festlegungen:

- 1) Für den zu dieser Konfiguration nach 4.1.3 d) 2) korrespondierenden Zeitraum $[t_{j1}, t_{j2}]$ ist die Eintrittswahrscheinlichkeit $P_{\text{krit}}(t; C_j)$ von Kritikalität nach Gleichung (16) zu bestimmen,

$$P_{\text{krit}}(t; C_j) = \gamma(t; C_j) \cdot P(t; C_j) \text{ mit } \gamma(t; C_j) = P(k(\tilde{x}_j(t)) > (1 - \delta k) | C_j), \delta k \text{ nach 4.1.2.1} \quad (16)$$

Dabei ist $t_{j2} = t_{Ej}$ zu setzen, falls $t_{j2} > t_{Ej}$ ist.

- 2) Die Eintrittswahrscheinlichkeit nach Gleichung (16) von Kritikalität muss für die zu untersuchende Zeitspanne $[t_{j1}, t_{j2}]$ die Ungleichung (17) erfüllen,

$$P_{\text{krit}}(t; C_j) \leq P_G(t) = P_G(t_V) + [1 - P_G(t_V)] \cdot \left[1 - \exp(-\varphi_{Ej} \cdot (t - t_V)) \right] \text{ für } \forall t \in [t_{j1}, t_{j2}] \quad (17)$$

mit

$$P_G(t_V) = 10^{-6} \quad (18)$$

und

$$\varphi_{Ej} = \varphi(t_{Ej}) = -\frac{1}{t_{Ej} - t_V} \cdot \ln\left(\frac{1 - W}{1 - P_G(t_V)}\right) \quad (19)$$

mit

$$W = 10^{-4} \quad (20)$$

ANMERKUNG 1 Erläuterungen zu den Gleichungen (17) bis (20) sind in Anhang B gegeben.

- 3) Ein größerer Wert als nach Gleichung (20) darf ohne Begründung für W nicht verwendet werden.
- 4) Wird die Bedingung nach Gleichung (17) von einer der Konfigurationen C_j , die dieser Bedingung nach 4.1.3 d) 4) genügen müssen, nicht erfüllt, so ist die Kombination der natürlichen und vorgesehenen technischen Barrieren nicht geeignet, die Eintrittswahrscheinlichkeit von Kritikalität im Endlager hinreichend zu begrenzen.
- 5) Wird die Bedingung nach Gleichung (17) von allen Konfigurationen C_j erfüllt, die dieser Bedingung nach 4.1.3 d) 4) genügen müssen, so ist für diese Konfigurationen eine Analyse der Folgen einer postulierten Kritikalität für den Zeitraum $t \in [t_{m1}, t_{m2}]$ nicht erforderlich.
- f) Ist $t_{j1} \geq t_{Ej}$ für eine nach 4.1.3 d) 1) identifizierte Konfiguration C_j , so ist für diese Konfiguration für $t > t_{Ej}$ zu prüfen, ob Neutronenmultiplikationsfaktoren $k(\tilde{x}_j(t))$ mit

$$k_{O\gamma}(C_j) > (1 - \delta k) \text{ mit } \gamma = P_{\text{krit}}(t_{Ej}; C_j) = W = 10^{-4} \text{ und } \delta k \text{ nach 4.1.2.1} \quad (21)$$

in Teilgebieten der zugehörigen Wertebereiche Ω_j auftreten. Ist dies der Fall, so gelten folgende Anforderungen und Festlegungen:

- 1) Für diese Teilgebiete ist jeweils das Eintreten von Kritikalität zu postulieren.
- 2) Es ist zu untersuchen, ob die Kombination der natürlichen und vorgesehenen technischen Barrieren des Endlagers geeignet ist, die Folgen der postulierten Kritikalitätsexkursion hinreichend zu begrenzen.
- 3) Bei dieser Untersuchung sind die möglichen Verläufe der Exkursion zu betrachten. Auswirkungen der Exkursion auf umliegende Barrieren und daraus folgende mögliche Rückwirkungen auf den Verlauf der Exkursion sind zu berücksichtigen. Es sind diejenigen Parameterwerte $\bar{x}_j$ und diejenigen Verläufe der Exkursion zu ermitteln, die jeweils zu den größten Auswirkungen in Bezug auf Kriterien oder Grenzwerte führen, denen das Endlager zusätzlich zu den in diesem Dokument gestellten Anforderungen genügen muss. Die Änderung des Nuklidinventars infolge der Exkursion ist dabei zu berücksichtigen.
- 4) Es ist zu berücksichtigen, dass die für die Konfiguration C_j unterstellte Kritikalitätsexkursion zu Änderungen der zu betrachtenden Szenarien oder zu weiteren zu untersuchenden Szenarien führen kann.
- 5) Ist für alle Konfigurationen C_j , bei denen für $t > t_{Ej}$ Fälle nach Gleichung (21) vorliegen, gezeigt, dass alle Kriterien und Grenzwerte erfüllt werden, denen das Endlager zusätzlich zu den in diesem Dokument gestellten Anforderungen genügen muss, so ist nachgewiesen, dass die Kombination der natürlichen und technischen Barrieren des Endlagers geeignet ist, die Folgen postulierter Kritikalitätsexkursionen hinreichend zu begrenzen.

ANMERKUNG 2 Die Anforderungen nach 4.1.3 a) bis f) sind bezüglich ihrer Abfolge und Abarbeitung in Bild 1 in einem Flussdiagramm dargestellt.

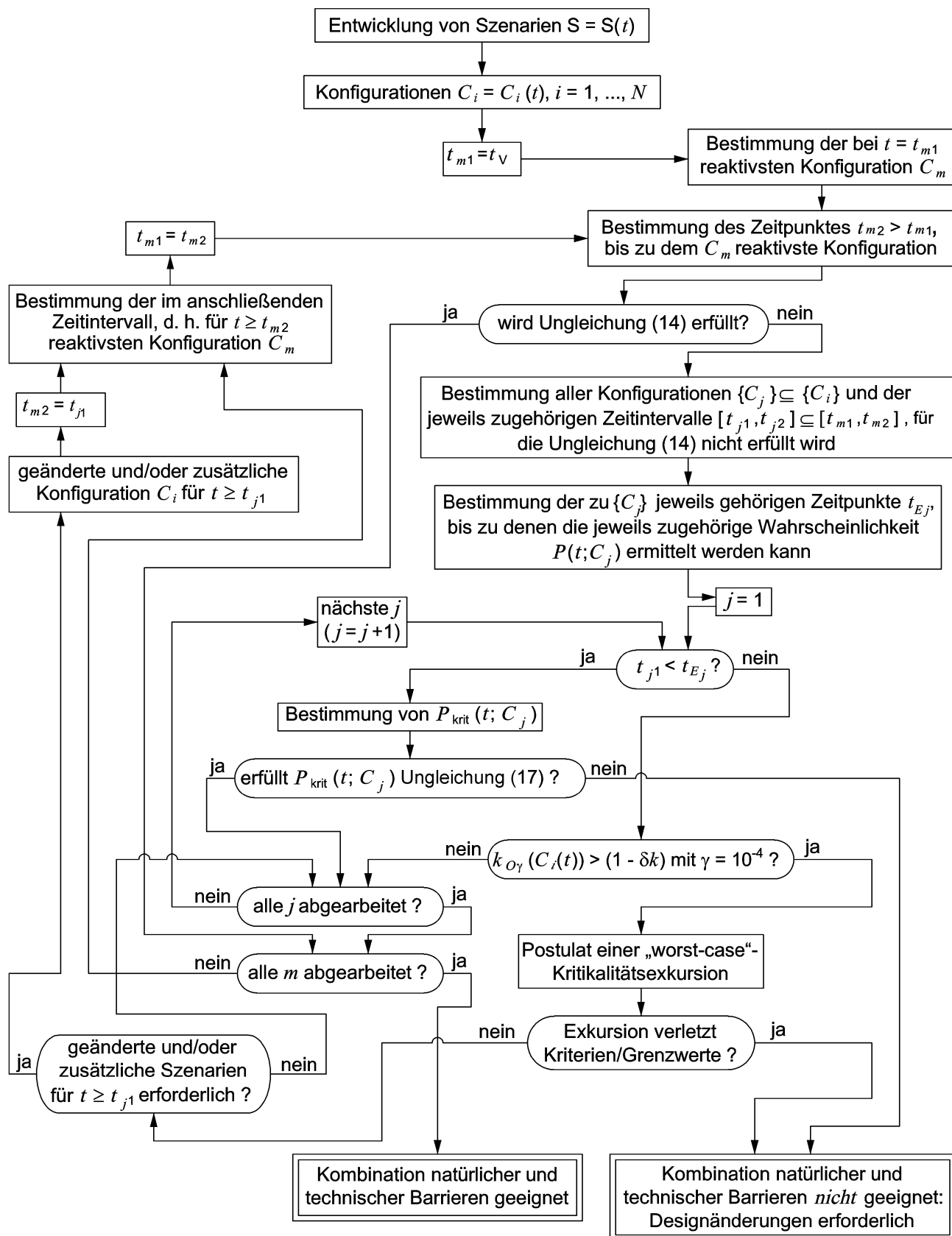


Bild 1 — Flussdiagramm zu 4.1.3 a) bis f)

4.2 Auslegungsannahmen und Festlegungen

4.2.1 Grundlegende Anforderungen

4.2.1.1 Allgemeine Anforderungen

- a) Berücksichtigung der räumlichen und zeitlichen Änderung der Nuklidinventare der ausgedienten Kernbrennstoffe:

Es gelten folgende Anforderungen und Festlegungen:

- 1) Beim Nachweis, dass den Grundsätzen nach 4.1.2 und 4.1.3 genügt wird, ist zu beachten, dass die Nuklidinventare der eingelagerten ausgedienten Kernbrennstoffe aufgrund
 - des radioaktiven Zerfalls der Radionuklide, die in den jeweils in der Kritikalitätsanalyse gewählten Nuklidsätzen berücksichtigt werden, sowie aufgrund
 - der durch die nach 4.1.2.2 zu betrachtenden Ereignisse oder Ereignisabläufe oder durch die nach 4.1.3 zu entwickelnden Szenarien bedingten Änderungen in der Anordnung, Dichte und gegebenenfalls auch isotopischen Zusammensetzung der ausgedienten Kernbrennstofferäumlich und zeitlich veränderlich sind. Die räumliche und zeitliche Änderung des Inventars jedes einzelnen Nuklids des jeweils gewählten Nuklidsatzes ist zu berücksichtigen.
- 2) Folgende Einflüsse auf die Reaktivität der eingelagerten ausgedienten Kernbrennstoffe sind zu beachten:
 - Räumlich inhomogene Verteilungen der Inventare der einzelnen Nuklide können zu höheren Neutronenmultiplikationsfaktoren führen als unter Annahme von homogener Verteilung der jeweils gemittelten Inventare erhalten wird.
 - Ob und, falls zutreffend, inwieweit sich der Neutronenmultiplikationsfaktor bei inhomogener Verteilung der Inventare im Vergleich zur Annahme homogener Verteilung der gemittelten Inventare erhöht, hängt zum einen von den Inventaren und deren Verteilungen selbst ab und zum anderen von der Neutronenmoderation und –absorption in diesen Inventaren sowie der Neutronenreflexion dieser Inventare. Die Änderung des Neutronenmultiplikationsfaktors wird somit signifikant durch den radioaktiven Zerfall sowie durch die zeitlichen Änderungen beeinflusst, die durch die nach 4.1.2.2 zu betrachtenden Ereignisse oder Ereignisabläufe oder durch die nach 4.1.3 zu entwickelnden Szenarien verursacht werden.
- 3) Die Verwendung einer homogenen Verteilung gemittelter Inventare anstelle tatsächlich inhomogener Verteilungen der Inventare für einen gegebenen Zeitraum ist nur dann zulässig, wenn sie für diesen Zeitraum nachweislich zu einer abdeckenden Abschätzung des Neutronenmultiplikationsfaktors führt.
- 4) Führt die Verwendung inhomogener Verteilungen der Inventare im Vergleich zur Annahme einer homogenen Verteilung gemittelter Inventare zu einer Verkleinerung des Wertes des Neutronenmultiplikationsfaktors, so ist sicherzustellen, dass der Neutronenmultiplikationsfaktor durch die Verwendung der inhomogenen Verteilungen der Inventare nicht unterschätzt wird.

ANMERKUNG 1 Führt die Verwendung inhomogener Verteilungen der Inventare im Vergleich zur Annahme einer homogenen Verteilung gemittelter Inventare zu einem kleineren Neutronenmultiplikationsfaktor, so ist es im Allgemeinen empfehlenswert, eine homogene Verteilung gemittelter Inventare anzunehmen.