



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI
Inspection fédérale de la sécurité nucléaire IFSN
Ispettorato federale della sicurezza nucleare IFSN
Swiss Federal Nuclear Safety Inspectorate ENSI



Reaktorkern, Brennelemente und Steuerelemente: Auslegung und Betrieb

Richtlinie für die schweizerischen Kernanlagen

ENSI-G20

Reaktorkern, Brennelemente und Steuerelemente: Auslegung und Betrieb

Ausgabe Februar 2015

Richtlinie für die schweizerischen Kernanlagen

ENSI-G20/d

Inhalt

Richtlinie für die schweizerischen Kernanlagen

ENSI-G20/d

1	Einleitung	1
2	Gegenstand und Geltungsbereich	1
3	Rechtliche Grundlagen	1
4	Nachweisführung und Berechnungsprogramme	1
	4.1 Allgemeine Anforderungen	1
	4.2 Empirische Korrelationen	2
	4.3 Validierung und Verifikation	3
	4.4 Unsicherheiten	3
5	Reaktorkern	4
	5.1 Neutronenphysikalische Auslegung	4
	5.2 Thermohydraulische Auslegung	5
	5.3 Sicherheitstechnische Kenngrößen	7
	5.4 Instrumentierung	7
	5.5 Systeme zur Reaktivitätssteuerung und Abschaltung	8
6	Brennelemente	9
	6.1 Sicherheitstechnische Anforderungen	9
	6.2 Auslegung	10
	6.3 Herstellung	14
	6.4 Betrieb	14
	6.5 Handhabung und Lagerung	16
	6.6 Entsorgung	19
7	Steuerelemente	20
	7.1 Auslegung	20
	7.2 Herstellung	22
	7.3 Betrieb	22
8	Liste der Verweisungen	24

Anhang 1:	Begriffe (gemäss ENSI-Glossar)	25
Anhang 2:	Änderungsarbeiten an Brennelementen	27

1 Einleitung

Das Eidgenössische Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI) ist die Aufsichtsbehörde für die nukleare Sicherheit und Sicherung der Kernanlagen in der Schweiz. In seiner Eigenschaft als Aufsichtsbehörde oder gestützt auf einen Auftrag in einer Verordnung erlässt es Richtlinien. Richtlinien sind Vollzugshilfen, die rechtliche Anforderungen konkretisieren und eine einheitliche Vollzugspraxis erleichtern. Sie konkretisieren zudem den aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik. Das ENSI kann im Einzelfall Abweichungen zulassen, wenn die vorgeschlagene Lösung in Bezug auf die nukleare Sicherheit und Sicherung mindestens gleichwertig ist.

2 Gegenstand und Geltungsbereich

Die Richtlinie ENSI-G20 regelt die Anforderungen an die Auslegung und den Betrieb des Reaktorkerns sowie der Brenn- und Steuerelemente von Kernkraftwerken. Sie enthält entsprechende Anforderungen an die Sicherheitsebenen 1 bis 4a. Anforderungen, die sich nicht ausdrücklich auf einzelne Sicherheitsebenen beziehen, gelten für die Sicherheitsebenen 1 bis 3.

Ergänzend zu den Anforderungen in der Richtlinie ENSI-A01 und der Verordnung des UVEK vom 17. Juni 2009 über die Gefährdungsannahmen und die Bewertung des Schutzes gegen Störfälle in Kernanlagen (SR 732.112.2) enthält die vorliegende Richtlinie auch entsprechende Anforderungen an die Sicherheitsebenen 1 und 2. Diese Richtlinie enthält zudem Präzisierungen von Anforderungen der Richtlinie ENSI-A01 an die Sicherheitsebene 3.

3 Rechtliche Grundlagen

Diese Richtlinie führt Art. 7 und 10 der Kernenergieverordnung vom 10. Dezember 2004 (KEV, SR 732.11) aus.

4 Nachweisführung und Berechnungsprogramme

4.1 Allgemeine Anforderungen

- a. Zur Einhaltung der grundlegenden Schutzziele sind für den Reaktorkern, die Brennelemente und die Steuerelemente Kriterien für jede Sicherheitsebene zu definieren und Grenzwerte festzulegen, sofern in dieser Richtlinie keine konkreten Kriterien oder Grenzwerte festgelegt sind.

- b. Die Einhaltung der Kriterien ist durch Analysen von Ereignissen und Zuständen nachzuweisen. Dabei sind abdeckende Nachweismethoden oder realistische Nachweismethoden mit quantifizierten Unsicherheiten anzuwenden.
- c. Es sind konservative Anfangs- und Randbedingungen zu verwenden.
- d. Wo erforderlich ist die Einhaltung der definierten Kriterien durch Messungen am Reaktorkern zu bestätigen.
- e. Zur Analyse sind neutronenphysikalische, thermohydraulische und strukturelle Berechnungsprogramme zu verwenden, die aufeinander abgestimmt sind. Mit den Berechnungsprogrammen müssen die betrieblich relevanten und sicherheitstechnisch wesentlichen Kenngrößen bestimmt werden können.
- f. Die Analysen müssen den aktuellen Stand der Anlage oder die geplante Änderung widerspiegeln und mit den bestehenden Analysen und der Dokumentation der Kernanlage konsistent sein.
- g. Das ENSI ist über das Bereinigen von Berechnungsprogrammen mit geringfügigem Einfluss auf die Rechenergebnisse zu informieren.
- h. Nachweismethoden und Berechnungsprogramme müssen dem Stand der Technik entsprechen und den Stand der Wissenschaft berücksichtigen.
- i. Erstellung, Anwendung und Pflege der Berechnungsprogramme haben durch dafür qualifiziertes oder geschultes Personal und im Rahmen eines zertifizierten Qualitätsmanagements (vgl. Richtlinie ENSI-G07) zu erfolgen.

4.2 Empirische Korrelationen

- a. Es ist zur Beschreibung von physikalischen Aspekten in Berechnungsprogrammen zulässig, empirische Korrelationen zu verwenden.
- b. Grundlage jeder Korrelation müssen Experimente sein, deren Messergebnisse hinreichend auf Konsistenz und Qualität überprüft worden sind.
- c. Die Experimente sind so zu konzipieren, dass die Einsatzbedingungen im Reaktorkern hinreichend abgedeckt sind. In Fällen, in denen diese Nachbildung der Einsatzbedingungen nicht erfolgt, ist die Übertragbarkeit der Ergebnisse zu begründen.
- d. Der Gültigkeitsbereich einer Korrelation ist zu ermitteln.
- e. Extrapolationen über den von Messdaten abgedeckten Bereich hinaus sind nur in begründeten Fällen zulässig. Die zusätzlichen Unsicherheiten im extrapolierten Bereich sind anzugeben und zu berücksichtigen.

- f. Der Anwendungsbereich muss vom Gültigkeitsbereich der Korrelation abgedeckt sein.
- g. Bei Korrelationen, die nicht aus physikalischen Gesetzmässigkeiten abgeleitet sind, hat die Validierung der Korrelation auf der Basis unabhängiger Daten zu erfolgen. Diese Daten dürfen nicht zur Entwicklung der Korrelation herangezogen worden sein.
- h. Bei Korrelationen physikalischer Zusammenhänge (Funktionen oder Tabellen) sind systematische Abweichungen und statistische Unsicherheiten zu ermitteln und zu berücksichtigen.

4.3 Validierung und Verifikation

- a. Die eingesetzten Berechnungsprogramme müssen verifiziert und validiert sein.
- b. Sicherheitsebenen 1 und 2: Die Validierung hat anhand von Messergebnissen zu erfolgen.
- c. Sicherheitsebene 3: Wo immer möglich hat die Validierung anhand von Messergebnissen zu erfolgen. Liegen keine geeigneten Messergebnisse aus Störfällen oder Experimenten vor, können auch Ergebnisse anderer Rechenprogramme herangezogen werden. Die eingesetzten Referenzprogramme sollen auf belastbaren physikalischen Rechenmethoden basieren. Die dabei auftretenden zusätzlichen Unsicherheiten sind zu berücksichtigen.
- d. Messergebnisse müssen den Anwendungsbereich hinsichtlich der sicherheitstechnischen Parameter abdecken. Ist dies nicht der Fall, muss die Übertragbarkeit der Messergebnisse auf den Anwendungsbereich begründet werden und zusätzliche Unsicherheiten sind zu berücksichtigen.

4.4 Unsicherheiten

- a. Unsicherheiten, die einen wesentlichen Einfluss auf die sicherheitstechnischen Parameter haben, sind zu berücksichtigen.
- b. In den Nachweismethoden sind zumindest folgende Unsicherheiten zu berücksichtigen:
 1. Fertigungstoleranzen
 2. Toleranzen der Materialkenngrößen
 3. Messunsicherheiten
 4. Schwankungen von Betriebsparametern

5. durch den Betrieb verursachte Änderungen
 6. systematische Abweichungen der Rechenmodelle
 7. Unsicherheiten der Rechenmodelle
- c. Die Berücksichtigung von Unsicherheiten kann abdeckend oder statistisch erfolgen. Eine Kombination beider Vorgehensweisen ist zulässig.

5 Reaktorkern

5.1 Neutronenphysikalische Auslegung

- a. Sicherheitsebene 1: Die lokale Leistungsdichte ist auf die in den Sicherheitsnachweisen für Abweichungen vom Normalbetrieb und Auslegungstörfälle verwendeten Ausgangswerte zu begrenzen. Dabei ist das Zusammenwirken von Regelungs- und Begrenzungssystemen zu berücksichtigen.
- b. Sicherheitsebenen 1 und 2: Die inhärenten Eigenschaften des Reaktorkerns zur Begrenzung von Reaktivitäts- und Leistungsanstiegen sind zu gewährleisten (inhärente Sicherheit).
- c. Sicherheitsebene 2 sowie Störfallkategorien 1 und 2 der Sicherheitsebene 3: Die Leistung und Leistungsdichten sind so zu begrenzen, dass die Integrität der Brennstoffhüllrohre nicht beeinträchtigt wird. Dabei sind die inhärenten Eigenschaften des Reaktorkerns sowie die Wirkungen der Regelungssysteme, Begrenzungssysteme und des Reaktorschutzsystems zu berücksichtigen.
- d. Sicherheitsebene 3: Die Schnellabschaltung und langfristige Unterkritikalität des Reaktorkerns sind zu gewährleisten (siehe auch Kapitel 5.5).
- e. Störfallkategorie 3 der Sicherheitsebene 3: Wenn bei Reaktivitätsstörfällen Brennstabschäden nicht ausgeschlossen werden können, muss der Brennstoffaustrag ins Primärkühlmittel begrenzt werden.
- f. Sicherheitsebene 4a: Beim unterstellten Ausfall des Schnellabschaltsystems ist der Druck im Reaktorkühlkreislauf auf den gemäss Kapitel 4.1 Buchstabe a festzulegenden zulässigen Wert zu begrenzen. Die langfristige Unterkritikalität und die Kühlbarkeit des Reaktorkerns sind zu gewährleisten.

5.2 Thermohydraulische Auslegung

5.2.1 Allgemeine Anforderungen

- a. Sicherheitsebenen 1 und 2 sowie Störfallkategorien 1 und 2 der Sicherheitsebene 3: Es sind Sicherheitsgrenzwerte zu definieren, um kritische Siedezustände mit ausreichender statistischer Sicherheit auszuschliessen.
- b. Sicherheitsebene 1: Zur Einhaltung der Sicherheitsgrenzwerte der Leistungsdichte bei Abweichungen vom Normalbetrieb und bei Auslegungsstörungen der Störfallkategorien 1 und 2 ist ein Betriebsgrenzwert mit genügend Abstand zu den kritischen Siedezuständen zu bestimmen.
- c. Sicherheitsebene 2 sowie Störfallkategorien 1 und 2 der Sicherheitsebene 3: Für alle Komponenten des Reaktorkerns ist sicherzustellen, dass an keiner Stelle Temperaturen, Drücke oder Druckdifferenzen auftreten, welche die Eigenschaften der eingesetzten Werkstoffe oder die sicherheitstechnische Funktion der Komponenten unzulässig verändern.
- d. Störfallkategorie 3 der Sicherheitsebene 3 sowie Sicherheitsebene 4a: Die Kühlbarkeit des Reaktorkerns ist zu gewährleisten. Unzulässige Belastungen der Komponenten des Reaktorkühlkreislaufs sowie unzulässige Druckbelastungen des Reaktorkerns und der Kerneinbauten sind auszuschliessen.
- e. Störfallkategorie 3 der Sicherheitsebene 3 sowie Sicherheitsebene 4a: Eine selbsterhaltende exotherme Zirkonium-Wasser-Reaktion ist zu verhindern.
- f. Störfallkategorie 3 der Sicherheitsebene 3: Für Kühlmittelverluststürfälle gelten zusätzlich folgende Anforderungen:
 1. Begrenzung der Hüllrohrtemperatur zur Vermeidung übermässiger Versprödung und Oxidation
 2. Sicherstellung ausreichender Restduktilität oder Restfestigkeit der Hüllrohre zur Vermeidung einer Fragmentierung
 3. Begrenzung der störfallbedingten Oxidation des in den Brennstabhüllrohren enthaltenen Zirkoniums zur Limitierung der Wasserstoffzeugung auf 1 %
 4. Begrenzung eines möglichen Brennstoffaustrags

5.2.2 Verteilung der Massenstromdichte im Reaktorkern

- a. Die Kerneinbauten und der Reaktorkern sind derart auszulegen, dass im Reaktorkern keine Strömungsumverteilungen stattfinden, welche die siche-

re Wärmeabfuhr verhindern oder zu unzulässigen mechanischen Belastungen der Komponenten des Reaktorkerns führen.

- b. Bei der Bestimmung der Durchsatzverteilung im Reaktorkern sind folgende Aspekte zu berücksichtigen:
 - 1. Durchsatzverteilung vor Kerneintritt
 - 2. Kerngeometrie
 - 3. unterschiedliche hydraulische Widerstände
 - 4. unterschiedliche Beheizung und Kühlmitteldurchmischung im Reaktorkern
 - 5. lokale Effekte, beispielsweise Querströmungen

5.2.3 Strömungskräfte

- a. Hydraulisch induzierte Vibrationen im Reaktorkern sind zu minimieren.
- b. Sicherheitsebene 1: Für Siedewasserreaktoren ist sicherzustellen, dass die aus Auftrieb und Strömung resultierenden Kräfte die Gewichtskraft der Brennelemente, der Teilbündel oder der einzelnen Brennstäbe nicht überschreiten.
- c. Sicherheitsebene 1: Für Druckwasserreaktoren ist sicherzustellen, dass die aus Auftrieb und Strömung resultierenden Kräfte die Gewichtskraft der Brennelemente unter Berücksichtigung der Kraft der Niederhaltefedern nicht überschreiten.
- d. Sicherheitsebenen 2 und 3: Die Zulässigkeit des kurzzeitigen Abhebens der Brennelemente, ohne dass das Einfahren der Steuerelemente beeinträchtigt wird, ist nachzuweisen.

5.2.4 Stabilität

- a. Sicherheitsebene 1: Die thermohydraulische Stabilität des Reaktorkerns ist zu gewährleisten.
- b. Für Siedewasserreaktoren gelten zudem folgende Anforderungen:
 - 1. Sicherheitsebene 1: Es ist Vorsorge dafür zu treffen, dass im Normalbetrieb ein ausreichender Abstand zu jenem Bereich im Betriebskennfeld eingehalten wird, in dem ungedämpfte Leistungsdichteschwingungen auftreten können.
 - 2. Sicherheitsebenen 2 und 3: Es sind geeignete Massnahmen vorzusehen, die bei Leistungsdichteschwingungen die Einhaltung der si-

cherheitstechnischen Anforderungen der jeweiligen Sicherheitsebene sicherstellen.

3. Der Bereich des Betriebskennfelds, in dem ungedämpfte Leistungsdichteschwingungen auftreten können, ist bei Änderungen, die einen Einfluss auf das Betriebskennfeld haben, zu überprüfen. Wird auf Messungen der Stabilitätseigenschaften verzichtet, ist dies zu begründen.

5.3 Sicherheitstechnische Kenngrößen

- a. Die sicherheitstechnischen Kenngrößen sind für jeden Reaktorkern in Abhängigkeit vom Reaktortyp, von der Auslegung der Gesamtanlage und der Analysenmethodik festzulegen.
- b. Die zulässigen Wertebereiche aller sicherheitstechnischen Kenngrößen sind zu ermitteln. Unsicherheiten und Abweichungen sind zu berücksichtigen.
- c. Sicherheitsebene 1: Der Reaktorkern und die angrenzenden Systeme sind so auszulegen und zu betreiben, dass die zulässigen Wertebereiche der sicherheitstechnischen Kenngrößen eingehalten werden.
- d. Sicherheitsebenen 2 und 3: Es sind geeignete Massnahmen zur Einhaltung der zulässigen Wertebereiche vorzusehen. Die Art der Massnahmen sowie die zulässige Zeit bis zum Wirksamwerden der Massnahmen sind anhand der jeweiligen Ereignisabläufe festzulegen.

5.4 Instrumentierung

- a. Zur Überwachung der sicherheitstechnischen Kenngrößen des Reaktorkerns respektive zur Verifikation der Kernberechnungen ist eine Instrumentierung mit ausreichender örtlicher und zeitlicher Auflösung vorzusehen.
- b. Die sicherheitstechnischen Kenngrößen sind direkt oder indirekt zu erfassen und auf Einhaltung ihrer zulässigen Wertebereiche zu überwachen. Trends und anomales Verhalten müssen identifiziert werden können.
- c. Anzahl und Positionen der Messfühler sind so zu wählen, dass signifikante Abweichungen der Messwerte von den berechneten Werten erfasst werden können.
- d. Sicherheitstechnische Parameter sind aufzuzeichnen und müssen zeitnah abrufbar sein.

5.5 Systeme zur Reaktivitätssteuerung und Abschaltung

- a. Die erforderliche minimale Wirksamkeit der Abschaltssysteme (Abschaltreaktivität) ist anlagenspezifisch festzulegen.
- b. Die ausreichende Wirksamkeit und Geschwindigkeit der Abschaltssysteme sind für jeden Zyklus nachzuweisen.
- c. Nach Änderungen der Beladung des Reaktorkerns, die über ein geringfügiges Ausmass hinausgehen, ist die anforderungsgerechte Abschaltreaktivität durch Messungen zu bestätigen.
- d. Komponenten der Abschaltssysteme dürfen auch für betriebliche Regelungsaufgaben eingesetzt werden, wobei die für die Abschaltung benötigte Wirksamkeit erhalten bleiben muss (siehe auch Kapitel 7.1.1 Buchstabe c).

5.5.1 Steuerstabsystem

- a. Für das Steuerstabsystem ist der Nachweis der ausreichenden Wirksamkeit ohne das wirksamste Steuerelement zu führen.
- b. Das Steuerstabsystem muss den Reaktorkern in hinreichend kurzer Zeit in den unterkritisch heissen Zustand überführen und nach erfolgter Schnellabschaltung den Reaktorkern langfristig unterkritisch halten – gegebenenfalls im Zusammenwirken mit weiteren Abschaltssystemen (Boriersysteme).
- c. Die erforderlichen Wirksamkeiten und Geschwindigkeiten sind durch abdeckende Analysen von auf den jeweiligen Sicherheitsebenen anzunehmenden Ereignisabläufen zu ermitteln.

5.5.1.1 Druckwasserreaktoren

- a. Das Steuerstabsystem und der Reaktorkern sind so auszulegen, dass nach der Reaktorabschaltung bis zur Sicherstellung der langfristigen Unterkritikalität durch die Boriersysteme die Abschaltreaktivität den gemäss Kapitel 5.5 Buchstabe a festgelegten Wert einhält.
- b. Störfallkategorie 3 der Sicherheitsebene 3: Eine vorübergehende Rekritikalität ist zulässig, solange die Anforderungen von Kapitel 5.2.1 Buchstabe d eingehalten werden.

5.5.1.2 Siedewasserreaktoren

- a. Das Steuerstabsystem und der Reaktorkern sind so auszulegen, dass nach der Abschaltung die Abschaltreaktivität im ungünstigsten Reaktorzustand den gemäss Kapitel 5.5 Buchstabe a festgelegten Wert einhält.

- b. Als Vorsorge gegen unbeabsichtigtes Kritischwerden und unbeabsichtigte Leistungserhöhung sind Anfahr- und Beladeverriegelungen sowie Schnellabschaltanregungen vorzusehen.

5.5.2 Boriersysteme

5.5.2.1 Druckwasserreaktoren

- a. Die erforderlichen Wirksamkeiten und Abschaltgeschwindigkeiten der Boriersysteme sind aus Analysen der auf den jeweiligen Sicherheitsebenen zu betrachtenden Ereignisabläufe zu ermitteln, welche die höchsten Anforderungen an die Leistungsfähigkeit der einzelnen Boriersysteme stellen.
- b. Die Boriersysteme müssen ergänzend zum Schnellabschaltssystem die Reaktivitätszufuhr mit der aufgrund der Ereignisablaufanalysen erforderlichen Geschwindigkeit soweit kompensieren, dass der Reaktorkern langfristig unterkritisch bleibt und die erforderliche Abschaltreaktivität erreicht.
- c. Sicherheitsebenen 1 und 2: Boriersysteme allein müssen den Reaktorkern aus jedem anzunehmenden Ausgangszustand in den unterkritischen Zustand überführen können, wobei die Abschaltreaktivität gemäss Kapitel 5.5 Buchstabe a langfristig sicherzustellen ist.
- d. Sicherheitsebenen 3 und 4a: Boriersysteme müssen die langfristige Unterkritikalität sicherstellen.

5.5.2.2 Siedewasserreaktoren

Sicherheitsebene 4a: Ein Boriersystem muss den Reaktorkern auf der Sicherheitsebene 4a sicher abschalten und langfristig unterkritisch halten.

6 Brennelemente

6.1 Sicherheitstechnische Anforderungen

- a. Die Beschaffenheit und der Einsatz der Brennelemente sind derart zu gestalten, dass folgende Anforderungen erfüllt werden:
 - 1. Sicherheitsebenen 1 bis 4a: Die für die Kontrolle der Reaktivität erforderlichen Geometrie- (Form und Lage) und Materialeigenschaften der Brennelemente sind zu gewährleisten.
 - 2. Sicherheitsebenen 1 bis 4a: Die zulässigen Werte der Leistung sind einzuhalten.

3. Sicherheitsebenen 1 bis 4a: Die für die anforderungsgerechte Wärmeabfuhr erforderliche Geometrie- (Form und Lage) und Materialeigenschaften der Brennelemente sind zu gewährleisten.
 4. Die in Kapitel 5.2.1 festgelegten Anforderungen hinsichtlich des Schutzes gegen das Erreichen der kritischen Wärmestromdichte müssen erfüllt werden.
 5. Sicherheitsebenen 1 und 2 sowie Störfallkategorien 1 und 2 der Sicherheitsebene 3: Die Dichtheit der Brennstäbe ist zu gewährleisten (siehe Art. 9 und 10 der Verordnung des UVEK über die Gefährdungsannahmen und die Bewertung des Schutzes gegen Störfälle in Kernanlagen).
 6. Störfallkategorie 3 der Sicherheitsebene 3: In Fällen, in denen die Dichtheit der Brennstäbe nicht gewährleistet werden kann, ist der Brennstoffaustrag in das Primärkühlmittel zu begrenzen.
- b. Sicherheitsebenen 1 bis 4a: Rückwirkungen der Brennelemente auf Kern-einbauten und angrenzende Systeme sind zu berücksichtigen.

6.2 Auslegung

Zur Einhaltung der sicherheitstechnischen Anforderungen gemäss Kapitel 6.1 sind die folgenden Auslegungsanforderungen zu erfüllen.

6.2.1 Allgemeine Auslegungsanforderungen

- a. Die Auslegung muss die bei Transport, Handhabung, Einsatz und Lagerung auftretenden Beanspruchungen sowie Veränderungen von Werkstoffeigenschaften und der Geometrie berücksichtigen, z. B. infolge externer und interner mechanischer, thermischer, chemischer und strahlungsbedingter Einwirkungen.
- b. Werkstoffe und Herstellungsverfahren sind unter Berücksichtigung der auftretenden Spannungen und der Umgebungsbedingungen so zu wählen, dass keine Funktionsbeeinträchtigung durch Spannungsrissskorrosion auftritt.
- c. Durch geeignete Werkstoffwahl ist die Aktivierung von Materialien, die ins Kühlwasser gelangen, zu begrenzen. Dies betrifft insbesondere den Kobaltgehalt.

- d. Kompatibilität:
 1. Die Komponenten des Brennelementes müssen untereinander kompatibel sein. Insbesondere ist ein ausreichender Freiraum zwischen Brennstab und Brennelement-Struktur sicherzustellen.
 2. Die geometrische, mechanische, nukleare und thermohydraulische Kompatibilität des Brennelementes mit den anderen Elementen des Reaktorkerns, den Kerneinbauten und den Handhabungs- und Lageeinrichtungen muss gewährleistet sein.
 3. Werkstoffe müssen unter Berücksichtigung elektrochemischer Wechselwirkungen mit denen der angrenzenden Komponenten kompatibel sein.
- e. Die Brennelemente müssen mit ausreichender Genauigkeit durch die Kernüberwachung überwacht werden können.
- f. Brennelemente müssen inspizierbar und reparaturfähig sein.
- g. Der zulässige Abbrand der Brennelemente ist festzulegen.

6.2.2 Brennstabspezifische Auslegungsanforderungen

6.2.2.1 Sicherheitsebenen 1 und 2 sowie Störfallkategorien 1 und 2 der Sicherheitsebene 3

Brennstäbe sind so auszulegen, dass folgende Ziele erreicht werden:

- a. Vermeidung von Brennstoffschmelzen
- b. Sicherstellung der spezifizierten Lage des Brennstoffes im Hüllrohr
- c. Begrenzung von Spannungen und Dehnungen im Hüllrohr auf werkstoffspezifisch zulässige Werte, u. a. unter Berücksichtigung folgender Belastungen:
 1. schnelle positive Leistungsänderungen (tangente Hüllrohrgesamtdehnung)
 2. Langzeitwechselwirkung durch Brennstoffschwellen (plastische Hüllrohrvergleichsdehnung)
 3. Druckdifferenz über das Hüllrohr durch äusseren Überdruck (plastische Hüllrohrvergleichsdehnung)
 4. thermische Belastungen
 5. Biegebelastungen

- d. Begrenzung der Tangentialspannung im Hüllrohr (unter Berücksichtigung der Hydrid-Ausrichtung)
- e. Begrenzung von mechanischen und thermischen, zyklisch wechselnden Belastungen zur Vermeidung von Ermüdung
- f. Begrenzung des Brennstab-Innendrucks durch Spaltgasfreisetzung und Helium-Produktion zur Vermeidung einer unzulässigen thermischen Rückkopplung
- g. Vermeidung von elastischem Beulen und plastischen Verformungen durch äusseren Überdruck
- h. Sicherstellung einer ausreichenden Duktilität
- i. Begrenzung der Korrosion
- j. Begrenzung der Wasserstoffaufnahme
- k. Vermeidung von Brennstabschäden infolge mechanisch-chemischer Wechselwirkungen zwischen Brennstoff und Hüllrohr

6.2.2.2 Störfallkategorie 3 der Sicherheitsebene 3 und Sicherheitsebene 4a

- a. Brennstäbe sind so auszulegen, dass folgende Ziele erreicht werden (siehe auch Kapitel 5.1 Buchstabe e und Kapitel 5.2.1 Buchstabe f):
 - 1. Begrenzung der Deformation
 - 2. grundsätzliches Vermeiden von Brennstoffschmelzen
- b. Für Kühlmittelverluststörfälle und Störfälle der Sicherheitsebene 4a gelten zusätzlich folgende Anforderungen:
 - 1. Begrenzung der Hüllrohrtemperatur zur Vermeidung übermässiger Versprödung und Oxidation
 - 2. Sicherstellung ausreichender Restduktilität oder Restfestigkeit der Hüllrohre zur Vermeidung einer Fragmentierung

6.2.3 Brennelementstrukturspezifische Auslegungsanforderungen (inklusive Brennelement-Kasten beim Siedewasserreaktor)

6.2.3.1 Sicherheitsebenen 1 und 2 sowie Störfallkategorien 1 und 2 der Sicherheitsebene 3

Die Brennelementstruktur ist so auszulegen, dass folgende Ziele erreicht werden:

- a. Sicherstellung der spezifizierten Lage des Brennstabes im Brennelement und des Brennelementes im Reaktorkern

- b. Sicherstellung einer abriebsicheren Brennstablagerung
- c. Begrenzung von Abrieb an Strukturteilen
- d. Begrenzung von Spannungen und Dehnungen an Strukturteilen, Verbindungen und (bei Siedewasserreaktoren) am Brennelement-Kasten, u. a. aufgrund folgender Faktoren:
 - 1. Eigengewicht
 - 2. axiale Druckbeanspruchungen
 - 3. Trägheitskräfte
 - 4. hydrostatischer Auftrieb und Strömungskräfte
 - 5. Niederhaltekräfte durch die Niederhaltefedern (Druckwasserreaktoren)
 - 6. differenzielle thermische Dehnung
 - 7. differenzielles strahlungsinduziertes Wachstum
 - 8. Änderungen von Betriebszuständen
 - 9. strömungsinduzierte Schwingungen
 - 10. Einfall von Steuerelementen (Druckwasserreaktoren)
- e. Sicherstellung einer anforderungsgerechten Niederhaltfederkraft (Druckwasserreaktoren)
- f. Begrenzung mechanischer und thermischer zyklisch wechselnder Belastungen zur Vermeidung von Ermüdung
- g. Sicherstellung einer ausreichenden Duktilität
- h. Begrenzung der Korrosion
- i. Begrenzung der Wasserstoff-Aufnahme in die Brennelement-Struktur
- j. Begrenzung des differenziellen Wachstums der verschiedenen Brennelementteile
- k. Begrenzung des Abriebs (Fretting) an Kontaktpunkten der Brennelement-Struktur
- l. Begrenzung der Druckspannungen, die vom Abstandhalter auf den Brennstab ausgehen
- m. Sicherstellung des freien Fahrwegs für die Steuerelemente
- n. Vermeidung loser Teile mit Ursprung im Brennelement

6.2.3.2 Störfallkategorie 3 der Sicherheitsebene 3 und Sicherheitsebene 4a

Die Brennelementstruktur ist so auszulegen, dass folgende Ziele erreicht werden:

- a. Begrenzung der Verformungen der Abstandhalter, der Führungsrohre (Druckwasserreaktoren) und der Brennelementkästen (Siedewasserreaktoren)
- b. Begrenzung der horizontalen und vertikalen Verschiebungen

6.3 Herstellung

- a. Die Beschaffung der Brennelemente hat gemäss den im Managementsystem der Betriebsorganisation festgelegten Abläufen zu erfolgen.
- b. Die Betriebsorganisation hat sicherzustellen, dass bei der Herstellung der Brennelemente die anwendbaren schweizerischen gesetzlichen Vorschriften, behördlichen Auflagen und technischen Anforderungen eingehalten werden.
- c. Die Betriebsorganisation hat zu überprüfen, dass das Qualitätsmanagement des Brennelementelieferanten geeignet ist, die Herstellung auslegungsgemässer Brennelemente sicherzustellen.
- d. Nach abgeschlossener Lieferung ist dem ENSI für jede Nachladung respektive für jeden Satz von Vorläuferbrennelementen ein zusammenfassender Bericht einzureichen mit folgendem Inhalt:
 1. Auditplan
 2. Liste der neuen und neu qualifizierten Prozesse
 3. Konstruktionsänderungen
 4. Zusammenfassung der Abweichungsberichte inklusive der Begründung der Zulässigkeit der Abweichung
 5. Befunde und daraus abgeleitete Massnahmen
 6. zusammenfassende Beurteilung

6.4 Betrieb

- a. Für den Betrieb ist die erforderliche Wasserqualität im Primärkreislauf zur Minimierung der Strahlenexposition sowie zur Aufrechterhaltung der sicherheitstechnisch wichtigen Eigenschaften der Brennelemente und weiterer Kernbauteile zu definieren und zu überwachen.

- b. Nach Auslegungsstörfällen der Störfallkategorien 1 und 2 ist die Weiterverwendbarkeit der Brennelemente zu überprüfen.

6.4.1 Vorläufer-Brennelemente

- a. Um das anlagenspezifische Verhalten von neuen Brennelementtypen und von wesentlich geänderten Brennelementen zu bewerten, sind Vorläuferelemente einzusetzen.
- b. Liegt keine Betriebserfahrung unter vergleichbaren Bedingungen in anderen Anlagen vor, müssen vor dem Einsatz einer grösseren Anzahl Brennelemente während mindestens zwei Zyklen Vorläuferelemente eingesetzt werden. Liegt Betriebserfahrung aus anderen Anlagen vor, genügt eine Vorlaufzeit von einem Zyklus.
- c. Die Anzahl der Vorläuferelemente ist unter Berücksichtigung der Tragweite der Änderung zu begrenzen.
- d. Zusammen mit dem Einsatz von Vorläuferelementen ist ein geeignetes Inspektionsprogramm zu planen. Über Änderungen im Inspektionsplan ist das ENSI zu informieren.
- e. Der Abbrand von Vorläuferelementen und von einzelnen, im Rahmen von Bestrahlungsprogrammen eingesetzten Brennstäben darf die freigegebene maximale Abbrandlimite geringfügig überschreiten, sofern auslegungsgemässes Verhalten inklusive der Entsorgungsfähigkeit der betroffenen Brennelemente beziehungsweise Brennstäbe nachgewiesen wird. Diese Überschreitung ist freigabepflichtig.

6.4.2 Betriebsüberwachung und Betriebserfahrung

- a. Die Hüllrohrintegrität ist basierend auf Radiochemiedaten zu überwachen und durch Trendanalysen laufend zu beurteilen.
- b. Für den Leistungsbetrieb nach Hüllrohrdefekten sind radiologische Grenzwerte festzulegen.
- c. Es sind Verfahren und Methoden bereitzustellen, um Art und Schwere von Hüllrohrdefekten, deren Lage sowie deren mögliche Ursachen und die notwendigen Massnahmen zu ermitteln.
- d. Die werkspezifische und internationale Betriebserfahrung der eingesetzten Brennelemente ist zu sammeln und auszuwerten.

6.4.3 Inspektionen

- a. Das auslegungsgemässe Betriebsverhalten der Brennelemente ist mittels regelmässiger Inspektionen nachzuweisen. Über Änderungen im Inspektionsplan ist das ENSI zu informieren.
- b. Wird ein nicht auslegungsgemässer Zustand identifiziert, ist das Brennelement zu reparieren oder in einen für den Wiedereinsatz beziehungsweise für die Lagerung sicherheitstechnisch unbedenklichen Zustand zu bringen (siehe auch Kapitel 6.5.4).
- c. Inspektionen sind durch dafür qualifiziertes oder geschultes Personal gemäss den Vorgaben des Managementsystems durchzuführen und auszuwerten.
- d. Es müssen qualifizierte Inspektionseinrichtungen und Werkzeuge eingesetzt werden.
- e. Bei Inspektionen sind die Strahlenschutzvorgaben zu berücksichtigen.
- f. Es sind Strahlenschutzmassnahmen im Hinblick auf bereits vorhandene und auf plötzlich auftretende Hüllrohrdefekte vorzusehen.
- g. Die Kritikalitätssicherheit ($k_{\text{eff}} < 0,95$) während der Inspektionsarbeiten ist nachzuweisen.
- h. Die Inspektionsergebnisse sind zu dokumentieren und von der Betriebsorganisation zu bewerten.

6.5 Handhabung und Lagerung

- a. Die Handhabung von Brennelementen, Steuerelementen und Kerneinbauten darf nur mit den dafür vorgesehenen, qualifizierten Einrichtungen und Systemen und nach qualitätsgesicherten Arbeitsanweisungen erfolgen.
- b. Die Brennelement-Handhabung hat durch dafür ausgebildetes und geprüftes Personal zu erfolgen.
- c. Die Brennelemente, Steuerelemente und Kerneinbauten dürfen nur in den dafür vorgesehenen Einrichtungen gelagert werden.
- d. Es sind Strahlenschutzmassnahmen vorzusehen, insbesondere im Hinblick auf die Abschirmung, die Gebäudelüftung und den Gebäudeabschluss.
- e. Es sind Massnahmen beziehungsweise Einrichtungen vorzusehen, damit Fremdkörper nicht in den offenen Reaktordruckbehälter und in das Brennelement-Lagerbecken gelangen. Fremdkörper sind zu bergen oder es ist nachzuweisen, dass deren Verbleiben im System sicherheitstechnisch unbedenklich ist.

6.5.1 Brennelement-Wechsel

- a. Für das Umsetzen sowie das Ein- und Ausladen der Brennelemente im Reaktorkern und im Brennelement-Lagerbecken ist ein Schrittfolgeplan zu erstellen, der jede Bewegung und Position von Brennelementen, Steuerelementen und Kerneinbauten erfasst. Die Durchführung jedes einzelnen Schrittes ist zu protokollieren.
- b. Für jeden Schritt des Schrittfolgeplans ist die Einhaltung der geforderten Unterkritikalität im Reaktorkern und im Brennelement-Lagerbecken nachzuweisen.
- c. Bei Druckwasserreaktoren ist zur Einhaltung der Unterkritikalität die minimal erforderliche Borkonzentration im Reaktorkern und Brennelement-Lagerbecken sicherzustellen und zu überwachen.
- d. Bei Siedewasserreaktoren ist sicherzustellen, dass alle Steuerelemente eingefahren sind, ausser wenn Steuerelemente für Prüfungen einzeln gezogen werden. Mehrere Steuerstäbe dürfen gezogen oder entfernt werden, wenn die Brennelemente der betroffenen Kontrollzellen ausgeladen sind und keine Brennelemente in den Reaktorkern geladen werden.
- e. Während des Brennelementwechsels ist für den Reaktorkern die Überwachung des Neutronenflusses jederzeit zu gewährleisten.
- f. Es sind wirksame und zuverlässige Massnahmen und Einrichtungen zur Vermeidung von Handhabungsfehlern und Brennelementfehlpositionierungen vorzusehen.
- g. Vor dem Schliessen des Reaktordruckbehälters sind Position und Orientierung von Brennelementen, Steuerelementen und Kerneinbauten zu überprüfen und zu dokumentieren.

6.5.2 Trockene Lagerung von unbestrahlten Brennelementen

- a. Sicherheitsebenen 1 und 2: Zur Sicherstellung der Unterkritikalität muss der berechnete Neutronenmultiplikationsfaktor k_{eff} unter Einbezug aller Unsicherheiten und Toleranzen kleiner als 0,95 sein. Dabei ist im gesamten Brennelementlager derjenige Brennelementtyp zu berücksichtigen und von den möglichen Moderations- und Reflexionsbedingungen auszugehen, die unter Berücksichtigung der technischen Einrichtungen und der betrieblichen Prozesse zum höchsten k_{eff} führen.
- b. Sicherheitsebene 3: Über die Anforderungen der Sicherheitsebenen 1 und 2 hinaus muss der berechnete k_{eff} unter Einbezug aller Unsicherheiten und Toleranzen kleiner als 0,98 sein, wenn abdeckend eine Moderatordichte angenommen wird, die zum höchsten k_{eff} führt (optimale Moderation).

- c. Sicherheitsebene 4a: Der höchste berechnete k_{eff} muss unter Einbezug aller Unsicherheiten kleiner als 1,0 sein. Es dürfen realistische Randbedingungen berücksichtigt werden.
- d. Bei Brennelementen mit nicht vernachlässigbarer Wärmeleistung (MOX) muss die Kühlung sichergestellt sein.
- e. Es dürfen grundsätzlich nur Brennelemente im spezifizierten Zustand gelagert werden. Müssen Brennelemente in nicht auslegungsgemäsem Zustand gelagert werden, ist insbesondere der Einschluss radioaktiver Stoffe sicherzustellen.

6.5.3 Nasse Lagerung von Brennelementen

- a. Sicherheitsebenen 1 und 2: Der berechnete k_{eff} muss unter Einbezug aller Unsicherheiten und Toleranzen kleiner als 0,95 sein. Dabei ist im gesamten Brennelement-Lagerbecken derjenige Brennelementtyp zu berücksichtigen und von jenen Moderations- und Reflexionsbedingungen auszugehen, die unter Berücksichtigung der technischen Einrichtungen und der betrieblichen Prozesse zum höchsten k_{eff} führen. Wird dabei lösliches Bor im Kühlwasser kreditiert, muss eine ausreichende Überwachung der Borkonzentration sichergestellt und zusätzlich gezeigt werden, dass der k_{eff} unter Vernachlässigung des Bors kleiner als 1,0 bleibt.
- b. Sicherheitsebene 3: Unter Berücksichtigung der störfallbedingten Änderungen von Parametern, welche die nukleare Sicherheit beeinflussen, gelten die Anforderungen gemäss Buchstabe a.
- c. Sicherheitsebene 4a: Der höchste berechnete k_{eff} muss unter Einbezug aller Unsicherheiten kleiner als 1,0 sein. Es dürfen realistische Randbedingungen berücksichtigt werden.
- d. Wird in den Kritikalitätsanalysen der Abbrand des Brennstoffs berücksichtigt, so sind die Anforderungen der Norm DIN-25471 oder ANSI/ANS-8.27 zu erfüllen.
- e. Hinsichtlich der Kritikalitätssicherheit von Brennelementen in den Transportbehältern, die sich im Brennelement-Lagerbecken befinden, ist die Erfüllung der Anforderungen des gültigen Regelwerks beim Transport gefährlicher Güter (IAEA Safety Standard SSR-6) nachzuweisen.
- f. Die Grenzwerte für die Beckenwassertemperatur dürfen auch bei vollständiger Belegung des Brennelement-Lagerbeckens inklusive vollständiger Entladung des Reaktorkerns nicht überschritten werden. Bei der Berechnung der Wassertemperatur sind die jeweils ungünstigsten Zustände im Hinblick auf die Nachwärme und die Kühlbedingungen anzunehmen.

- g. Zur Begrenzung der Korrosion von Brennelementen, Kerneinbauten und Lagerkomponenten ist eine adäquate Wasserqualität sicherzustellen.
- h. Bei einer vorübergehenden Lagerung von defekten Brennstäben ist sicherzustellen, dass keine nennenswerten zusätzliche Kontamination des Kühlwassers und der Lagereinbauten erfolgt.
- i. Stark beschädigte Brennelemente oder Brennstäbe sind in separaten, dichten Behältnissen zu lagern.
- j. Die freie Kapazität des Brennelement-Lagerbeckens muss jederzeit die Entladung des gesamten Reaktorkerns erlauben.

6.5.4 Änderungsarbeiten an Brennelementen

- a. Die Arbeitsvorschriften für Änderungsarbeiten an Brennelementen müssen mindestens die vorgesehenen Arbeitsschritte, die zu beachtenden Sicherheitsvorschriften und die Prüfungen nach Beendigung der Arbeitsschritte beinhalten.
- b. Für Änderungsarbeiten an bestrahlten Brennelementen sind Strahlenschutzmassnahmen zu planen.
- c. Die Kritikalitätssicherheit ($k_{\text{eff}} < 0,95$) während der Änderungsarbeiten ist nachzuweisen.
- d. Die Arbeitsschritte während der Änderungsarbeiten und die Ergebnisse der Prüfungen sind zu dokumentieren.
- e. Es ist nachzuweisen, dass nach Änderungsarbeiten ein auslegungsgemäßer oder sicherheitstechnisch unbedenklicher Zustand des Brennelementes vorliegt.
- f. Melde- und Freigabepflichten bei Änderungsarbeiten an intakten und defekten Brennelementen sind im Anhang 2 aufgeführt.

6.6 Entsorgung

- a. Alle Brennelemente müssen entsorgungsfähig sein. Dafür muss ein Entsorgungskonzept (Zwischenlager, Tiefenlager) vorliegen.
- b. Entsprechend dem Entsorgungskonzept müssen mindestens folgende Angaben spezifiziert werden:
 - 1. vorgesehener Transport- beziehungsweise T/L-Behältertyp (Hersteller, Bauart) und davon abhängig die erforderliche Abklingzeit in den betrieblichen Brennelement-Lagerbecken beziehungsweise dem Nasslager vor der Überführung ins Zwischenlager

2. relevantes Nuklidinventar zum Zeitpunkt der Entladung aus dem Reaktorkern, des frühestmöglichen Beginns der Zwischenlagerung und der Einlagerung in das Tiefenlager
3. Verlauf der Nachzerfallswärmeleistung für den maximalen Brennelementabbrand im Zeitraum vom Entladen aus dem Reaktorkern bis zur Einlagerung in das Tiefenlager
4. Integritätsnachweis der Hüllrohre während der Zwischenlagerung
5. Nachweis der Endlagerfähigkeit

7 Steuerelemente

7.1 Auslegung

7.1.1 Allgemeine Anforderungen

- a. Steuerelemente sind so auszulegen, dass ihre Funktion bei der Abschaltung des Reaktorkerns, zur Aufrechterhaltung der Unterkritikalität sowie zur betrieblichen Steuerung sicher gewährleistet ist.
- b. Die Auslegung muss die während der Einsatzzeit zu erwartenden Beanspruchungen sowie Veränderungen von Werkstoffeigenschaften und der Geometrie berücksichtigen, z. B. infolge externer und interner mechanischer, thermischer, chemischer und strahlungsbedingter Einwirkungen.
- c. Erfolgt die Reaktorsteuerung mit den Steuerelementen muss sichergestellt werden, dass
 1. für die sicherheitstechnischen Anforderungen jederzeit eine ausreichende Wirksamkeitsreserve vorhanden ist (siehe auch Kapitel 5.5 Buchstabe d),
 2. die sicherheitstechnischen Anforderungen Vorrang vor den betrieblichen Anforderungen haben und
 3. die sicherheitstechnische Funktion nicht beeinträchtigt werden kann.
- d. Steuerelemente müssen inspizierbar sein.
- e. Durch geeignete Werkstoffwahl ist die Aktivierung von Materialien, die ins Kühlwasser gelangen, zu begrenzen. Dies betrifft insbesondere den Kobaltgehalt.
- f. Der Nachweis des freien Steuerelementweges (Kompatibilität) ist zu erbringen.

7.1.2 Mechanische Auslegung

- a. Die mechanische Auslegung der Steuerelemente muss die anlagenspezifischen Anforderungen bezüglich Fahrweg, Fahrgeschwindigkeit, Abschaltzeit und Zahl der Fahrschritte berücksichtigen.
- b. Bei der mechanischen Auslegung sind folgende Belastungen zu berücksichtigen:
 1. dynamische Kräfte insbesondere beim schrittweisen Fahren, bei einer Schnellabschaltung und bei Erdbeben
 2. reibungsbedingte Druck- und Zugspannungen beim Bewegen der Steuerelemente
 3. Druckaufbau durch gasförmige Reaktionsprodukte (innerer Überdruck)
 4. Schwelldehnung des Absorbers
 5. Differenz zwischen dem Steuerstab-Innendruck und dem Kühlmitteldruck
 6. Biegeschwingungen durch Kühlmittelströmung
 7. thermische Belastungen
- c. Die aus möglichen Kombinationen einzelner Belastungen resultierenden Spannungen dürfen die materialspezifischen Grenzwerte nicht übersteigen.
- d. Die Dehnung der unter Innendruck stehenden Komponenten ist so zu begrenzen, dass die Wandintegrität gewährleistet wird.
- e. Für zyklische Belastung sind die Ermüdungsgrenzen zu ermitteln und daraus die zulässige Lastwechselzahl abzuleiten.
- f. Die Wechselwirkung mit angrenzenden Anlageteilen ist zu berücksichtigen. Die mechanische Abnutzung für den vorgesehenen Betrieb ist abzuschätzen.
- g. Die mechanische Lebensdauer ist zu bestimmen.

7.1.3 Thermische Auslegung

- a. Der zulässige Innendruck darf nicht überschritten werden.
- b. Sicherheitsebene 1: Im Druckwasserreaktor ist das Sieden des Kühlmittels an der Oberfläche des Steuerelementes oder im Kühlkanal zwischen dem Führungsrohr und dem Absorberstab auszuschliessen.
- c. Das Schmelzen des Absorbers ist auszuschliessen. Kann dies für Störfallkategorie 3 der Sicherheitsebene 3 nicht gezeigt werden, muss das ausle-

gungsgemässe Verbleiben des Absorbermaterials im Steuerelement nachgewiesen werden.

7.1.4 Nukleare Auslegung

- a. Das Absorbermaterial muss die Anforderungen an die Regel- und Abschaltssysteme (Kapitel 5.5) erfüllen.
- b. Die Wirksamkeit des Absorbermaterials ist unter Berücksichtigung des Abbrands und der geplanten Fahrweise der Anlage nachzuweisen. Die nukleare Lebensdauer ist daraus abzuleiten.
- c. Beim Ersatz von Steuerelementen muss deren Wirksamkeit konsistent sein mit den Sicherheitsanalysen der Anlage für die geplante Einsatzdauer.

7.2 Herstellung

- a. Die Beschaffung der Steuerelemente hat gemäss den im Managementsystem der Betriebsorganisation festgelegten Abläufen zu erfolgen.
- b. Die Betriebsorganisation hat sicherzustellen, dass bei der Herstellung der Steuerelemente die anwendbaren schweizerischen gesetzlichen Vorschriften, behördlichen Auflagen und technischen Anforderungen eingehalten werden.
- c. Die Betriebsorganisation hat zu überprüfen, dass das Qualitätsmanagement des Lieferanten geeignet ist, um die Herstellung auslegungsgemässer Steuerelemente sicherzustellen.
- d. Nach abgeschlossener Lieferung ist dem ENSI für jede Kampagne ein zusammenfassender Bericht mit folgendem Inhalt einzureichen:
 1. Auditplan
 2. Liste der neuen und neu qualifizierten Prozesse
 3. Konstruktionsänderungen
 4. Zusammenfassung der Abweichungsberichte inklusive der Begründung der Zulässigkeit der Abweichung
 5. Befunde und daraus abgeleitete Massnahmen
 6. zusammenfassende Beurteilung

7.3 Betrieb

- a. Der Absorberabbrand und die mechanische Lebensdauer sind zu überwachen.

- b. Die werkspezifische und internationale Betriebserfahrung der eingesetzten Steuerelemente ist zu sammeln und auszuwerten.
- c. Basierend auf den der Auslegung zugrunde gelegten Einsatzzeiten und der Betriebserfahrung sind Einsatz und Ersatz von Steuerelementen zu planen.

7.3.1 Vorläufer-Steuerelemente

- a. Um das anlagenspezifische Verhalten von neuen Steuerelementtypen und von wesentlich geänderten Steuerelementen zu bewerten, sind Vorläuferelemente einzusetzen.
- b. Liegt keine Betriebserfahrung unter vergleichbaren Bedingungen in anderen Anlagen vor, müssen vor dem Einsatz einer grösseren Anzahl Steuerelemente während mindestens zwei Zyklen Vorläuferelemente eingesetzt werden. Liegt Betriebserfahrung aus anderen Anlagen vor, genügt eine Vorlaufzeit von einem Zyklus.
- c. Die Anzahl der Vorläuferelemente ist unter Berücksichtigung der Tragweite der Änderung zu begrenzen.
- d. Zusammen mit dem Einsatz von Vorläuferelementen ist ein geeignetes Inspektionsprogramm zu planen. Über Änderungen im Inspektionsplan ist das ENSI zu informieren.

7.3.2 Inspektionen

- a. Mittels regelmässiger Inspektionen ist die Einsatztauglichkeit der Steuerelemente zu überprüfen. Über Änderungen im Inspektionsplan ist das ENSI zu informieren.
- b. Wird ein nicht auslegungsgemässer Zustand identifiziert, ist das betreffende Steuerelement zu ersetzen oder zu reparieren. Soll ein betroffenes Steuerelement für begrenzte Zeit weiterbetrieben werden, ist der Nachweis zur ungestörten Erfüllung der Schutzzielfunktion zu erbringen.
- c. Inspektionen sind durch dafür qualifiziertes oder geschultes Personal gemäss den Vorgaben des Managementsystems durchzuführen und auszuwerten.
- d. Es müssen qualifizierte Inspektionseinrichtungen und Werkzeuge eingesetzt werden.
- e. Bei Inspektionen sind die Strahlenschutzvorgaben zu berücksichtigen.
- f. Die Inspektionsergebnisse sind zu dokumentieren und von der Betriebsorganisation zu bewerten.

8 Liste der Verweisungen

DIN-25471, Kritikalitätssicherheit unter Anrechnung des Brennelementabbrands bei der Lagerung und Handhabung von Brennelementen in Brennelementlagerbecken von Kernkraftwerken mit Leichtwasserreaktoren, Mai 2009

ANSI/ANS-8.27, Burnup Credit for LWR Fuel, 2008

IAEA Safety Standard SSR-6, Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material, 2012

Diese Richtlinie wurde am 29. Januar 2015 vom ENSI verabschiedet.

Der Direktor des ENSI: sig. H. Wanner

Anhang 1: Begriffe (gemäss ENSI-Glossar)

Abschaltreaktivität

Die Abschaltreaktivität ist die Reaktivität des durch Abschaltung mit den hierfür vorgesehenen Systemen in den unterkritischen Zustand gebrachten Reaktorkerns.

Abschaltsystem

Ein Abschaltsystem ist ein System, welches in der Lage ist, den Reaktorkern in den unterkritischen Zustand zu überführen und in diesem Zustand zu halten.

Brennelement

Das Brennelement besteht aus Bauteilen wie den Abstandhaltern und den Brennstäben. Alle Bauteile des Brennelementes mit Ausnahme der Brennstäbe bilden die Brennelementstruktur.

Brennstab

Der Brennstab ist ein beidseitig verschlossenes, mit Kernbrennstoff gefülltes gasdichtes Rohr.

empirische Korrelation

Empirische Korrelationen stellen einen aus Experimenten gewonnenen Zusammenhang zwischen physikalischen Eingangs- und Ausgangsgrössen dar. Diese können Funktionen oder Tabellen sein.

k_{eff}

Der Neutronenmultiplikationsfaktor k_{eff} gibt das rechnerisch bestimmte Verhältnis der Neutronenproduktion zu den Neutronenverlusten durch Absorption und Leckage in einem abgegrenzten System an. Ist die Neutronenquelle und -senke im Gleichgewicht, stellt sich eine sich selbst erhaltende Neutronenproduktion ein und man spricht vom kritischen Zustand des Systems. In anderen Fällen spricht man von unterkritischen ($k_{\text{eff}} < 1$) oder überkritischen ($k_{\text{eff}} > 1$) Zuständen.

Kriterium

Ein Kriterium ist ein mathematischer Ausdruck (Gleichung, Ungleichung), der eindeutig das Verhältnis zwischen einer sicherheitstechnischen Kenngrösse, der zu berücksichtigenden Unsicherheiten und dem Grenzwert angibt und der einen definierten Gültigkeitsbereich besitzt.

kritische Siedezustände

Ein kritischer Siedezustand liegt sowohl bei Einsetzen des Filmsiedens (departure from nucleate boiling, DNB) als auch bei Einsetzen des Austrocknens der Heizflächen (dryout) vor.

Reaktivitätsstörfall (Reactivity Initiated Accident, RIA)

Ein Reaktivitätsstörfall ist ein Störfall, der dadurch verursacht wird, dass dem Reaktorkern unbeabsichtigt Reaktivität zugeführt wird.

Reaktorkern

Der Reaktorkern umfasst die zum Reaktor gehörenden Brennelemente, Steuerelemente und Neutronenmesssysteme mit Instrumentierungslanzen.

Sicherheitsebene 4a

Die Sicherheitsebene 4a ist jener Teil der Sicherheitsebene 4, der auf präventives Accident Management ausgerichtet ist. Ziel der Sicherheitsebene 4a ist es, auslegungsüberschreitende Ereignisse ohne Kernschmelzen beziehungsweise Brennelementschmelzen im Lager zu beherrschen.

sicherheitstechnische Kenngrößen

Sicherheitstechnische Kenngrößen sind physikalische Größen, welche den sicherheitstechnischen Status eines Systems eindeutig charakterisieren.

sicherheitstechnische Parameter

Sicherheitstechnische Parameter sind Größen, Variablen oder Randbedingungen, die einen wesentlichen Einfluss auf die sicherheitstechnischen Kenngrößen oder Ergebnisse der Analysen haben.

Steuerelement

Ein Steuerelement dient als Neutronenabsorber sowohl zum Abschalten des Reaktorkerns als auch zur Leistungsregelung. Es besteht aus der Steuerelementstruktur und dem Absorber.

Validierung

Validierung ist der Prozess des Nachweises, dass die Eigenschaften eines Rechenmodells im Hinblick auf dessen beabsichtigte Nutzung die abzubildenden realen Gegebenheiten ausreichend genau reproduzieren.

Verifikation

Verifikation ist der Prozess des Nachweises, dass das implementierte Rechenmodell dessen konzeptionelle Beschreibung (Spezifikation) richtig wiedergibt.

Anhang 2: Änderungsarbeiten an Brennelementen

Kategorie	Art der Änderungsarbeiten	Meldepflichten	Freigabepflichten
I	Änderungsarbeiten an defekten Brennelementen mit Brennstabschäden, aus denen Aktivität freigesetzt wurde	<ul style="list-style-type: none"> Vorkommnis (Kapitel 5.1.1.2 Buchstabe e der Richtlinie ENSI-B03) 	<ul style="list-style-type: none"> Instandsetzung Wiedereinsatz
II	Änderungsarbeiten an defekten Brennelementen, aus denen keine Aktivität freigesetzt wurde	<ul style="list-style-type: none"> Vorkommnis (Kapitel 5.1.1.2 Buchstabe e der Richtlinie ENSI-B03) 	<ul style="list-style-type: none"> Wiedereinsatz
III	Änderungsarbeiten an intakten Brennelementen		<ul style="list-style-type: none"> Wiedereinsatz

Beispiele

Instandsetzungsarbeiten infolge Brennstabschäden mit Aktivitätsfreisetzung fallen in die **Kategorie I**. Das Entkasten und das Ziehen von Teilbündeln bei Siedewasserreaktor-Brennelementen im Rahmen einer visuellen Inspektion von Brennelementen mit Brennstabschäden zählen nicht zur Instandsetzung.

Instandsetzungsarbeiten infolge Brennelementschäden ohne Aktivitätsfreisetzung fallen in die **Kategorie II**.

Änderungsarbeiten an intakten Brennelementen im Rahmen von Inspektionen gemäss Inspektionsprogramm (z. B. De- und Remontage) fallen in die **Kategorie III**.

Ein prophylaktischer Austausch von Brennelementkomponenten auf Grund von nicht meldepflichtigen Befunden fällt in die **Kategorie III**.

Ein Austausch von Brennelementkomponenten einschliesslich Brennstäben für externe Inspektionen (z. B. Untersuchungen in den Heissen Zellen) fällt in die **Kategorie III**.

Ein Austausch von Brennstäben im Rahmen eines Second-Life-Brennstabprogramms fällt in **Kategorie III**.

ENSI, CH-5200 Brugg, Industriestrasse 19, Telefon +41 56 460 84 00, info@ensi.ch, www.ensi.ch