

**Untersuchungen zu
Einwirkungen von innen
und außen während
des Nachbetriebs**

Untersuchungen zu Einwirkungen von innen und außen während des Nachbetriebs

**Verónica Campo-Arnaíz
Christian Strack
Gernot Thuma**

April 2021

Anmerkung:

Das diesem Bericht zugrunde liegende Forschungsvorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) unter dem Förderkennzeichen 4716R01322 durchgeführt.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der GRS.

Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung der GRS wieder und muss nicht mit der Meinung des BMU übereinstimmen.

Deskriptoren

Einwirkungen von außen, Naturbedingte EVA, Nichtleistungsbetrieb, Stilllegung

Kurzfassung

Der Schutz von Kernkraftwerken gegen naturbedingte Einwirkungen von außen (EVA) ist von zentraler Bedeutung für die nukleare Sicherheit und zum Schutz von Menschen und Umwelt vor der schädlichen Wirkung ionisierender Strahlung. Der Schutz gegen naturbedingte EVA ist auch in der Phase nach Beendigung des Leistungsbetriebs für längere Zeiträume notwendig, um einen sicheren Nichtleistungsbetrieb und eine sichere Stilllegung zu gewährleisten und Freisetzungen auch unterhalb der zulässigen Grenzen so weit als möglich zu reduzieren.

Der vorliegende Bericht befasst sich mit dem Schutz von Kernkraftwerken gegen naturbedingte Einwirkungen von außen im langfristigen Nichtleistungsbetrieb und der Stilllegung. Dabei wird der Tatsache Rechnung getragen, dass sich im langfristigen Nichtleistungsbetrieb und der Stilllegung die Anlagensituation mehr und mehr vom Leistungsbetrieb unterscheidet. Grundsätzlich ist der Aspekt der sich stetig verringerten Nachzerfallsleistung zu nennen, durch den sich auch die Anforderungen an die Nachwärmeabfuhr reduzieren. Ebenso werden auch die sich verändernden Anlagenbedingungen, z. B. erste Abbaumaßnahmen oder vorbereitende Arbeiten für den Stilllegung und Abbau berücksichtigt. Ein weiterer Punkt sind Szenarien für naturbedingte EVA, die unter den veränderten Randbedingungen des langfristigen Nichtleistungsbetriebs und der Stilllegung ggf. neu hinzukommen oder einen geänderten Einfluss auf die nukleare Sicherheit besitzen.

Durch die sich stetig verringernde Nachzerfallsleistung werden insbesondere Anforderungen an die für die Nachwärmeabfuhr benötigten Sicherheitssysteme geringer und gleichzeitig erhöhen sich Karenzzeiten vor Erreichen unzulässiger Zustände. Unter diesen Randbedingungen sind Betrachtungen zu verfügbaren Karenzzeiten und damit möglichen Reparaturzeiten oder Zeiten bis zur Wirksamkeit von Ersatzmaßnahmen von zentraler Bedeutung, um das angestrebte hohe Sicherheitsniveau zu erhalten.

Durch vorbereitende Arbeiten bzw. den beginnenden Abbau gibt es möglicherweise neue Gefährdungsszenarien durch naturbedingte EVA, sofern solche Einwirkungen nicht im Vorfeld durch eine sorgfältige Planung berücksichtigt wurden. Neue Szenarien können sich z. B. aus einer veränderten Lagerung von radioaktiven Materialien auf dem Anlagengelände ergeben oder aus einer Beeinträchtigung von Sicherheitseinrichtungen oder Schutzmaßnahmen gegen naturbedingte EVA.

Abstract

The protection of nuclear power plants against natural hazards is an essential aspect of nuclear safety and the protection of humans and the environment from the harmful effects of ionizing radiation. Protection against natural hazards is also needed for longer time periods to ensure a safe non-power operation and decommissioning phase and to reduce radioactive releases to levels as low as reasonably achievable.

This report deals with the protection of nuclear power plants against natural hazards during longer lasting non-power operation and decommissioning phases. The continuous changing situation in the plant and the growing deviation from the power operation state is taken into account. A major aspect in these phases is the continuous decrease in decay heat and, thereby, the requirements for heat removal are reduced. Further aspects comprise, e. g., preparatory works for decommissioning and the decommissioning itself which changes the boundary conditions for the assessment of natural hazards. Additionally, scenarios concerning natural hazards are assessed in which, due to the changing plant conditions, natural hazards have different impacts on the plant compared to power operation.

Due to continuously decreasing decay heat the requirements for safety systems for heat removal are reduced and grace periods become longer. In this phase considerations with respect to existing grace periods and thus available repair times or time for alternative ways to restore heat removal are a central consideration for achieving a constantly high level of safety.

Due to preparatory works for decommissioning or decommissioning itself, new or changed impact scenarios for natural hazards may arise, if the assessment of natural hazards is not adjusted accordingly. New or changed impact scenarios may arise from, e. g., changed or additional storage of radioactive materials or from an impairment of safety systems or protection measures against natural hazards.

Inhaltsverzeichnis

	Kurzfassung	I
	Abstract.....	III
1	Einleitung.....	1
2	Stand von Wissenschaft und Technik.....	3
3	Schutzkonzept gegen naturbedingte Einwirkungen von außen	5
3.1	Sicherheitsziel und Schutzziele.....	5
3.2	Zu betrachtende Anlagenzustände	5
3.3	Erforderliche Funktionen von Systemen und Komponenten	6
3.4	Zu schützende Gebäude, Strukturen und Einrichtungen	10
3.5	Redundanzanforderungen	11
3.5.1	Anlagenzustand A	11
3.5.2	Anlagenzustände B und C	13
3.5.3	Anlagenzustand D	13
4	Karenzzeiten, Reparatur- und Ersatzmaßnahmen	15
4.1	Karenzzeiten	15
4.1.1	Annahmen zur Abschätzung der verfügbaren Karenzzeiten.....	15
4.1.2	Ergebnisse der Karenzzeitabschätzung.....	17
4.2	Durchführbarkeit von Reparatur- oder Ersatzmaßnahmen	18
4.2.1	Reparaturmaßnahmen an Systemen während und nach naturbedingten EVA.....	18
4.2.2	Ersatzmaßnahmen für ausgefallene Systemfunktionen während und nach naturbedingten EVA	19
5	Zulässigkeit der Außerbetriebnahme von Sicherheitseinrichtungen	21
5.1	Anlagenzustand A	22

5.1.1	Sicherstellung der Unterkritikalität.....	22
5.1.2	Sicherstellung der Nachwärmeabfuhr	23
5.1.3	Einschluss der radioaktiven Stoffe	23
5.2	Anlagenzustände B und C	24
5.2.1	Sicherstellung der Unterkritikalität.....	24
5.2.2	Sicherstellung der Nachwärmeabfuhr	24
5.2.3	Einschluss der radioaktiven Stoffe	26
5.3	Anlagenzustand D.....	27
6	Im langfristigen Nichtleistungsbetrieb und in der Stilllegung neu hinzukommende beziehungsweise geänderte EVA-Szenarien.....	29
6.1	Veränderte Lagerung von radioaktiven Materialien.....	29
6.1.1	Lagerung auf dem freien Anlagengelände	29
6.1.2	Lagerung von radioaktiven Stoffen in bisher nicht dafür genutzten Gebäuden	31
6.2	Beeinträchtigung von Maßnahmen zur Beherrschung von EVA durch Abbaumaßnahmen oder vorbereitende Arbeiten	32
6.2.1	Beeinträchtigung von Sicherheitseinrichtungen	32
6.2.2	Beeinträchtigung von Schutzmaßnahmen	33
6.3	Naturbedingte Einwirkungen von außen, deren Bedeutung sich im langfristigen Stillstand (potenziell) ändert	34
7	Zusammenfassung	35
	Literaturverzeichnis	39
	Abbildungsverzeichnis	41
	Tabellenverzeichnis	41
	Abkürzungsverzeichnis	43

1 Einleitung

Der vorliegende Bericht untersucht naturbedingte Einwirkungen von außen (EVA) im langfristigen Nichtleistungsbetrieb und in der Stilllegung. Auch im Stillstand geht von einer abgeschalteten Anlage noch eine erhebliche Gefährdung aus. Lange nach Beendigung des Leistungsbetriebes müssen noch zahlreiche Schutzmaßnahmen und Sicherheitseinrichtungen vorhanden sein bzw. betrieben werden.

Ausgehend von einer kurzen Darstellung des anzuwendenden Standes von Wissenschaft und Technik in Kapitel 2 wird in Kapitel 3 zunächst das Schutzkonzept gegen naturbedingte Einwirkungen von außen einer näheren Betrachtung unterzogen. Dabei werden die zu betrachtenden Anlagenzustände festgelegt und die zur Erfüllung der Schutzziele in den einzelnen Anlagenzuständen erforderlichen Systemfunktionen abgeleitet. Im Weiteren werden die gegen naturbedingte Einwirkungen von außen zu schützenden Gebäude, Strukturen und Einrichtungen ermittelt. Die Redundanzanforderungen werden abhängig vom zu betrachtenden Anlagenzustand dargestellt.

In Kapitel 4 werden Karenzzeiten sowie Reparatur- und Ersatzmaßnahmen näher beleuchtet. Am Beispiel eines vollbeladenen Brennelementlagerbeckens werden zur Verfügung stehende Karenzzeiten abgeschätzt. Im Weiteren wird die Durchführbarkeit von Reparatur- und Ersatzmaßnahmen untersucht. Dabei stehen die Randbedingungen zur Durchführung von Reparatur- oder Ersatzmaßnahmen im Fokus. Zusätzlich werden die deterministischen Ausfallpostulate in die Betrachtung mit einbezogen.

In Kapitel 5 wird die Zulässigkeit der Außerbetriebnahme von Sicherheitseinrichtungen im langfristigen Nichtleistungsbetrieb und in der Stilllegung untersucht. Dabei werden die Schutzziele jeweils getrennt für die zu betrachtenden Anlagenzustände untersucht.

In Kapitel 6 werden Szenarien von naturbedingten Einwirkungen von außen, die im langfristigen Nichtleistungsbetrieb und in der Stilllegung neu hinzukommen bzw. eine geänderte Bedeutung haben, einer näheren Betrachtung unterzogen. Dabei werden Szenarien, die sich aus einer geänderten Lagerung von radioaktiven Materialien auf der Anlage ergeben, genauso betrachtet wie eine Beeinträchtigung der Sicherheitseinrichtungen oder der Schutzmaßnahmen gegen naturbedingte Einwirkungen von außen. Des Weiteren betrachtet werden Szenarien von naturbedingten Einwirkungen von außen, die im langfristigen Nichtleistungsbetrieb und in der Stilllegung ihre Bedeutung verändern.

2 Stand von Wissenschaft und Technik

Der anzuwendende Stand von Wissenschaft und Technik ergibt sich aus dem heranzuziehenden Regelwerk zur Bewertung der Sicherheit kerntechnischer Anlagen. In Bezug auf Kernkraftwerke, die sich im Nichtleistungsbetrieb befinden, ist dieser Stand in Deutschland grundsätzlich gegeben durch die Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke /BMU 15/ und das darunter untergeordnete Regelwerk, insbesondere durch die Sicherheitstechnischen Regeln des Kerntechnischen Ausschusses (KTA).

Befinden sich Anlagen im (langfristigen) Nichtleistungsbetrieb in der Vorbereitung auf die Stilllegung, so ist grundsätzlich weiterhin dasselbe Regelwerk anwendbar, jedoch nur noch sinngemäß, d. h. auf diejenigen Teile, die unter den geänderten Randbedingungen zur Aufrechterhaltung der sicherheitstechnischen Schutzziele notwendig sind.

Befinden sich die Anlagen in der Stilllegung, so sind nach Stilllegungsleitfaden des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) /BMU 16/ weiterhin die Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke /BMU 15/ schutzzielorientiert einzuhalten. Das untergeordnete Regelwerk des kerntechnischen Ausschusses ist in Teilen einzuhalten und in anderen Teilen schutzzielorientiert anzuwenden.

Mit Bezug auf die Kühlung der Brennelemente im Lagerbecken hat die RSK zwei Stellungnahmen verfasst, die sich mit Anforderungen an die passive Kühlung der Brennelemente im Lagerbecken /RSK 19/ bzw. mit Anforderungen an die Kühlung der Brennelemente im Restbetrieb bei verminderter Wärmelast im Lagerbecken befassen /RSK 20/.

3 Schutzkonzept gegen naturbedingte Einwirkungen von außen

3.1 Sicherheitsziel und Schutzziele

Gemäß Abschnitt 0 „Grundsätze“ der Sicherheitsanforderung an Kernkraftwerke /BMU 15/ ist das grundlegende Sicherheitsziel der Schutz von Mensch und Umwelt vor den schädlichen Auswirkungen ionisierender Strahlung. Dieses Ziel gilt für alle Aktivitäten von der Planung über Errichtung und Betrieb bis zur Stilllegung eines Kernkraftwerks.

Aus diesem grundlegenden Sicherheitsziel des Abschnitts 0 der Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke werden in Abschnitt 2.3 die folgenden Schutzziele abgeleitet:

- Kontrolle der Reaktivität,
- Kühlung der Brennelemente und
- Einschluss der radioaktiven Stoffe.

Diese Schutzziele sind im Nachbetrieb uneingeschränkt einzuhalten. Da die Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke gemäß Stilllegungsleitfaden /BMU 16/ auch in der Stilllegung schutzzielorientiert angepasst anzuwenden sind, ergibt sich in der Betrachtung kein wesentlicher Unterschied zwischen Nachbetrieb und der ersten Stilllegungsphase bis zur Brennstofffreiheit der Anlage.

3.2 Zu betrachtende Anlagenzustände

Für die Zwecke dieses Berichts werden die folgenden Anlagenzustände nach der endgültigen Beendigung des Leistungsbetriebs betrachtet:

- Anlagenzustand A: Brennelementlagerbecken (BLB) mit älteren Brennelementen und letzter Kern noch im Reaktordruckbehälter (RDB)
- Anlagenzustand B: Vollbeladenes BLB mit älteren Brennelementen und letztem Kern
- Anlagenzustand C: Teilbeladenes BLB, ältere Brennelemente bereits in Lagerbehälter umgeladen und aus dem Becken entfernt
- Anlagenzustand D: Leeres BLB, Anlage kernbrennstofffrei

Diese Anlagenzustände reflektieren den graduellen Übergang vom Ende des Volllastbetriebs bis zur Kernbrennstofffreiheit der Anlage. Mit sich veränderndem Anlagenzustand ändern sich auch die Anforderungen daran, welche Funktionen von Systemen und Komponenten noch erforderlich sind, um die Schutzziele einzuhalten. Die Anlagenzustände A bis D sind nicht identisch mit den Betriebsphasen A bis F der Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke /BMU 15/.

3.3 Erforderliche Funktionen von Systemen und Komponenten

Im Folgenden werden die System- bzw. Komponentenfunktionen unterteilt nach den passiven Eigenschaften „Standicherheit“ und „Integrität“ und der aktiven Eigenschaft „Funktionsfähigkeit“. Dabei ist die passive Eigenschaft „Standicherheit“ so zu verstehen, dass das betroffene System bzw. die betroffene Komponente an seiner bzw. ihrer Position verbleiben muss, um die sicherheitstechnische Funktion zu erfüllen. Die passive Eigenschaft „Integrität“ ist so zu verstehen, dass betroffene Systeme und Komponenten nicht nur standsicher sein müssen, sondern zudem noch eingeschlossene Medien weiterhin einschließen können. Die aktive Eigenschaft „Funktionsfähigkeit“ schließt die passiven Eigenschaften „Standicherheit“ und „Integrität“ mit ein und fordert zudem, dass aktive Komponenten wie z. B. Armaturen und Pumpen ihre aktiven Funktionen erfüllen.

Die passiven Funktionen „Standicherheit“ und „Integrität“ erfordern keine weiteren Hilfsfunktionen wie z. B. elektrische Energieversorgung oder Leittechnik. Die aktive Funktion „Funktionsfähigkeit“ erfordert hingegen solche Hilfsfunktionen.

Aus den in Abschnitt 3.1 genannten Schutzzielen und den Anforderungen in Abschnitt 2.4 der Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke folgt, dass Funktionen von Systemen und Komponenten, die der Kontrolle der Reaktivität, der Kühlung der Brennelemente und dem Einschluss radioaktiver Stoffe dienen, auch nach naturbedingten EVA im erforderlichen Umfang erhalten bleiben müssen. Aus übergeordneter Sicht müssen also nach Beendigung des Leistungsbetriebs (Anlagenzustand A) auch während oder nach naturbedingter EVA folgende Funktionen erhalten bleiben bzw. in den verfügbaren Karenzzeiten wiederhergestellt werden können:

- Sicherstellung Unterkritikalität im Reaktorkern und im BLB
 - Steuerstäbe eingefahren und gegen Ausfahren gesichert
 - Im DWR: Borierung des Reaktorkühlmittels und ggf. des BLBs funktionsfähig
 - Standicherheit Brennelementelagergestelle im BLB

- Kühlung der Brennelemente
 - Kühlsysteme für RDB und BLB funktionsfähig
 - Sicherstellung des Kühlmittelinventars in RDB und BLB

- Einschluss der radioaktiven Stoffe
 - Integrität des RDBs und des SHBs
 - Durchdringungsabschluss funktionsfähig
 - Unterdruckhaltung im Kontrollbereich (soweit erforderlich)

Die Anzahl der erforderlichen Funktionen zur Erreichung der Schutzziele reduziert sich nach und nach mit dem Übergang zwischen den Anlagenzuständen A bis D. Die nachfolgende Tabelle Tab. 3.1 gibt einen Überblick über die erforderlichen Funktionen zur Sicherstellung der Schutzziele in den Anlagenzuständen A bis D.

Die erforderlichen aktiven Systemfunktionen zur Erfüllung der Schutzziele sind während des Leistungsbetriebes gemäß Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke /BMU 15/ während und nach EVA zumindest durch Sicherheitseinrichtungen der Sicherheits-ebene 3 sicherzustellen. Für die meisten EVA ist zudem ein Notstromfall zu unterstellen. Mit Übergang vom Leistungsbetrieb zum Nachbetrieb bzw. in die Stilllegung ändert sich daran zunächst nichts. Auch hier ist die Erfüllung der Schutzziele durch geeignete Sicherheitseinrichtungen sicher zu stellen.

Tab. 3.1 Zusammenstellung der erforderlichen Funktionen von Systemen und Komponenten zur Sicherstellung der Schutzziele

Anlagen- zustand	Erforderliche Funktion					
	Kontrolle Reaktivität		Kühlung Brennelemente		Einschluss radioaktiver Stoffe	
	DWR	SWR	DWR	SWR	DWR	SWR
A	Borierung RDB, Steuerstäbe eingefahren Ggf. Borierung BLB Standsicherheit Brennelemente- lagergestelle	Steuerstäbe eingefahren Vergiftungssystem? Standsicherheit Brennelemente- lagergestelle	Kühlung RDB, Sicherstellung Kühlmittelinventar RDB, Kühlung BLB Sicherstellung Kühlmittelinventar BLB	Kühlung RDB, Sicherstellung Kühl- mittelinventar RDB, Kühlung BLB Sicherstellung Kühl- mittelinventar BLB	Integrität Brennstabhülle Integrität SHB Integrität RDB Durchdringungs- abschluss Unterdruckhaltung Kontrollbereich	Integrität Brennstabhülle Integrität SHB Integrität RDB Durchdringungs- abschluss Unterdruckhaltung Kontrollbereich
B	Ggf. Borierung BLB Standsicherheit Brennelemente- lagergestelle	Standsicherheit Brennelemente- lagergestelle	Kühlung BLB Sicherstellung Kühlmittelinventar BLB	Kühlung BLB Sicherstellung Kühl- mittelinventar BLB	Integrität SHB Durchdringungs- abschluss Unterdruckhaltung Kontrollbereich	Unterdruckhaltung Kontrollbereich
C	Ggf. Borierung BLB Standsicherheit Brennelemente- lagergestelle	Standsicherheit Brennelemente- lagergestelle	Kühlung BLB Sicherstellung Kühlmittelinventar BLB	Kühlung BLB Sicherstellung Kühl- mittelinventar BLB	Integrität SHB Durchdringungs- abschluss Unterdruckhaltung Kontrollbereich	Unterdruckhaltung Kontrollbereich
D	Keine	Keine	Keine	Keine	Unterdruckhaltung Kontrollbereich oder gerichtete Luftströmung	Unterdruckhaltung Kontrollbereich oder gerichtete Luftströmung

Zur Sicherstellung der erforderlichen Funktionen zur Erreichung der Schutzziele sind diverse aktive und passive System- und Komponentenfunktionen erforderlich. Diese werden nachfolgend aufgeführt.

Zur Sicherstellung, dass Steuerstäbe eingefahren sind und bleiben, sind erforderlich:

- Stellungskontrolle der Steuerstäbe funktionsfähig,
- Überwachung des Kernzustandes im RDB (Neutronenfluss, Temperatur, Druck) funktionsfähig.

Zur Sicherstellung der Borierung des Reaktorkühlmittels im RDB und ggf. auch der Borierung des Kühlmittels im BLB sind erforderlich:

- Überwachung der Borierung (Borkonzentration) funktionsfähig,
- Überwachung des Kernzustandes im RDB (Neutronenfluss, Temperatur, Druck) funktionsfähig,
- Einspeisung von Borsäure in RDB und ggf. BLB funktionsfähig.

Zur Sicherstellung der Kühlung des RDBs und des BLBs sind erforderlich:

- Kühlsysteme einschließlich zugehöriger Nachkühlkette für RDB und BLB funktionsfähig,
- Temperaturüberwachung im RDB und BLB funktionsfähig.

Zur Sicherstellung des Kühlmittelinventars des RDBs und des BLBs sind erforderlich:

- Integrität des RDBs und des BLBs,
- Integrität der Kühlsysteme,
- Systeme zur Ergänzung des Kühlmittelinventars funktionsfähig,
- Füllstandsüberwachung im RDB und BLB funktionsfähig.

Zur Sicherstellung des Durchdringungsabschlusses sind erforderlich:

- Integrität des SHBs,
- Funktionsfähigkeit aller Schleusen und Durchdringungsabschlussarmaturen,

- Instrumentierung zur Überwachung (z. B. Strahlungsmessungen) funktionsfähig.

Zur Sicherstellung der Unterdruckhaltung im Kontrollbereich sind erforderlich:

- Lüftungssysteme im Kontrollbereich funktionsfähig,
- Instrumentierung zur Druckmessung funktionsfähig.

Zur Sicherstellung der Funktionsfähigkeit aktiver Systeme und Komponenten (Instrumentierung, Kühl- und Lüftungssysteme und Armaturen) sind des Weiteren erforderlich:

- Elektrische Energieversorgung einschließlich Notstromversorgung zum Betrieb der Pumpen und Armaturen,
- Leittechnik zur Erfassung des Anlagenzustandes und Steuerung der Systeme und Komponenten,
- Hilfssysteme wie Druckluft- oder Schmierölsysteme.

Die System- und Komponentenfunktionen (Standicherheit, Integrität und Funktionsfähigkeit) sind durch wiederkehrende Prüfungen, Wartungen und Instandhaltungen zu gewährleisten.

3.4 Zu schützende Gebäude, Strukturen und Einrichtungen

Das dritte Schutzziel aus Abschnitt 3.1 fordert den Einschluss radioaktiver Stoffe. Daraus folgt, dass radioaktives Inventar in Gebäuden oder in gesonderten Behältern von der Umgebung abgeschlossen werden muss. Diese Anforderung gilt auch im Fall von naturbedingten Einwirkungen von außen (EVA).

Um den Einschluss des radioaktiven Inventars sicherzustellen, muss zumindest eine Barriere um das Inventar intakt bleiben. Für Gebäude, die radioaktives Inventar umschließen, bedeutet dies, dass die Standicherheit und Integrität der Gebäude durch naturbedingte EVA nicht beeinträchtigt werden darf oder der Verlust von Standicherheit oder Integrität nicht zu einer unzulässigen Freisetzung führen darf.

Demzufolge sind alle Gebäude, in denen radioaktive Stoffe vorhanden sind, gegen naturbedingte EVA derart zu schützen, dass eine Freisetzung von radioaktiven Stoffen aus diesen Gebäuden verhindert wird oder auf ein zulässiges Maß beschränkt bleibt.

Ist radioaktives Inventar außerhalb von Gebäuden gelagert, z. B. in Containern auf dem Anlagengelände, so sind auch diese Einrichtungen im obigen Sinne gegen naturbedingte Einwirkungen von außen zu schützen.

Des Weiteren müssen Gebäude, in denen Systeme oder Komponenten zur Sicherstellung der Schutzziele verbaut sind, zumindest auf Standsicherheit meist aber auch auf Integrität nach naturbedingten EVA ausgelegt sein. Die zu schützenden Gebäude ergeben sich aus den erforderlichen System- und Komponentenfunktionen und den daraus abgeleiteten Systemen gemäß Abschnitt 3.3.

3.5 Redundanzanforderungen

In den Abschnitten 3.1 bis 3.4 wurden der Umfang der gegen naturbedingte EVA zu schützenden Gebäude und Einrichtungen sowie der erforderlichen System- und Komponentenfunktionen zur Erreichung der Schutzziele abgeleitet. Aus den erforderlichen System- und Komponentenfunktionen ergaben sich weitere Anforderungen an Messtechnik, Leittechnik und elektrische Energieversorgung.

Die Abschnitte 3.1 bis 3.4 machen jedoch keine Aussagen darüber, mit welchem Redundanzgrad einzelne System- oder Komponentenfunktionen in den verschiedenen Anlagenzuständen aus sicherheitstechnischer Sicht vorhanden sein müssen. In den folgenden Abschnitten 3.5.1 bis 3.5.3 werden die Redundanzanforderungen für die erforderlichen System- und Komponentenfunktionen in den Anlagenzuständen A bis D schutzzielorientiert aus den Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke /BMU 15/ für den Nachbetrieb und die Stilllegung abgeleitet.

3.5.1 Anlagenzustand A

Der Anlagenzustand A ist definiert als „Brennelementlagerbecken (BLB) mit älteren Brennelementen und letzter Kern noch im Reaktordruckbehälter (RDB)“. Dieser Zustand beschreibt die Anlage unmittelbar nach der Beendigung des Leistungsbetriebes bis zur Vollentladung des Kerns in das BLB. Dies entspricht den Betriebsphasen B „Heiß unterkritisch“, C „Kalt unterkritisch, Reaktorkühlkreislauf druckdicht“, D „Kalt unterkritisch, Reaktorkühlkreislauf nicht druckdicht“ oder E „Brennelementewechsel“ der Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke /BMU 15/. Diese Zustände innerhalb des Anlagenzustandes A werden im Weiteren mit A_B , A_C , A_D bzw. A_E bezeichnet. A_B bezeichnet dabei

Anlagenzustand A, Betriebsphase B. Entsprechend sind auch die restlichen Bezeichnungen zu verstehen.

In der Betriebsphase B enthalten die Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke /BMU 15/ die gleichen Redundanzanforderungen wie während des Leistungsbetriebes. Dies ist analog auf den Zustand A_B übertragbar. Hier sind keine Abstriche am Redundanzgrad möglich. Dies bedeutet, dass für Sicherheitseinrichtungen im Anforderungsfall ein Einzelfehler und grundsätzlich gleichzeitig der Instandhaltungsfall unterstellt werden müssen. Der Redundanzgrad ist also grundsätzlich als $n+2$ anzusetzen. Wenn bei einer Sicherheitseinrichtung lediglich ein Redundanzgrad von $n+1$ realisiert ist, (z. B. bei Primärkreis- oder Gebäudeabschlussarmaturen), dürfen Instandsetzungsmaßnahmen nur durchgeführt werden, wenn während der Dauer der instandsetzungsbedingten Unverfügbarkeit einer solchen Einrichtung deren sicherheitstechnische Funktion durch Ersatzmaßnahmen anderweitig zuverlässig gewährleistet ist (z. B. vorsorgliches Schließen der 2. Abschlussarmatur) oder die Instandsetzungsmaßnahme ausreichend zeitlich begrenzt ist und die zulässige Unverfügbarkeit in den betrieblichen Unterlagen festgelegt ist.

In den Betriebsphasen C bis E der Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke /BMU 15/ ist ein Redundanzgrad $n+1$ für die Zeiträume planmäßig durchgeführter Instandhaltungsmaßnahmen an für diese Betriebsphasen notwendigen Sicherheitseinrichtungen zulässig. Zusammen mit dem sich in Instandhaltung befindenden Strang ist hier damit auch grundsätzlich der Redundanzgrad $n+2$ für die Sicherheitseinrichtungen erforderlich. Dies ist analog übertragbar auf die Zustände A_C bis A_E .

In der Betriebsphase E der Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke /BMU 15/ ist eine Reduzierung des Redundanzgrades auf $n+0$ dann zulässig, wenn bei Ausfall der Sicherheitseinrichtung die Zeit bis zur Nichteinhaltung von Nachweiskriterien mehr als zehn Stunden beträgt und die ausgefallenen oder in Instandhaltung befindlichen aktiven Sicherheitseinrichtungen zuverlässig innerhalb dieses Zeitraums verfügbar gemacht werden können.

3.5.2 Anlagenzustände B und C

Der Anlagenzustand B ist definiert als „Vollbeladenes BLB mit älteren Brennelementen und letztem Kern“ und entspricht damit der Betriebsphase F „Brennelementelagerung“ der Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke /BMU 15/. Der Anlagenzustand C unterscheidet sich vom Anlagenzustand B nur durch die reduzierte Nachzerfallsleistung. Der Anlagenzustand C kann also durch Anlagenzustand B als abgedeckt betrachtet werden.

In der Betriebsphase F der Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke /BMU 15/ ist eine Reduzierung des Redundanzgrades auf $n+0$ dann zulässig, wenn bei Ausfall der Sicherheitseinrichtung die Zeit bis zur Nichteinhaltung von Nachweiskriterien mehr als 10 Stunden beträgt und die ausgefallenen oder in Instandhaltung befindlichen aktiven Sicherheitseinrichtungen zuverlässig innerhalb dieses Zeitraums verfügbar gemacht werden können.

3.5.3 Anlagenzustand D

Für den Anlagenzustand D gibt es keine Entsprechung in den Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke /BMU 15/. Eine Kühlung von Brennelementen oder die Sicherstellung der Unterkritikalität ist im Anlagenzustand D nicht mehr erforderlich, da keine Brennelemente und somit auch keine Kernbrennstoffe mehr im Becken lagern. Anforderungen an die Systemtechnik im Sinne der Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke bestehen nur noch in Hinsicht auf die Messung von Freisetzungen, die Dichtheit und den Durchdringungsabschluss des Containments, die Dichtheit von Behältern, die radioaktives Inventar enthalten sowie für die Lüftungsführung. Davon unberührt bleiben Anforderungen, die sich aus sonstigen Strahlenschutzaspekten oder Arbeitsschutzbestimmungen ergeben.

4 Karennzeiten, Reparatur- und Ersatzmaßnahmen

4.1 Karennzeiten

Zur Abschätzung der Karennzeiten wird von vereinfachten Annahmen ausgegangen. Die Annahmen werden dabei bewusst konservativ gewählt, um zu Mindestabschätzungen für die verfügbaren Karennzeiten zu kommen. Es wird im Folgenden davon ausgegangen, dass der Anlagenzustand B vorliegt, da die GRS annimmt, dass nach Beendigung des Leistungsbetriebs der letzte bestrahlte Kern zeitnah ins BLB umgelagert wird. Die Abschätzung der verfügbaren Karennzeiten ist damit nur für die Kühlung des BLB gültig. Im Anlagenzustand A sind die Karennzeiten für die Kühlung des BLB größer auf Grund der kleineren thermischen Leistung im BLB, für die Kühlung der sich noch im RDB befindlichen Brennelemente hingegen sind die Karennzeiten bei noch druckdichtem Reaktordeckel erheblich kürzer wegen des erheblich geringeren Wasservolumens des RDB.

4.1.1 Annahmen zur Abschätzung der verfügbaren Karennzeiten

Es wird angenommen, dass sich die BLB-Temperatur bei Ausfall der Beckenkühlung bei der Temperatur $T_1 = 45 \text{ °C}$ nach KTA 3303 /KTA 15/ als höchster im Normalbetrieb einzuhaltender Temperatur befindet. Diese Annahme ist konservativ, da sich die Karennzeiten durch niedrigere Ausgangstemperaturen verlängern. Die verfügbaren Karennzeiten werden jeweils für das Erreichen der Temperatur $T_2 = 60 \text{ °C}$ nach KTA 3303 als höchster Temperatur bei gestörtem Lagerbeckenkühlbetrieb und der Temperatur $T_3 = 80 \text{ °C}$ nach KTA 3303, die bei EVA-Ereignissen einzuhalten ist, abgeschätzt. Zum Vergleich sind auch noch Abschätzungen für eine BLB-Temperatur von 30 °C bei Ausfall der Kühlung durchgeführt worden.

Als Volumen des Wassers im BLB werden $V = 1.200 \text{ m}^3$ angenommen. Diese Annahme ist nach Kenntnis der GRS konservativ für BLB. Aus den Angaben des Berichtes GRS-A-3742 /GRS 15/ kann ein Volumen des Wassers im BLB von etwa 1.400 m^3 abgeschätzt werden. Strukturmassen im BLB, die zusätzlich erwärmt werden müssen, werden nicht angenommen, auch wenn diese nach /GRS 15/ erheblich sind. Diese Annahme ist konservativ, da sich durch die spezifischen Wärmekapazitäten der Strukturmassen die tatsächliche Erwärmung verlangsamt und damit die tatsächlichen Karennzeiten verlängert werden.

Als Dichte des Wassers bei 45 °C wird $\rho = 990 \text{ kg/m}^3$ gemäß /NIST 18/ angenommen. Als spezifische Wärmekapazität des Wassers bei konstantem Druck wird $c_p = 4,182 \text{ kJ/(kg K)}$ angenommen. Ein Kühleffekt durch verdunstendes Wasser wird nicht angenommen. Diese Annahme ist konservativ, da bei angenommener Verdunstung zwar die Masse des noch zu erwärmenden Wassers sinkt, aber die Verdunstung gleichzeitig mehr Wärme entziehen würde.

Die Mindestkarennzeiten auf Basis der getroffenen Annahmen werden in einem ersten Schritt für verschiedene Nachzerfallsleistungen P zwischen 100 kW und 14 MW berechnet. Die maximale Leistung von 14 MW ergibt sich dabei aus dem Bericht GRS-A-3743 /GRS 15/, in dem für ein vollbeladenes BLB bei einem DWR eine Leistung von 13,6 MW und für einen SWR eine Leistung von 13,79 MW angegeben werden:

$$\Delta Q = Pt_k = c_p m \Delta T \Rightarrow t_k = \frac{\Delta Q}{P} = \frac{c_p m \Delta T}{P} \quad (4.1)$$

mit der Masse m des Wassers, die sich aus der Dichte bei 45 °C und dem Wasservolumen des BLB berechnet

$$m = \rho V = 990 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 1200 \text{ m}^3 = 1,188 \cdot 10^6 \text{ kg} \quad (4.2)$$

und der Aufwärmspanne ΔT des Beckenwassers die sich aus der Differenz der Anfangs- und Endtemperatur berechnet.

Der Füllstandsabfall im BLB, der sich durch die Verdampfung einstellt, kann langfristig auch zum Verlust der Kühlbarkeit führen, dieser Prozess verläuft jedoch wesentlich langsamer als die reine Erwärmung und wird durch die große Wasserüberdeckung des Kerns erheblich verlängert.

4.1.2 Ergebnisse der Karenzzeitabschätzung

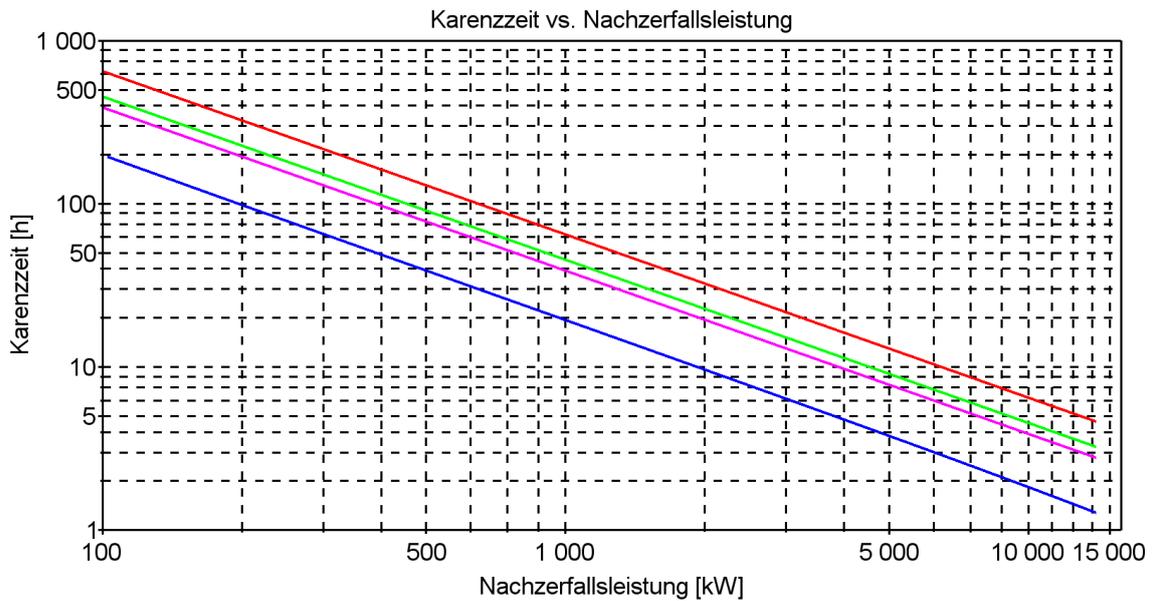


Abb. 4.1 Abhängigkeit der verfügbaren Mindestkarenzzeit von der Nachzerfallsleistung im BLB.

Die verschiedenen Kurven stellen die Mindestkarenzzeit für eine Erwärmung dar (blau: Erwärmung von 45 °C auf 60 °C, violett: 30 °C → 60 °C, grün: 45 °C → 80 °C, rot: 30 °C → 80 °C)

Abb. 4.1 stellt die Abhängigkeit der verfügbaren Mindestkarenzzeiten von der im Becken befindlichen Nachzerfallsleistung für die verschiedenen Ausgangstemperaturen (30 °C und 45 °C) und Endtemperaturen (60 °C und 80 °C) dar. Da der Zusammenhang zwischen zulässiger Aufwärmspanne und verfügbarer Karenzzeit gemäß Gleichung 4.2 für eine feste Leistung im Becken linear ist, ergibt sich zwischen den einzelnen Kurven jeweils ein fester Faktor.

Bei einer Leistung im Brennelementlagerbecken von 14 MW beträgt die Mindestkarenzzeit für die Erwärmung von 45 °C auf 60 °C etwas mehr als eine Stunde (blaue Kurve); bei einer Leistung von 1 MW beträgt die Mindestkarenzzeit etwa 20 Stunden und bei einer Leistung von 100 kW schon fast 200 Stunden. Analog ergeben sich für die Erwärmung des Brennelementlagerbeckens von 30 °C auf 60 °C (violette Kurve) für eine Leistung von 14 MW knapp drei Stunden Karenzzeit, für eine Leistung von 1 MW knapp 40 Stunden und bei einer Leistung von 100 kW knapp 400 Stunden.

Entsprechend längere Mindestkarenzzeiten ergeben sich für die Erwärmung von 45 °C auf 80 °C und für die Erwärmung von 30 °C auf 80 °C.

4.2 Durchführbarkeit von Reparatur- oder Ersatzmaßnahmen

Die Durchführbarkeit von Reparatur- oder Ersatzmaßnahmen innerhalb zur Verfügung stehender Karenzzeiten hängt von einer Vielzahl von Faktoren ab. Die wesentlichen Faktoren sind dabei:

- die Verfügbarkeit von qualifiziertem Personal zur Durchführung der Arbeiten,
- die Verfügbarkeit der erforderlichen Komponenten (z. B. neue Pumpen, neue Leistungsschalter) für Reparaturen auf der Anlage,
- die Vorausplanung der durchzuführenden Ersatzmaßnahmen,
- die Verfügbarkeit der zur Durchführung notwendigen Komponenten auf der Anlage oder deren rechtzeitige Beschaffung bei sehr langen Karenzzeiten,
- wiederkehrende Prüfungen an Komponenten für Ersatzmaßnahmen,
- die zur Verfügung stehende Karenzzeit und
- die bei der Durchführung der Arbeiten erforderlichen Arbeitsmittel und -bedingungen.

Die rechtzeitige Wirksamkeit der Maßnahmen ist unter konservativen Annahmen zu zeigen. Konservative Annahmen sind beispielsweise eine Verdoppelung der angenommenen Zeitdauern oder Fehlerpostulate bei durchzuführenden Arbeiten.

4.2.1 Reparaturmaßnahmen an Systemen während und nach naturbedingten EVA

Nach dem deterministischen Sicherheitskonzept der Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke /BMU 15/ müssen Sicherheitseinrichtungen während und nach EVA verfügbar sein. Das bedingt, dass gegen Lasten aus naturbedingten EVA auszulegen ist und damit ein Ausfall einzelner Komponenten oder Redundanzen bedingt durch die EVA-Lasten nicht zu unterstellen ist. Ein Ausfall einer Redundanz einer Sicherheitseinrichtung ist jedoch auf Grund des Einzelfehlerkonzeptes zu unterstellen, dieser Ausfall ist unabhängig von EVA zu betrachten und betrifft nur eine Komponente einer Redundanz. Mögliche Reparaturmaßnahmen während und nach EVA an Sicherheitseinrichtungen sind also auf einzelne Komponenten beschränkt. Bei Abschätzungen der erforderlichen Reparaturzeit ist die Reparatur oder der Ersatz der Komponente mit dem größten zeitlichen Aufwand zu betrachten.

Für Systeme, die keine Sicherheitseinrichtungen sind, also rein betriebliche Aufgaben wahrnehmen, besteht in der Regel keine Auslegung gegen Lasten aus EVA. Bei betrieblichen Systemen, die keine Auslegung gegen EVA haben, ist daher nach dem deterministischen Sicherheitskonzept von einem Ausfall während und nach EVA auszugehen. Die Anzahl der ausfallenden Komponenten ist nicht beschränkt. Theoretisch ist daher vom Ausfall aller Komponenten des Systems, die nicht gegen EVA ausgelegt sind, auszugehen. Die Abschätzung der erforderlichen Reparaturzeit muss hier sämtliche zu behebbende Schäden umfassen. Von parallelen Reparaturen an verschiedenen Komponenten kann nur teilweise Kredit genommen werden, da einige Reparaturen erst erfolgen können, wenn andere durchgeführt wurden.

4.2.2 Ersatzmaßnahmen für ausgefallene Systemfunktionen während und nach naturbedingten EVA

Ersatzmaßnahmen ersetzen Systemfunktionen. Dies kann aus der Bereitstellung aktiver Systemfunktionen, wie z. B. der Kühlung mittels eines Ersatzsystems, bestehen oder aus Maßnahmen, die aktive Systemfunktionen nicht mehr erforderlich machen. Ein Beispiel für Maßnahmen, die aktive Systemfunktionen nicht mehr erforderlich machen, ist das vorsorgliche Schließen von Abschlussarmaturen oder auch eine Blindverflanschung.

Maßnahmen, die aktive Systemfunktionen bereitstellen, können aus vorinstallierten Komponenten wie z. B. Rohrleitungen, Kabeln oder Pumpen, temporären Komponenten wie z. B. Ausbaustücken, Schlauchverbindungen oder mobilen Pumpen oder aus einer Mischung von vorinstallierten und temporären Komponenten bestehen.

Analog zu den Reparaturzeiten sind die Zeiten bis zur Verfügbarkeit der Ersatzmaßnahmen zu bewerten. Vorinstallierte oder temporäre Komponenten von Ersatzmaßnahmen müssen gegen die EVA geschützt sein. Dieser Schutz kann durch die Auslegung gegen die zu erwartenden Lasten erfolgen oder durch eine Lagerung, die vor den Lasten schützt.

5 Zulässigkeit der Außerbetriebnahme von Sicherheitseinrichtungen

Aus den Redundanzanforderungen der Sicherheitsanforderung an Kernkraftwerke /BMU 15/ für die unterschiedlichen Betriebsphasen A („Leistungsbetrieb“) bis F („Brennelementelagerung“) lassen sich bei der schutzzielorientierten Übertragung Kriterien hinsichtlich der Redundanzanforderungen für den langfristigen Nichtleistungsbetrieb ableiten. Die Betrachtungen fußen auf den folgenden Faktoren:

- der zur Verfügung stehenden Karenzzeit bis zum Erreichen unzulässiger Zustände nach naturbedingten EVA,
- den erforderlichen Reparaturzeiten für ausgefallene Systemstränge und
- den Zeitspannen, in denen Ersatzmaßnahmen für ausgefallene Systemfunktionen wirksam werden.

In den folgenden Abschnitten 5.1, 5.2 und 5.3 werden für die definierten Anlagenzustände A, B, C und D die erforderlichen aktiven Systemfunktionen gemäß Abschnitt 3.3, Tab. 3.1 systematisch behandelt.

Passive Systemfunktionen wie Standsicherheit der Brennelementlagergestelle oder Integrität der Brennstabhüllen, des RDB und SHB werden als gegeben vorausgesetzt, da diese Komponenten gegen naturbedingte EVA ausgelegt sind. Es wird davon ausgegangen, dass diese passiven Systemfunktionen, sofern sie noch erforderlich sind, weiter gewährleistet werden. Eine Ausnahme bilden hierbei die Funktionen „Sicherstellung des Kühlmittelinventars des RDB“ und „Sicherstellung des Kühlmittelinventars des BLB“ die nicht allein auf der Integrität des Primärkreislaufes bzw. des BLB beruhen, sondern auch die erforderliche Kühlmittelergänzung beinhalten, um (betriebliche) Verluste von Kühlmittel auszugleichen. Ein Integritätsverlust des RDB bzw. des BLB und der daran angeschlossenen Systeme bei EVA ist bei einer Auslegung gegen Lasten aus naturbedingten EVA nicht zu erwarten. Sofern Anschlusssysteme nicht gegen Lasten aus naturbedingten EVA ausgelegt sind, ist ggf. mit ihrem Versagen zu rechnen. Ein Füllstandsabfall des BLB wäre dann zu erwarten bis auf die Höhe des niedrigstgelegenen Anschlusses des betroffenen Systems.

5.1 Anlagenzustand A

Bewegen sich die Karenzzeiten im Bereich weniger Stunden (< 10 Stunden), so ergibt sich aus den Redundanzanforderungen der Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke /BMU 15/ (vergl. Abschnitt 3.5), dass Sicherheitseinrichtungen mit mindestens dem Redundanzgrad $n+1$ verfügbar gehalten werden müssen.

Sollte dieser Anlagenzustand über längere Zeiträume vorliegen, so sind Wartungen und Instandsetzungen an Systemen nicht auszuschließen. Sind zusätzlich die zur Verfügung stehenden Karenzzeiten bis zum Erreichen unzulässiger Zustände nicht ausreichend, um Wartungen oder Instandsetzungen innerhalb der Karenzzeiten sicher erfolgreich zu beenden oder das durch unabhängigen Einzelfehler ausgefallene System erfolgreich zu reparieren, so ist der Redundanzgrad $n+2$ einzuhalten.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass während des Anlagenzustandes A, unterteilt in die Zustände A_B bis A_E in Analogie zu den Betriebsphasen B bis E der Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke /BMU 15/, nur unter sehr engen Voraussetzungen Einschränkungen am Redundanzgrad der erforderlichen Sicherheitseinrichtungen vorgenommen werden können. Eine dauerhafte Außerbetriebsetzung von Sicherheitseinrichtungen ist nur möglich, wenn die Redundanzanforderungen weiterhin erfüllt bleiben.

5.1.1 Sicherstellung der Unterkritikalität

Die Unterkritikalität wird im Anlagenzustand A durch folgende aktive Systemfunktionen sichergestellt:

- im Reaktordruckbehälter: eingefahrene bzw. eingeworfene Steuerstäbe und im DWR durch ausreichende Borierung des Kühlmittels,
- im Brennelementlagerbecken: beim DWR ggf. durch Borierung des Kühlmittels.

Eine Reduzierung der Redundanz der dafür notwendigen Systeme ist nicht zulässig.

Beim DWR wird ggf. von der Borierung des Kühlmittels Kredit genommen. Gemäß KTA 3602 /KTA 03/ ist in diesem Fall eine räumlich und zeitlich hinreichend auflösende Überwachung der Borkonzentration zu gewährleisten. Durch administrative oder technische Maßnahmen ist eine Einspeisung von Bor ins Kühlmittel betrieblich sicherzustellen.

Wenn nach naturbedingten EVA zum Nachweis der Unterkritikalität von der Borierung des Kühlmittels Kredit genommen wird, dann gelten diese Anforderungen im vollen Umfang weiter.

5.1.2 Sicherstellung der Nachwärmeabfuhr

Die Nachwärmeabfuhr wird im Anlagenzustand A durch folgende aktive Systemfunktionen sichergestellt:

- im Reaktordruckbehälter: durch die Kühlung des RDB durch das nukleare Kernnot- und Nachkühlsystem, das gesicherte Zwischenkühlsystem und das gesicherte Nebenkühlsystem,
- im Brennelementlagerbecken: durch die Kühlung des BLB durch die Beckenkühlsystem(e)¹, das gesicherte Zwischenkühlsystem und das gesicherte Nebenkühlsystem.

Das Kühlmittelinventar des RDB bzw. des BLB wird einerseits durch die Integrität des RDB bzw. Brennelementlagerbeckens einschließlich der angeschlossenen Systeme sichergestellt, andererseits aber auch durch die langfristig notwendige Kühlmittelergänzung zum Ausgleich betrieblicher Verluste.

Eine Reduzierung der Redundanz der dafür notwendigen Systeme ist nicht zulässig.

5.1.3 Einschluss der radioaktiven Stoffe

Der Einschluss der radioaktiven Stoffe wird im Anlagenzustand A sichergestellt durch:

- im Reaktordruckbehälter bei druckdichtem Reaktordeckel: die Brennstabhülle, den Reaktordruckbehälter und das angeschlossene Nachkühlsystem sowie den Sicherheitsbehälter, langfristig ebenso durch die Unterdruckhaltung und die Kühlmittelbehandlung,
- im Reaktordruckbehälter bei offenem Reaktordeckel und im Brennelementlagerbecken: die Brennstabhülle, den Sicherheitsbehälter und die angeschlossenen Kühlsysteme. Langfristige Maßnahmen zum Einschluss der radioaktiven Stoffe sind die Unterdruckhaltung und die Kühlmittelbehandlung.

¹ Entweder ein entsprechend ausgelegtes Beckenkühlsystem oder entsprechende Stränge des nuklearen Not- und Nachkühlsystems.

Der Einschluss radioaktiver Stoffe ist vor allem durch passive Barrieren gegeben. Aktive Systemfunktionen sind bei Absperrarmaturen erforderlich, vornehmlich in Bezug auf den Sicherheitsbehälterabschluss, aber auch in den Nachkühlsystemen. Die Redundanzanforderungen an Absperrarmaturen können nicht reduziert werden. Gegebenenfalls können Absperrarmaturen durch Blindflansche ersetzt werden, wodurch die Redundanzanforderung für aktive Systemfunktionen entfällt.

5.2 Anlagenzustände B und C

Für Karenzzeiten größer als 10 Stunden ist in der Betriebsphase F gemäß /BMU 15/ (entsprechend den Anlagenzuständen B und C in diesem Bericht) eine Reduktion des Redundanzgrades der Sicherheitseinrichtungen auf n+0 zulässig, wenn bei Ausfall der sicherheitstechnisch wichtigen Einrichtung die ausgefallenen oder in Instandhaltung befindlichen aktiven sicherheitstechnisch wichtigen Einrichtungen zuverlässig innerhalb dieses Zeitraums verfügbar gemacht werden können.

5.2.1 Sicherstellung der Unterkritikalität

Beim DWR wird ggf. von der Borierung des Kühlmittels Kredit genommen. Gemäß KTA 3602 /KTA 03/ ist in diesem Fall eine räumlich und zeitlich hinreichend auflösende Überwachung der Borkonzentration zu gewährleisten. Durch administrative oder technische Maßnahmen ist eine Einspeisung von Bor ins Kühlmittel betrieblich sicherzustellen. Wenn nach EVA zum Nachweis der Unterkritikalität von der Borierung des Kühlmittels Kredit genommen wird, dann gelten diese Anforderungen im vollen Umfang weiter.

5.2.2 Sicherstellung der Nachwärmeabfuhr

Die Nachwärmeabfuhr aus dem Brennelementlagerbecken wird in den Anlagenzuständen B und C durch das Beckenkühlsystem², das gesicherte Zwischenkühlsystem und das gesicherte Nebenkühlsystem sichergestellt. Das Kühlmittelinventar des BLB wird einerseits durch die Integrität des Brennelementlagerbeckens einschließlich der angeschlossenen Systeme sichergestellt, andererseits aber auch durch die langfristig notwendige Kühlmittelergänzung zum Ausgleich betrieblicher Verluste.

² Als Beckenkühlsystem werden hier die gegen EVA ausgelegten Systemstränge sowohl des Beckenkühlsystems als auch die ggf. dafür vorgesehenen Stränge des Not- und Nachkühlsystems verstanden.

Der Sicherheitsphilosophie der Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke /BMU 15/ entsprechend kann bei Karenzzeiten größer als zehn Stunden in den Anlagenzuständen B und C der graduelle Entfall von Sicherheitseinrichtungen akzeptiert werden. Dabei spielen die folgenden Punkte eine Rolle:

- Nachwärmeabfuhrsysteme sind üblicherweise auf die zu erwartende Maximallast ausgelegt. Mit zunehmender Dauer des Anlagenzustandes B reduziert sich die zu erwartende Maximallast der Beckenkühleinrichtungen, da die Nachzerfallsleistung kontinuierlich sinkt. Je nach Anlagenauslegung kann es ohne Einschränkung am Redundanzgrad möglich sein, einen oder mehrere Stränge der sicherheitstechnisch wichtigen Beckenkühleinrichtungen dauerhaft außer Betrieb zu nehmen.
- Der Sicherheitsphilosophie entsprechend können für Sicherheitseinrichtungen, die sich in Wartung befinden, Ersatzmaßnahmen ergriffen werden. Dies ist analog auch auf Sicherheitseinrichtungen übertragbar, die dauerhaft außer Betrieb genommen werden. Voraussetzung dafür ist aus Sicht der GRS, dass die Ersatzmaßnahmen ausreichend zuverlässig sind und innerhalb der zur Verfügung stehenden Zeit bis zur Nichteinhaltung von Nachweiskriterien zur Verfügung stehen und wirksam sind. Im Sinne der Sicherheitsanforderungen ist dies nur zulässig, wenn hierbei von einer Mindestzeitdauer bis zur Verfügbarkeit der Ersatzmaßnahme von zehn Stunden ausgegangen wird, d. h. Ersatzmaßnahmen sind unzulässig bei Karenzzeiten kleiner als zehn Stunden. Die RSK fordert in ihrer Stellungnahme /RSK 20/ Karenzzeiten > 24h für eine Reduzierung der Beckenkühlstränge (verfügbare Pumpen oder ganze Stränge), wobei die Auslegung gegen Bemessungserdbeben für zwei Stränge erhalten bleiben muss. Bei Karenzzeiten > 3d bis zur Erreichung der Temperatur T3 (80 °C) fordert die RSK lediglich einen Strang des Sicherheitssystems sofern gezeigt werden kann, dass eine Ersatzmaßnahme innerhalb < 3d wirksam wird.
- Ein vergleichbarer Sicherheitsstandard im Sinne der schutzzielorientierten Anwendung der Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke /BMU 15/ im Anlagenzustand B (und C) kann aus Sicht der GRS erreicht werden, wenn bei Karenzzeiten größer als zehn Stunden gezeigt wird, dass ausgefallene betriebliche Systeme, die dieselben Funktionen wahrnehmen wie die Sicherheitseinrichtung (z. B. betriebliche Beckenkühlung), in der verfügbaren Karenzzeit zuverlässig wieder in Betrieb genommen werden können oder Ersatzmaßnahmen durchgeführt werden können, um diese betrieblichen Systeme temporär zu ersetzen. Bei sehr geringer Wärmelast im Brennelementlagerbecken bestehen Karenzzeiten von mehr als einer Woche, bevor

unzulässige Zustände erreicht werden können. Je größer die Karenzzeit ist, umso komplexere Reparaturen oder Ersatznahmen können realisiert werden.

- Durch Effekte wie Wärmeleitung durch den Beton und Verdampfung werden bei weiter verringerter Wärmelast im Becken möglicherweise keine Temperaturen oberhalb von 60 °C mehr erreicht. In diesem Zustand ist es völlig ausreichend, das verdunstende Kühlmittel zu ersetzen, um die Lagerbeckentemperaturen unterhalb der Grenze von 60 °C zu halten, die dem gestörten Betrieb zuzuordnen ist. Bei Zeitspannen in der Größenordnung von einer Woche und mehr ist grundsätzlich auch die Verfügbarkeit einer Hilfe von außen als gegeben anzusehen. Die Verfügbarkeit von aktiven Sicherheitseinrichtungen zur Nachwärmeabfuhr erscheint vor diesem Hintergrund nicht mehr zwingend erforderlich. Dies gilt auch dann, wenn man von einem durch naturbedingte EVA ausgelösten Füllstandsabfall des BLB bis auf die Höhe des niedrigstgelegenen Anschlusses des versagenden Anschlusssystems ausgeht. Diese Sichtweise wird auch durch die Stellungnahme der RSK zur passiven Beckenkühlung /RSK 19/ gestützt. Die RSK fordert hierfür eine auch nach Erdbeben verfügbare Nachspeisemöglichkeit, für die nach Ansicht der RSK auch Ersatzmaßnahmen kreditiert werden können

Bei den Betrachtungen zu möglichen Reparaturen und Ersatzmaßnahmen sind die Aspekte des Abschnitts 4.2 zu berücksichtigen

5.2.3 Einschluss der radioaktiven Stoffe

Der Einschluss der radioaktiven Stoffe wird in den Anlagenzuständen B und C sichergestellt durch die Brennstabhülle, den Sicherheitsbehälter und angeschlossene Nachkühlsysteme. Mitigative Maßnahmen der Rückhaltung von radioaktiven Stoffen sind die Unterdruckhaltung und die Kühlmittelbehandlung.

Der Einschluss radioaktiver Stoffe ist vor allem durch passive Barrieren gegeben. Aktive Systemfunktionen sind bei Absperrarmaturen erforderlich, vornehmlich in Bezug auf den Sicherheitsbehälterabschluss, aber auch in den Nachkühlsystemen. Die Redundanzanforderungen an Absperrarmaturen können nicht reduziert werden. Gegebenenfalls können Absperrarmaturen durch Blindflansche ersetzt werden, wodurch die Redundanzanforderungen für aktive Systemfunktionen entfallen.

5.3 Anlagenzustand D

Im Anlagenzustand D ist die Anlage kernbrennstofffrei. Eine Sicherstellung der Unterkritikalität und eine Nachwärmeabfuhr sind nicht mehr notwendig. Der Einschluss der radioaktiven Stoffe wird durch die umschließenden Behälter und Lüftungssysteme sichergestellt. Redundanzanforderungen an aktive Sicherheitssysteme sind einzelfallbezogen zu entscheiden.

6 Im langfristigen Nichtleistungsbetrieb und in der Stilllegung neu hinzukommende beziehungsweise geänderte EVA-Szenarien

Im langfristigen Nichtleistungsbetrieb und in der Stilllegung neu hinzukommende bzw. geänderte EVA-Szenarien können sich ausfolgenden Gesichtspunkten ergeben:

- **Veränderte Lagerung radioaktiver Stoffe:**
 - Lagerung von radioaktiven Stoffen auf dem freien Anlagengelände,
 - Lagerung von radioaktiven Stoffen in Gebäuden, die bisher nicht der Lagerung dienen.
- **Veränderte Schutzmaßnahmen gegen EVA:**
 - Änderungen an bestehenden (betrieblichen) Systemen, die den Schutz gegen EVA beeinflussen können,
 - Änderungen an Gebäuden und Strukturen, die dem Schutz vor EVA dienen.
- **Durch den veränderten Anlagenbetrieb geänderte EVA-Szenarien:**
 - Durch geänderte Betriebsweisen können möglicherweise die Auswirkungen von naturbedingten EVA auf Systeme verändert sein, bzw. die Häufigkeit der Einwirkung sich ändern.

6.1 Veränderte Lagerung von radioaktiven Materialien

Eine veränderte Lagerung radioaktiver Stoffe ergibt sich aus der:

- Lagerung von radioaktiven Stoffen auf dem freien Anlagengelände in dafür vorgesehenen Lagerbehältern und aus der
- Lagerung von radioaktiven Stoffen in Gebäuden, die bisher nicht der Lagerung radioaktiver Stoffe dienen.

6.1.1 Lagerung auf dem freien Anlagengelände

Einige Sicherheitsberichte der Betreiber geben als mögliche Lagerung von radioaktiven Materialien Containerlager auf dem freien Anlagengelände an /GKN 14/, /KKU 15/, /KKP 14/, /KKB 15/. Die Beschreibung der Sicherung dieser Container gegen Einwirkungen von außen ist knappgehalten. Die Betreiber zählen die untersuchten Einwirkungen auf und begründen nicht gesondert, inwiefern die Containerlager gegen die einzelnen

Einwirkungen geschützt sind. Zudem wird darauf abgehoben, dass radiologische Folgen z. B. beim Umkippen bzw. Absturz der Container (weit) unterhalb der Störfallplanungswerte der Strahlenschutzverordnung liegen und zudem nicht den radiologisch repräsentativen Störfall bei EVA darstellen.

Ein Betreiber gibt an, dass die Container sich unterhalb des maximalen Wasserstands des Bemessungshochwassers der Anlage befinden, jedoch oberhalb des Wasserstandes eines 1.000-jährlichen Hochwassers. Bei absehbarem Anstieg des Hochwasserspiegels über den Wasserstand eines 1.000-jährlichen Hochwassers hinaus werden die Container nach Angaben des Betreibers umgelagert und befinden sich dann oberhalb des Bemessungswasserstandes /GKN 14/.

Ein weiterer Betreiber gibt an, dass eine denkbare Gefährdung für die ggf. auf dem Anlagengelände (Pufferlagerflächen) abgestellten radioaktiven Reststoffe in verschlossenen Stahlblechcontainern durch ein Hochwasser zu berücksichtigen ist. Der Betreiber argumentiert, dass ein extremes Hochwasser nicht ohne eine gewisse Vorwarnzeit eintritt und daher rechtzeitig Maßnahmen getroffen werden, die in der Alarmordnung des BHB festgelegt sind /KKU 15/. Die Maßnahmen gemäß Alarmordnung werden nicht näher beschrieben.

Ein weiterer Betreiber gibt an, dass eine Überflutung der Pufferlagerflächen ein sehr seltenes Ereignis und dem Restrisiko zuzuordnen sei. Bei einer dennoch postulierten Überflutung könne ein Wasserstand von maximal etwa einem Meter auf der Pufferlagerfläche erreicht werden. Bei diesem Wasserstand sei ein Eindringen des Wassers in die dort befindlichen Container nicht auszuschließen. Durch die nur teilweise Flutung der Container und durch die Dichtungen an den Containern wird gemäß Betreiber die Aktivitätsfreisetzung begrenzt. Die sich daraus ergebende maximale 1-Jahres-Folgedosis wurde errechnet und liegt gemäß Betreiber weit unterhalb des Eingreifrichtwertes für Maßnahmen des Katastrophenschutzes /KKB 15/.

Containerlager benötigen keine aktiven Systemfunktionen. Wichtige sicherheitstechnische Funktionen der Containerlager sind Standsicherheit und Integrität um auch unterhalb der Störfallplanungswerte mögliche Freisetzungen so gering wie möglich zu halten.

Die Auslegung von Containerlagern gegen naturbedingte Einwirkungen von außen muss daher auf die Aufrechterhaltung der Sicherheitsfunktionen Standsicherheit und Integrität ausgerichtet sein. Dazu sollten vornehmlich fest installierte Maßnahmen vorgesehen

sein, um die Containerlager gegen naturbedingte Einwirkungen von außen zu schützen. Dazu zählen u. a.:

- Ggf. zusätzliche Verankerungen bzw. Fixierungen, die gegen zu erwartende Lasten aus naturbedingten EVA ausgelegt sind, sofern die Container nicht schon durch Eigengewicht ausreichend standsicher sind.
- Schutz gegen Einwirkungen wie Blitzschlag oder Hagel, sofern die Container nicht schon auf Grund ihrer Konstruktion dagegen geschützt sind.
- Schutz gegen Verformungen auf Grund von naturbedingten EVA-Lasten, die zum Verlust der Integrität führen können.

Des Weiteren können, bei zeitlich sich langsam entwickelnden bzw. gut vorhersagbaren Einwirkungen von außen, administrative Maßnahmen ergriffen werden, wie z. B.:

- Schutz gegen Korrosion, die sich aus den Lagerbedingungen ergibt,
- Umlagern von Behältern, um ein Überfluten bzw. Umspülen der Container bei Hochwasser zu vermeiden.

Administrative Maßnahmen müssen vorgeplant werden, um ihre Wirksamkeit zu sichern. Dies schließt ein, dass die zur Durchführung der Maßnahmen erforderlichen Mittel, Personalressourcen, Lagerflächen und Verkehrswege entweder vorhanden oder zuverlässig innerhalb der zur Verfügung stehenden Zeiträume vor Erreichen unzulässiger Zustände beschafft, beauftragt, aufgebaut oder errichtet werden können.

6.1.2 Lagerung von radioaktiven Stoffen in bisher nicht dafür genutzten Gebäuden

Erfolgt die Lagerung von radioaktiven Stoffen in bisher nicht dafür genutzten Gebäuden, so ist die Auslegung dieser Gebäude gegen naturbedingte EVA zu betrachten. Dabei spielen verschiedene Aspekte eine Rolle.

Sind die Gebäude auf Integrität während und nach EVA ausgelegt, so ist zu betrachten, ob die Lagerung der radioaktiven Stoffe die Auslegungsrandbedingungen (zulässige Lasten) einhält. Die Lagerbehälter der radioaktiven Stoffe müssen zumindest ausreichend standsicher sein und ggf. notwendige Fixierungen oder Verankerungen müssen gegen die zu erwartenden Lasten aus EVA ausgelegt sein.

Sind die Gebäude auf Standsicherheit während und nach EVA ausgelegt, so ist zu betrachten, ob die Lagerung der radioaktiven Stoffe die Auslegungsrandbedingungen (zulässige Lasten) einhält. Die Lagerbehälter der radioaktiven Stoffe sollten auf Standsicherheit und Integrität ausgelegt sein und die zu erwartenden Lasten aus EVA abtragen können.

Sind die zur Lagerung vorgesehenen Gebäude bisher nicht gegen EVA ausgelegt, so muss überprüft werden, ob und in welchem Umfang die Gebäude dennoch EVA-Lasten abtragen können. Die Analyse der Standsicherheit und Integrität der Gebäude während und nach EVA muss unter den Randbedingungen, die sich aus der Lagerung der radioaktiven Stoffe ergeben, erfolgen.

6.2 Beeinträchtigung von Maßnahmen zur Beherrschung von EVA durch Abbaumaßnahmen oder vorbereitende Arbeiten

Maßnahmen zur Beherrschung von EVA sind:

- gegen EVA ausgelegte Sicherheitseinrichtungen und die von ihnen bereitgestellten Systemfunktionen, z. B. das Not- und Nachkühlsystem mit den Sicherheitsfunktionen Kühlmittelergänzung und Abfuhr der Nachwärme,
- gegen EVA ausgelegte Schutzmaßnahmen, die dauerhaft oder temporär sind und Sicherheitseinrichtungen vor den durch EVA bedingten Lasten schützen, z. B. Einrichtungen des Hochwasserschutzes wie Gebäudeabdichtungen, Deiche und Dammbalken.

6.2.1 Beeinträchtigung von Sicherheitseinrichtungen

Im Falle von Abbaumaßnahmen oder von vorbereitenden Arbeiten kommt es zu Veränderungen an den Anlagen, die nicht sicherheitstechnisch wichtige Systeme oder Komponenten betreffen. Diese Änderungen können dazu führen, dass Sicherheitseinrichtungen im Falle von EVA nicht oder nicht im erforderlichen Umfang zur Verfügung stehen.

Mögliche Ursachen für die (potenzielle) Beeinträchtigung von Sicherheitseinrichtungen sind die folgenden Situationen:

- Beim Abbau von nicht sicherheitstechnisch wichtigen Systemen werden die Auswirkungen von EVA auf diese Systeme nicht berücksichtigt, so dass es während des Abbaus zu Situationen kommt, die die Standsicherheit des rückzubauenden Systems bzw. einzelner Komponenten bei EVA gefährdet.
- Bei vorbereitenden Arbeiten werden die Auswirkungen von EVA nicht berücksichtigt, so dass es während des Aufbaus und der Standzeit von zusätzlichen Komponenten zu Situationen kommt, die die Standsicherheit nach EVA beeinträchtigen.
- Potenziell können bei vorbereitenden Arbeiten auch sicherheitstechnisch nicht wichtige Systeme oder Komponenten installiert bzw. in die Anlage eingebracht werden, die Fluide enthalten. Werden dabei die Auswirkungen von EVA nicht berücksichtigt, so ist die Integrität dieser Systeme bzw. Komponenten gefährdet und damit potenziell auch die Sicherheit der Anlage.

Durch Verlust der Standsicherheit bei nicht oder durch den teilweisen Abbau nicht mehr gegen EVA-Lasten ausgelegten Systemen kann es zu Folgeschäden an Sicherheitseinrichtungen kommen.

6.2.2 Beeinträchtigung von Schutzmaßnahmen

Bei Abbaumaßnahmen oder vorbereitenden Arbeiten kann es zu Veränderungen an der Anlage kommen, die dazu führen können, dass Schutzmaßnahmen gegen EVA nicht oder nicht im erforderlichen Umfang zur Verfügung stehen. Diese Veränderungen können sein:

- geplante Veränderungen an Strukturen, die unter anderem auch Schutzmaßnahmen gegen naturbedingte EVA sind, wie z. B. das temporäre oder permanente Schaffen von Öffnungen in Gebäuden, die Sicherheitseinrichtungen enthalten, ohne diese Öffnungen gegen die naturbedingten EVA zu schützen,
- Beschädigungen, die die Integrität von Gebäuden oder anderen Schutzmaßnahmen gegen naturbedingte EVA beeinträchtigen, wie z. B. die Beschädigung der Gebäudeabdichtung bei Bauarbeiten.

In beiden Fällen kommt es zu Beeinträchtigungen des Schutzes gegen naturbedingte EVA, die das Sicherheitsniveau der Anlage unter Umständen dauerhaft beeinträchtigen.

Essenziell ist es daher, alle sicherheitstechnischen Anforderungen an Strukturen vor Ausführung von Arbeiten zu bestimmen und die Arbeiten entsprechend zu planen, um das Schutzniveau beibehalten zu können. Werden Schäden, die bei Arbeiten entstanden sind, nicht zeitnah erkannt und behoben, so kann dies das Sicherheitsniveau der Anlage dauerhaft beeinträchtigen.

6.3 Naturbedingte Einwirkungen von außen, deren Bedeutung sich im langfristigen Stillstand (potenziell) ändert

Der langfristige Stillstand der Anlage führt zu einem langfristig geänderten Betrieb von Systemen. Dies betrifft vor allem Systeme, die der Wärmeabfuhr und hier insbesondere der Nachwärmeabfuhr dienen, da sich deren Last mit zunehmender Dauer des Stillstandes reduziert. Durch die geänderten Betriebsweisen und Betriebshäufigkeiten sind diese Systeme möglicherweise in veränderter Weise von einzelnen naturbedingten EVA betroffen. Da sich eine sicherheitstechnische Bedeutung nur ergibt, wenn sich die Auswirkungen einzelner naturbedingter EVA auf die Systeme verstärken, werden im Folgenden nur diese Effekte näher betrachtet.

Systeme und Komponenten, die sich vollständig in gegen naturbedingte EVA ausgelegten Gebäuden befinden und die keine unmittelbare Verbindung zu direkt von EVA betroffenen Systemen haben, sind gegen die auslegungsbestimmenden EVA geschützt. Dies gilt, da sich die Gefährdung der Systeme und Komponenten durch Erdbeben, Überflutung, etc. nicht allein durch geänderte Betriebsweisen und Betriebshäufigkeiten erhöht. Hingegen können Systeme und Komponenten, die in sich nicht oder nicht vollständig in schützenden Gebäuden oder Strukturen befinden, direkt von naturbedingten EVA betroffen sein. Allerdings ergibt sich auch hier nicht unmittelbar eine Gefährdung durch die direkte Einwirkung naturbedingter EVA, da sich auch hier die Einwirkungen nicht verändern. Erst die Kombination aus geänderten Betriebsweisen oder -häufigkeiten in Verbindung mit bestimmten Einwirkungen kann möglicherweise zu einer erhöhten Gefährdung führen.

In Systemen, die mit Rohwasser in Kontakt kommen, kann es durch die geringere Betriebshäufigkeit z. B. vermehrt zu Algen- oder Muschelbewuchs kommen, der insbesondere Wärmetauscher verstopfen kann. Durch die geringe Betriebshäufigkeit kann die Effektivität vorgesehener Reinigungsanlagen, wie der Taproggeanlage herabgesetzt sein. Ebenso können in mit Rohwasser beaufschlagten Systemen durch die vermehrte Stagnation des Wassers die Bedingungen für das Auftreten von mikrobiologisch induzierter Korrosion begünstigt werden.

7 Zusammenfassung

Im vorliegenden Bericht wurden naturbedingte Einwirkungen von außen im langfristigen Nichtleistungsbetrieb bzw. in der Stilllegung betrachtet. Dabei wurden verschiedene Aspekte betrachtet. Dies waren:

- das Schutzkonzept der Anlagen,
- Karenzzeiten und die Durchführbarkeit von Reparatur- und Ersatzmaßnahmen,
- die Zulässigkeit der Außerbetriebnahme von Sicherheitseinrichtungen und
- im langfristigen Nichtleistungsbetrieb und in der Stilllegung neu hinzukommende bzw. geänderte Szenarien für naturbedingte Einwirkungen von außen.

Zunächst wurde das Schutzkonzept der Anlagen beleuchtet. Dabei wurden vier zu betrachtende Anlagenzustände, die den graduellen Übergang vom Zeitpunkt der Beendigung des Leistungsbetriebs bis zur Kernbrennstofffreiheit widerspiegeln, betrachtet. Des Weiteren wurden die gegen naturbedingte Einwirkungen von außen zu schützenden Gebäude, Strukturen und Einrichtungen abgeleitet. Im Wesentlichen sind das alle Lagerorte von radioaktiven Stoffen auf der Anlage, sei es in Gebäuden oder in einem Containerlager auf dem freien Anlagengelände. Zudem sind noch diejenigen Gebäude und Strukturen gegen EVA auszulegen, die Komponenten von noch benötigten Sicherheitseinrichtungen enthalten.

Danach wurden die Karenzzeiten einer konservativen Abschätzung unterzogen. Die Nachzerfallsleistung wird rasch kleiner und die Wärmelast im Brennelementlagerbecken nimmt damit kontinuierlich ab. Abhängig von der vorliegenden Wärmelast im Becken reichen die Karenzzeiten vor Erreichen unzulässiger Zustände nach naturbedingten Einwirkungen von außen zwischen wenigen Stunden unmittelbar nach der Vollentladung des letzten Kerns in das Brennelementlagerbecken über Tage, nachdem die Brennelemente mehrere Monate gelagert wurden, bis hin zu Wochen im Falle der Lagerung über mehrere Jahre. Die Untersuchung der Durchführbarkeit von Reparatur- und Ersatzmaßnahmen stützt sich im Wesentlichen auf die konservative Abschätzung der verfügbaren Karenzzeiten. Je länger die verfügbaren Karenzzeiten sind, umso mehr Reparaturmaßnahmen sind möglich bzw. umso umfangreicher können Ersatzmaßnahmen ausgeführt werden.

Die Untersuchungen zur Zulässigkeit der Außerbetriebnahme von Sicherheitseinrichtungen stützen sich im Wesentlichen auf die Redundanzanforderungen der Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke /BMU 15/ und die Betrachtungen zu den verfügbaren Karenzzeiten. Im Wesentlichen ist festzuhalten, dass vor der Entladung des letzten Kerns in das Brennelementlagerbecken Redundanzanforderungen an die noch benötigten Systeme nicht reduziert werden können. Nach Umladung des letzten Kerns in das Brennelementlagerbecken können Redundanzanforderungen reduziert werden, wenn die Karenzzeiten größer als zehn Stunden sind. Bei bereits deutlich reduzierter Wärmelast können auch ohne Reduktion der Redundanzanforderungen bereits Teile des Nachwärmeabfuhrsystems außer Betrieb genommen werden, da die zu erwartende Wärmelast mit den verbliebenen Strängen abgeführt werden kann. Mit zunehmender Dauer der Lagerung steigen auch die Karenzzeiten, so dass Sicherheitseinrichtungen auch entfallen können, weil betriebliche Systeme mit ausreichender Zuverlässigkeit nach naturbedingten Einwirkungen von außen repariert werden können oder Ersatzmaßnahmen wirksam werden können. Bei Karenzzeiten von deutlich über einer Woche und der bloßen Notwendigkeit der Kühlmittelergänzung, um die höchstzulässige Temperatur des anomalen Betriebs nicht zu überschreiten, erscheinen fest installierte Sicherheitseinrichtungen zur Nachwärmeabfuhr nicht mehr zwingend erforderlich.

Abschließend wurden im langfristigen Nichtleistungsbetrieb und in der Stilllegung neu hinzukommende bzw. geänderte Szenarien für naturbedingte Einwirkungen von außen untersucht. Diese umfassen vor allem die Aspekte der veränderten Lagerung von radioaktiven Materialien in der Anlage, die Beeinträchtigung von Maßnahmen zur Beherrschung von naturbedingten Einwirkungen von außen und naturbedingte Einwirkungen von außen, die vor dem Hintergrund des geänderten Betriebs von Systemen eine andere Bedeutung erlangen.

In Hinsicht auf die veränderte Lagerung von radioaktiven Materialien in der Anlage sind besonders die Lagerung von radioaktiven Materialien in Containerlagern auf dem Anlagengelände und die Lagerung von radioaktiven Materialien in bisher nicht dafür vorgesehenen Gebäuden in Bezug auf die Gefährdung durch naturbedingte Einwirkungen von außen näher zu untersuchen. Containerlager sind zumindest auf Standsicherheit und Integrität nach EVA auszulegen. Ggf. erforderliche Halterungen sind gegen EVA-Lasten auszulegen. Bei bisher nicht für die Lagerung von radioaktiven Materialien vorgesehenen Gebäuden ist die Auslegung gegen EVA zu prüfen und ggf. zumindest die Standsicherheit der Gebäude unter den geänderten Randbedingungen der Lagerung nachzuweisen.

In Bezug auf die Beeinträchtigung von Maßnahmen zur Beherrschung von naturbedingten Einwirkungen von außen sind insbesondere zwei Aspekte zu betrachten: Einerseits die durch Abbaumaßnahmen oder vorbereitenden Arbeiten geänderte Standsicherheit von sicherheitstechnisch nicht wichtigen Komponenten in der Umgebung von Sicherheitseinrichtungen, die nach EVA die Sicherheitseinrichtungen gefährden könnten, andererseits aber auch die Beeinträchtigung von Barrieren, die dem Schutz vor EVA dienen, z. B. die Gebäudeabdichtung gegen eindringendes Wasser.

Naturbedingte Einwirkungen von außen, deren Bedeutung sich vor dem Hintergrund des geänderten Betriebes verändert, sind vor allem in Bezug auf die Nachwärmeabfuhrsysteme zu erwarten. Durch die verringerten Betriebshäufigkeiten werden Reinigungssysteme wie die Tapprogge-Anlage seltener genutzt und der Bewuchs mit Algen oder Muscheln in den Nebenkühlwassersystemen damit begünstigt. Ebenso ist durch die vermehrte Stagnation des Wassers die Bildung von mikrobiologischer Korrosion begünstigt.

Literaturverzeichnis

- /BMU 15/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit: Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke, Neufassung vom 3. März 2015 (BAanz AT 30.03.2015 B2)
- /BMU 16/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit: Leitfaden zur Stilllegung, zum sicheren Einschluss und zum Abbau von Anlagen oder Anlagenteilen nach § 7 des Atomgesetzes, vom 23. Juni 2016 (BAanz AT 19.07.2016 B7)
- /GKN 14/ EnBW Kernkraft GmbH: Stilllegung und Abbau von Anlagenteilen des Kernkraftwerks Neckarwestheim Block I (GKN I), Sicherheitsbericht, November 2014.
- /GRS 15/ M. Röwekamp et al.: Fortschrittliche Methoden und Werkzeuge für probabilistische Sicherheitsanalysen, GRS-A-3742, Juli 2015
- /KKB 15/ Vattenvall Europe Nuclear Energy: Stilllegung und Abbau Kernkraftwerk Brunsbüttel, Sicherheitsbericht Revision 2, Februar 2015.
- /KKP 14/ EnBW Kernkraft GmbH: Stilllegung und Abbau von Anlagenteilen des Kernkraftwerks Philippsburg Block I (KKP I), Sicherheitsbericht, Dezember 2014.
- /KKU 15/ Kernkraftwerk Unterweser: Sicherheitsbericht Stilllegung und Abbau des Kernkraftwerkes Unterweser (KKU) und Betrieb des Lagers für radioaktive Abfälle Unterweser (LUnA), Juni 2015
- /KTA 03/ Kerntechnischer Ausschuss, Sicherheitstechnische Regel KTA 3602, Lagerung und Handhabung von Brennelementen und zugehörigen Einrichtungen in Kernkraftwerken mit Leichtwasserreaktoren, Fassung November 2003
- /KTA 15/ Kerntechnischer Ausschuss, Sicherheitstechnische Regel KTA 3303, Wärmeabfuhrsysteme für Brennelementlagerbecken von Kernkraftwerken mit Leichtwasserreaktoren, Fassung November 2015

/RSK 19/ Reaktorsicherheitskommission RSK: Anforderungen bei einer passiven Kühlung der Brennelemente im Lagerbecken, Stellungnahme der 509. Sitzung der Reaktorsicherheitskommission vom 27.03.2019

/RSK 20/ Reaktorsicherheitskommission RSK: Anforderungen an die Kühlung der Brennelemente im Lagerbecken im Restbetrieb, Stellungnahme der 518. Sitzung der Reaktorsicherheitskommission vom 21.10.2020

Abbildungsverzeichnis

Abb. 4.1	Abhängigkeit der verfügbaren Mindestkarenzzeit von der Nachzerfallsleistung im BLB. Die verschiedenen Kurven stellen die Mindestkarenzzeit für eine Erwärmung dar (blau: Erwärmung von 45°C auf 60°C, violett: 30°C → 60°C, grün: 45°C → 80°C, rot: 30°C → 80°C)	17
----------	--	----

Tabellenverzeichnis

Tab. 3.1	Zusammenstellung der erforderlichen Funktionen von Systemen und Komponenten zur Sicherstellung der Schutzziele	8
----------	--	---

Abkürzungsverzeichnis

BLB	Brennelementlagerbecken
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit
DWR	Druckwasserreaktor
EVA	Einwirkungen von außen
GRS	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit gGmbH
KTA	Kerntechnischer Ausschuss
RDB	Reaktordruckbehälter
RSK	Reaktorsicherheitskommission
SHB	Sicherheitsbehälter
SWR	Siedewasserreaktor

**Gesellschaft für Anlagen-
und Reaktorsicherheit
(GRS) gGmbH**

Schwertnergasse 1
50667 Köln

Telefon +49 221 2068-0

Telefax +49 221 2068-888

Forschungszentrum
Boltzmannstraße 14

85748 Garching b. München

Telefon +49 89 32004-0

Telefax +49 89 32004-300

Kurfürstendamm 200

10719 Berlin

Telefon +49 30 88589-0

Telefax +49 30 88589-111

Theodor-Heuss-Straße 4

38122 Braunschweig

Telefon +49 531 8012-0

Telefax +49 531 8012-200

www.grs.de

ISBN 978-3-947685-98-1