

Probabilistische Bewertung der Phasen des Restbetriebs

Probabilistische Bewertung der Phasen des Restbetriebs

Siegfried Babst
Gerhard Mayer
Jonathan Zert

März 2025

Anmerkung:

Das diesem Bericht zugrunde liegende Eigenforschungsvorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) unter dem Förderkennzeichen 4722R01270 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 BMUV übereinstimmen.

Deskriptoren

Kernkraftwerk, Nachbetrieb, Probabilistische Sicherheitsanalyse, Restbetrieb

Kurzfassung

Ziel des BMUV-Vorhaben 4722R01270 war die probabilistische Bewertung der Phasen des Restbetriebes, in denen noch eine aktive Kühlung der Brennelemente erforderlich ist. Die RSK-Stellungnahme „Anforderungen an die Kühlung der Brennelemente im Lagerbecken im Restbetrieb“ legt fest, welche Einrichtungen für die BE-Lagerbeckenkühlung im Laufe des Restbetriebes mindestens verfügbar zu halten sind. Es wurde untersucht, welchen Einfluss die Stilllegung von Komponenten und Ersatzmaßnahmen auf die Häufigkeit von Brennstabschadenszuständen für Anlagen vom Typ Konvoi/Vorkonvoi und SWR72 haben.

Die PSA für den Nachbetrieb von DWR-Anlagen wurde um die in der RSK-Stellungnahme festgelegten Phasen weiterentwickelt. Es wurde das gleiche Ereignisspektrum und zusätzlich der Flugzeugabsturz auf ein Nebenkühlwassergebäude sowie das Hochwasser betrachtet. Für Anlagen vom Typ SWR72 wurde der Ereignisablauf „Ausfall der Brennelement-Lagerbeckenkühlung“ für die drei Phasen Nachbetrieb, Restbetrieb Phasen 1 und 2 probabilistisch bewertet.

Für die betrachteten Anlagen wurden für den Restbetrieb Brennstabschadenshäufigkeiten von $< E-06/a$ berechnet. Die Ergebnisse wurden hinsichtlich ihrer sicherheitstechnischen Bedeutung bewertet. Die in der RSK-Stellungnahme getroffenen Festlegungen zur Redundanz im Restbetrieb führen nicht zu einer signifikanten Erhöhung der Brennstabschadenshäufigkeiten. Daher war kein Verbesserungspotential abzuleiten.

Für Anlagen vom Typ SWR72 wurden auch Aktivitätsfreisetzungen aus anderen Aktivitätsinventaren untersucht. Die größten Aktivitätsfreisetzungen und damit die größten potenziellen Strahlungsexpositionen sind bei den Ereignissen Erdbeben und anlageninterner Brand zu erwarten. Die berechneten Freisetzungshäufigkeiten liegen in der gleichen Größenordnung wie die in der PSA für den Nachbetrieb ermittelten Freisetzungshäufigkeiten für eine Vorkonvoi-Anlage und eine Anlage vom Typ SWR69.

Abstract

The aim of the BMUV project 4722R01270 was the probabilistic evaluation of the phases of the decommissioning in which active cooling of the fuel elements is still required. The RSK statement "Requirements for the cooling of fuel elements in the spent fuel pool during the decommissioning" specifies which facilities for fuel pool cooling must be kept available at a minimum during the decommissioning. The influence of component dismantling on the fuel damage frequency for Konvoi/Vorkonvoi and SWR72 type plants was investigated.

The spent fuel pool PSA for PWR plants has been further developed to include the phases specified in the RSK statement. The same initiating events were considered and in addition the initiating events aircraft crash into an essential service water building and flood. For the plant type SWR72, the event sequence "failure of the fuel pool cooling system" was probabilistically evaluated for three decommissioning phases.

For the plants considered, fuel damage frequencies below E-06/a were calculated for the decommissioning phases. The results were evaluated regarding their safety significance. The specifications made in the RSK statement do not lead to a significant increase in the fuel damage frequencies. Therefore, no potential for improvement could be derived.

For SWR72 type plants, activity releases from other activity inventories were also investigated. The largest releases of activity and thus the greatest potential radiation exposures are expected to occur during earthquakes and internal fires. The calculated release frequencies are in the same order of magnitude as the release frequencies determined for a Vorkonvoi plant and a SWR69 plant.

Inhaltsverzeichnis

	Kurzfassung	I
	Abstract.....	III
1	Einleitung.....	1
2	Stand von Wissenschaft und Technik.....	3
2.1	Bisherige Arbeiten der GRS	3
2.2	Stellungnahmen der RSK.....	4
2.3	Bewertungsmaßstäbe	6
2.4	Betriebshandbücher und Notfallhandbücher	8
2.5	Untersuchungen anderer Institutionen	9
3	Zu betrachtende Phasen	13
4	Karenzzeiten für Personalhandlungen.....	15
5	Reparatur	19
6	Endzustände.....	21
7	Probabilistische Bewertungen für DWR	23
7.1	Nachbetrieb	23
7.2	Restbetrieb Phase 1.....	24
7.2.1	Verfügbare Systeme	24
7.2.2	Notstromfall	25
7.2.3	Ausfall der BE-Lagerbeckenkühlung	26
7.2.4	Leck an der BE-Lagerbeckenauskleidung	28
7.2.5	Leck an angeschlossenen Rohrleitungen	30
7.2.6	Einwirkungen von außen.....	34
7.3	Restbetrieb Phase 2.....	43
7.3.1	Verfügbare Systeme	43

7.3.2	Notstromfall	44
7.3.3	Ausfall der BE-Lagerbeckenkühlung	46
7.3.4	Leck an der BE-Lagerbeckenauskleidung	47
7.3.5	Leck an angeschlossenen Rohrleitungen	49
7.3.6	Einwirkungen von außen.....	51
7.4	Zusammenfassung der Ergebnisse	55
8	Probabilistische Bewertungen für SWR.....	61
8.1	Eintrittshäufigkeit des auslösenden Ereignisses	61
8.2	Verfügbare Systeme	61
8.3	Nachbetrieb	63
8.4	Restbetrieb Phase 1.....	64
8.5	Restbetrieb Phase 2.....	66
8.6	Ereignisabläufe die ohne Brennelementschäden zur Freisetzung von radioaktiven Stoffen führen können	67
8.6.1	Erdbeben.....	68
8.6.2	Anlageninterner Brand	68
8.7	Zusammenfassung der Ergebnisse	69
9	Bewertung der sicherheitstechnischen Bedeutung	73
10	Zusammenfassung	75
	Literaturverzeichnis	79
	Abkürzungsverzeichnis	83
	Tabellenverzeichnis	85
	Abbildungsverzeichnis	87

1 **Einleitung**

Mit der Erteilung und Inanspruchnahme der Stilllegungs- und Abbaugenehmigung (SAG) gemäß § 7 Abs. (3) AtG beginnt der Restbetrieb der endgültig abgeschalteten Kernkraftwerke. Dieser Restbetrieb kann in mehrere Phasen strukturiert sein, z. B. Restbetrieb mit aktiver oder passiver Brennelementkühlung, brennelement- oder brennstofffreie Anlage.

In diesem Vorhaben werden für DWR-Anlagen des Typs Konvoi/Vorkonvoi und SWR-Anlagen des Typs SWR72 Phasen des Restbetriebes betrachtet, in denen noch eine aktive Kühlung der Brennelemente erforderlich ist, um Temperaturgrenzwerte im Lagerbecken einzuhalten. Die RSK-Stellungnahme „Anforderungen an die Kühlung der Brennelemente im Lagerbecken im Restbetrieb“ /RSK 20/ beschreibt für diese Anlagen verschiedene Phasen und legt fest, welche Einrichtungen für die BE-Lagerbeckenkühlung in diesen Phasen mindestens verfügbar zu halten sind.

Eine umfassende probabilistische Bewertung möglicher Schadensszenarien für die verschiedenen Phasen des Restbetriebs ist bisher nicht erfolgt. Ziel des Vorhabens war daher die Erstellung einer generischen probabilistischen Sicherheitsanalyse für Phasen des Restbetriebes, in denen sich abgebrannte Brennelemente im Brennelementlagerbecken befinden, die weiterhin abgeschirmt und aktiv gekühlt werden müssen.

Entsprechend der RSK-Stellungnahme „Anforderungen an die Kühlung der Brennelemente im Lagerbecken im Restbetrieb“ ist, in Abhängigkeit von der vorhandenen Karenzzeit bis zum Erreichen bestimmter Kühlmitteltemperaturen, die dauerhafte Außerbetriebnahme von Komponenten zur Brennelement-Lagerbeckenkühlung zulässig. Es wird untersucht, welchen Einfluss die Außerbetriebnahme von Komponenten auf die Häufigkeit von Brennstabschadenszuständen hat.

Zunächst wurde der relevante Stand von Wissenschaft und Technik auf dem Gebiet der Sicherheitsanalysen, insbesondere der PSA für den Nachbetrieb/Restbetrieb aufbereitet. Die Ergebnisse zu diesem Arbeitspunkt sind im Kapitel 2 zusammengestellt.

In den Kapiteln 3 – 6 werden die einzelnen Phasen des Restbetriebes, die vorhandenen Karenzzeiten und die Endzustände beschrieben. Für die Restbetriebsphase 2 wurde die Zuverlässigkeit einer Reparaturmaßnahme untersucht.

Die PSA der GRS für den Nachbetrieb von DWR-Anlagen wurde um die in der RSK-Stellungnahme /RSK 20/ festgelegten Phasen weiterentwickelt. Es wurde das gleiche Ereignisspektrum und zusätzlich die Einwirkungen von außen „Flugzeugabsturz auf ein Nebenkühlwassergebäude“ sowie „Hochwasser“ betrachtet. Die probabilistischen Bewertungen beinhalten auch die in der RSK-Stellungnahme /RSK 20/ beschriebenen Ersatzmaßnahmen (Reparatur, mobile Beckenkühlpumpe). Die Ergebnisse zu diesem Arbeitspunkt sind im Kapitel 7 zusammengestellt.

Die GRS hat bisher keine probabilistischen Analysen für das BE-Lagerbecken für Anlagen vom Typ SWR72 durchgeführt. Für diesen Anlagentyp wurde daher exemplarisch der Ereignisablauf „Ausfall der Brennelement-Lagerbeckenkühlung“ für die drei in der RSK-Stellungnahme beschriebenen Phasen probabilistisch bewertet. Ferner wurden Aktivitätsfreisetzungen aus anderen Quellen als dem BE-Lagerbecken untersucht. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind im Kapitel 8 beschrieben.

Die sicherheitstechnische Bedeutung der Ereignisabläufe wurde für die drei in der RSK-Stellungnahme festgelegten Phasen ermittelt und verglichen. Dazu dienten die berechneten Häufigkeiten für Brennstabschadenszustände. Die Ergebnisse zu diesem Arbeitspunkt sind im Kapitel 9 dargestellt. Kapitel 10 enthält eine Zusammenfassung der Ergebnisse des Vorhabens.

2 Stand von Wissenschaft und Technik

Im Folgenden wird der für das Vorhaben relevante Stand von Wissenschaft und Technik zusammenfassend dargestellt.

2.1 Bisherige Arbeiten der GRS

BMU-Projekt 4716R01323 - Generische Sicherheitsbewertung von Kernkraftwerken im Nachbetrieb

Die GRS hat im Rahmen dieses Vorhabens eine detaillierte probabilistische Sicherheitsanalyse für Kernkraftwerke im Nachbetrieb durchgeführt /GRS 19/. Dabei wurden eine DWR-Anlage vom Typ Konvoi/Vorkonvoi und eine Anlage vom Typ SWR69 betrachtet. Als Grundlage für diese Bewertungen dienten die Ergebnisse der BMU/BfS-Vorhaben SR 2274 und SR 2383, Sicherheitstechnische Bedeutung von Zuständen bei Nicht-Leistungsbetrieb eines DWR /GRS 03/ sowie SR 2467, Methodenentwicklung zur Bewertung von auslösenden Ereignissen bei Nichtleistungsbetrieb für SWR der Baulinie 69 /GRS 06/.

Für die DWR-Anlage wurde eine Brennstabschadenshäufigkeit von $9,8E-07/a$ und für die SWR-Anlage eine Brennstabschadenshäufigkeit von $4,1E-06/a$ ermittelt. Die Brennstabschadenshäufigkeiten im Nachbetrieb liegen für die betrachteten Anlagen in der gleichen Größenordnung, wie die für den Nichtleistungsbetrieb ermittelten Häufigkeiten für Schadenszustände /GRS 03/, /GRS 06/.

Des Weiteren wurden Ereignisabläufe, die ohne Brennelementschäden zur Freisetzung von radioaktiven Stoffen führen können, betrachtet. Größere Aktivitätsfreisetzungen sind durch Brände und Erdbeben möglich, wobei die potenziellen Strahlenexpositionen jedoch deutlich geringer sind als die vorgegebene Begrenzung der Exposition durch Störfälle von 50 mSv gemäß § 104 (1) StrlSchV /SSV 18/. Bei den durchgeführten Untersuchungen ergaben sich hohe Häufigkeiten ($> E-03/a$) für Aktivitätsfreisetzungen durch Brände beispielsweise von Abfallcontainern oder Filtern.

Bei den probabilistischen Bewertungen wurde davon ausgegangen, dass alle Einrichtungen zur BE-Lagerbeckenkühlung über den gesamten Zeitverlauf des Nachbetriebes vollständig verfügbar bleiben. Eine mögliche Verringerung des Redundanzgrades des

Sicherheitssystems durch die dauerhafte Außerbetriebnahme von Komponenten für die BE-Lagerbeckenkühlung im Laufe des Nachbetriebes wurde nicht betrachtet.

BMU-Projekt 4718R1311 - Untersuchungen zu sicherheitstechnischen Fragestellungen

Eine Verringerung des Redundanzgrades wurde im Zusammenhang mit den Diskussionen zur Erstellung der RSK-Stellungnahme /RSK 20/ im Rahmen des BMU-Projektes 4718R1311 (AP 1 „Vertiefte Untersuchungen von Betriebserfahrungen aus Kernreaktoren“) beispielhaft untersucht /GRS 20/. Dabei wurde die Zuverlässigkeit des Beckenkühlsystems in zwei verschiedenen Restbetriebsphasen für eine DWR-Anlage probabilistisch bewertet. Ausgangspunkt (auslösendes Ereignis) für die betrachteten Szenarien war jeweils der Ausfall der laufenden betrieblichen Beckenkühlpumpe, da solche Ausfälle in der deutschen Betriebserfahrung aufgetreten sind.

Für eine erste Phase wurde unterstellt, dass für die Lagerbeckenkühlung noch zwei Notnachkühlstränge und für eine weitere Phase ein Notnachkühlstrang sowie eine mobile Pumpe zum Ersatz der betrieblichen Beckenkühlpumpe in Reserve stehen. Diese Szenarien lieferten in den betrachteten Phasen etwa gleichhohe Häufigkeiten für den Ausfall der Beckenkühlsysteme.

2.2 Stellungnahmen der RSK

Die Reaktorsicherheitskommission hat sich in zwei Stellungnahmen mit dem Restbetrieb beschäftigt:

RSK-Stellungnahme „Anforderungen bei einer passiven Kühlung der Brennelemente im Lagerbecken“ /RSK 19/

Diese Stellungnahme befasst sich mit der Phase des Restbetriebs, in der die abzuführende Nachwärme aus dem BE-Lagerbecken so weit reduziert ist, dass bei Ausfall der aktiven Systeme eine BE-Lagerbeckentemperatur von 60 °C durch passive Kühlung dauerhaft nicht überschritten wird.

Für das Schutzziel „Kühlung der Brennelemente (K)“ werden betrachtet:

- Normalbetrieb,
- Verringerte Wärmeabfuhr aus dem Brennelementlagerbecken,

- Kühlmittelverlust aus dem Brennelementlagerbecken,
- Erdbeben und Notstandsfälle.

Die Stellungnahme kommt hier zu dem Schluss, dass sich keine Anforderungen an aktive Kühlsysteme oder an Nachspeisesysteme ergeben, die über die betrieblichen Anforderungen hinausgehen. Daher ist auch keine Notstromversorgung der hierfür benötigten Einrichtungen erforderlich. Für Erdbeben und Notstandsfälle ist eine Nachspeisemöglichkeit vorzusehen. Dafür können auch Ersatzmaßnahmen herangezogen werden (Einspeisung z. B. aus Notspeisebecken oder dem Feuerlöschsystem mit mobilen Pumpen an festinstallierte Leitungen, die zum Brennelementlagerbecken führen).

Im Hinblick auf die Robustheit bzw. den auslegungsüberschreitenden Bereich wurden Einwirkungen betrachtet, die zu gravierenderen Wasserverlusten aus dem BE-Lagerbecken führen können. Um bei solchen Ereignissen langfristig die Nachspeisung in das BE-Lagerbecken sicherzustellen, ist aus Sicht der RSK für die DWR-Anlagen eine Maßnahme zur Rückförderung von Leckagen aus dem Sicherheitsbehältersumpf in das BE-Lagerbecken vorzusehen.

RSK-Stellungnahme „Anforderungen an die Kühlung der Brennelemente im Lagerbecken im Restbetrieb“ /RSK 20/ mit überarbeiteter Fassung vom 12.03.2023 /RSK 23/

Diese RSK-Stellungnahme legt fest, welche Einrichtungen für die BE-Lagerbeckenkühlung im Laufe des Restbetriebes mindestens verfügbar zu halten sind. Dazu wurden zwei Phasen festgelegt.

- Phase 1: Bei Ausfall der BE-Lagerbeckenkühlung vergehen mehr als 24 Stunden, bis die Kühlmitteltemperatur 80°C überschreitet.

In dieser Phase sind drei Beckenkühlstränge (drei Pumpen) bereitzuhalten, von denen zwei gegen das Bemessungserdbeben ausgelegt sein müssen.

- Phase 2: Bei Ausfall der BE-Lagerbeckenkühlung vergehen mehr als 3 Tage, bis die Kühlmitteltemperatur 80°C überschreitet.

In dieser Phase sind zwei Beckenkühlstränge (zwei Pumpen) und eine Ersatzmaßnahme bereitzuhalten. Ein Strang und die Ersatzmaßnahme müssen gegen das Bemessungserdbeben ausgelegt sein.

Gemäß den Anforderungen dieser RSK-Stellungnahme wären z. B. in den DWR-Anlagen in den Phasen 1 und 2 die Nachkühlpumpen nicht mehr erforderlich und könnten abgebaut werden.

In der Phase 2 ist – im Hinblick auf Erdbeben mit möglichen Folgeschäden im betrieblichen Strang – eine erdbebenfeste Ersatzmaßnahme zur Kühlung vorzusehen (z. B. mobile Beckenkühlpumpe mit installierten Anschlüssen zur Wiederherstellung eines Kreislaufbetriebs), um ein Überschreiten von 80°C Kühlmitteltemperatur im BE-Lagerbecken zu verhindern.

Die Fassung der Stellungnahme aus dem Jahr 2020 /RSK 20/ wurde revidiert und durch eine neue Fassung im Jahr 2023 ersetzt /RSK 23/. In der revidierten Fassung wurden Erläuterungen und redaktionelle Änderungen vorgenommen, weil sich in der Anwendung der Originalfassung in Aufsichtsverfahren Missverständnisse aus der Verwendung des Begriffs „betrieblicher Beckenkühlstrang“ ergeben haben. Die Anforderungen an die Verfügbarkeit von Einrichtungen für die BE-Lagerbeckenkühlung im Restbetriebes wurden gegenüber der ursprünglichen Fassung nicht verändert.

2.3 Bewertungsmaßstäbe

PSA-Leitfaden

Im Rahmen der Periodischen Sicherheitsüberprüfungen war für alle KKW auch eine PSA der Stufe 1 für den Nichtleistungsbetrieb vorzulegen. Umfang und Inhalt sind durch den PSA-Leitfaden /BAN 05/, /FAK 05/ und seine Aktualisierung /FAK 15/ festgelegt. Dazu waren Betriebszustände/Betriebsphasen zu definieren und für diese Zustände mögliche auslösende Ereignisse zu ermitteln. Im Rahmen dieser PSA waren auch Ausfälle der BE-Lagerbeckenkühlung zu betrachten.

Für den Nachbetrieb/Restbetrieb ist keine PSA vorzulegen. Prinzipiell können die Anforderungen aus dem PSA-Leitfaden für die Erstellung einer PSA für den Nachbetrieb/Restbetrieb herangezogen werden. Die Vorgehensweise bei den Ereignisablauf- und Fehlerbaumanalysen ist die gleiche wie für Ereignisse im Leistungsbetrieb/Nichtleistungsbetrieb. Gemäß der letzten Aktualisierung des PSA-Leitfadens /FAK 15/ ist für die relevanten auslösenden Ereignisse im Nichtleistungsbetrieb die Häufigkeit für

Brennstabschadenszustände zu ermitteln, d. h., eine Unterscheidung in Gefährdungs- und Kernschadenszustände ist nicht mehr erforderlich.

Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke /SIA 15/

Beginnend im Jahr 2003 wurde das bestehende kerntechnische Regelwerk überarbeitet und modernisiert. Im Ergebnis entstanden die „Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke“, welche für alle sicherheitstechnischen Bewertungen, insbesondere für Anlagenänderungen heranzuziehen sind. Die Sicherheitsanforderungen berücksichtigen systematisch alle Betriebsphasen einer Anlage. Ferner wurden phasenspezifisch Nachweiskriterien, Anforderungen an Sicherheitseinrichtungen sowie zu untersuchende Ereignisse definiert (/SIA 15/ Anhang 2). Enthalten sind auch Ereignissen, welche für das BE-Lagerbecken zu betrachten sind. Diese Ereignisse sind auch für den Nachbetrieb/Restbetrieb relevant.

Für Ereignisse, die das BE-Lagerbecken betreffen, ist Folgendes nachzuweisen:

- Begrenzung der Beckenwassertemperatur auf Werte unterhalb der Auslegungstemperatur des Beckens zur Sicherstellung seiner Integrität. Sofern zur Aufrechterhaltung der Kühlung der Brennelemente die Begehbarkeit des Sicherheitsbehälters oder des Beckenbereichs erforderlich ist, ist nachzuweisen, dass die Bedingungen für die Begehbarkeit eingehalten werden.
- Ausreichende Wasserüberdeckung zur Sicherstellung der Brennelementkühlung.

Für das BE-Lagerbecken zu betrachtende Ereignisse sind u. a.:

- Ausfälle von Becken-Kühlsträngen,
- Notstromfälle und
- Kühlmittelverluste aus dem Brennelement-Lagerbecken durch Leckagen oder Brüche von Anschlussleitungen.

Leitfaden zur Stilllegung, zum sicheren Einschluss und zum Abbau von Anlagen oder Anlagenteilen nach § 7 des Atomgesetzes (Stilllegungsleitfaden) /SLF 21/

Hier wird auch auf die während der Nachbetriebsphase bereitzuhaltenden Sicherheitssysteme eingegangen:

Die erforderliche Verfügbarkeit der Systeme in der Nachbetriebsphase richtet sich nach den im Betriebshandbuch (BHB) festgelegten Regelungen für den Stillstand der kern-technischen Anlage. Es bleibt dem Betreiber vorbehalten, weitergehende Anpassungen an längerfristige Stillstände unter besonderer Berücksichtigung der jeweiligen nuklearen Gefährdung zu beantragen. Auch sind Vereinfachungen im Bereich der Spezifikationen (SSp), z. B. Verfügbarkeit von Systemen oder Reduktion von wiederkehrenden Prüfungen denkbar.

Befinden sich während des Stilllegungsverfahrens noch Brennelemente in der Anlage, so sind noch folgende Ereigniskategorien (in Anlehnung an die Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke /SIA 15/) zu betrachten und zu bewerten:

- Verringerte Wärmeabfuhr aus dem Brennelementlagerbecken,
- Kühlmittelverlust aus dem Brennelementlagerbecken,
- Reaktivitätsänderungen im Brennelementlagerbecken und Kritikalitätsstörfall,
- Ereignisse bei Handhabung und Lagerung von Brennelementen.

Specific Safety Guide SSG-3 (Rev. 1): Development and Application of Level 1 Probabilistic Safety Assessment for Nuclear Power Plants /IAEA 24/

Gemäß IAEA SSG-3 soll eine PSA der Stufe 1 auch die Brennelemente im BE-Lagerbecken berücksichtigen. Das Kapitel "10. Specific Aspects of Level 1 PSA for the Spent Fuel Pool" beschreibt den Umfang und die Vorgehensweise für eine solche probabilistische Sicherheitsanalyse.

Im Kapitel "12. Use and Applications of Level 1 PSA, 12.19 (e)" wird auch auf die Stilllegung eingegangen. Demgemäß sollte die PSA in der Stilllegungsphase der Anlage verwendet werden, um sicherzustellen, dass die Risiken im Zusammenhang mit dem Stilllegungsprozess und den verbleibenden radioaktiven Stoffen, die am Standort gelagert werden, vernachlässigbar sind.

2.4 Betriebshandbücher und Notfallhandbücher

Die Betriebshandbücher beinhalten Prozeduren für den Ausfall der BE-Lagerbeckenkühlung und den Kühlmittelverlust aus dem Lagerbecken.

Änderungen an der Verfügbarkeit der Einrichtungen zur BE-Lagerbeckenkühlung im Sinne der RSK-Stellungnahme „Anforderungen an die Kühlung der Brennelemente im Lagerbecken im Restbetrieb“ /RSK 20/ sind der GRS nur von der Anlage KRB (SWR72) bekannt. Der GRS liegen jedoch nicht alle BHB für die Anlagen im Restbetrieb in der aktuellen Fassung vor.

Die Notfallhandbücher enthalten Prozeduren für die Einspeisung von Kühlmittel in das BE-Lagerbecken von außen und für die ungefilterte Druckentlastung in Falle eines Ausfalls aller Beckenkühlstränge.

2.5 Untersuchungen anderer Institutionen

Es wurden die Proceedings der ANS PSA-Konferenzen (2011 – 2021) und der PSAM-Konferenzen (2012 – 2022) ausgewertet. Im Folgenden werden beispielhaft Veröffentlichungen aufgeführt, welche probabilistische Sicherheitsanalysen für das BE-Lagerbecken zum Inhalt hatten.

Van Opstal, Golovchuk: Belgian Spent Fuel Pool Internal Events PSA, PSA 2021

Es wird das Vorgehen für die PSA für die Lagerbecken der belgischen KKW beschrieben. Die Gesamthäufigkeit von Brennelementschäden (Freilegung von Brennelementen) lag zwischen 2E-07/a und 2E-08/a. Nach dem Unfall in Fukushima eingeführte Notfallmaßnahmen wurden berücksichtigt.

Krcal, Troili, Bäckström: Control Logic Encoding using RiskSpectrum ModelBuilder, PSAM 16, 2022

Mit dem RiskSpectrum Tool “ModelBuilder” wurden u. a. Ausfälle der BE-Lagerbeckenkühlung untersucht. Im betrachteten Fall betrug die Zeit, bis das Kühlwasser zu sieden beginnt, etwa eine Woche. Nach Beginn des Siedens würde es noch etwa drei Wochen dauern, bis die Brennelemente freigelegt werden. Innerhalb dieser Zeit können Kühlsystemkomponenten repariert werden, erneut ausfallen oder andere Komponenten im späteren Unfallablauf ausfallen.

Mittels Monte-Carlo-Simulationen kann die Dynamik der physikalischen Prozesse und deren Wechselwirkungen mit der Anlage (Steuerungen) berücksichtigt werden. Am Beispiel der Füllstands- und Temperaturregelung wird gezeigt, wie dies in einer

ModelBuilder-Wissensbasis umgesetzt werden kann. Quantitative Ergebnisse wurden nicht berichtet.

Kanetsyan, Amirjanyana, Kovacs: Internal Events Level 1 PSA Study of Armenian NPP Spent Fuel Pools, PSAM 14, 2018

Hier wird über eine PSA für die BE-Lagerbecken des armenischen Kernkraftwerks berichtet, welche im Rahmen der Lebensdauerverlängerung durchgeführt wurde. Es wurden interne Ereignisse für abgebrannte Brennelemente bei vollem Leistungsbetrieb des Blockes 2 betrachtet. Block 1 ist seit 1989 abgeschaltet. Es ist nicht bekannt, ob die Verfügbarkeit von Systemen zur Lagerbeckenkühlung des Blockes 1 verringert wurde. Die Brennstabschadenshäufigkeiten bei voller Leistung des Blockes 2 betragen $5,74\text{E-}7/\text{a}$ für das Lagerbecken des Blocks 1 und $5,78\text{E-}7/\text{a}$ für Block 2.

Tian, Chaoa, Hsu, Chiu, Yu-Ting, Chiou, Lin: The Study of Spent Fuel Pool Risk at Decommissioning Nuclear Power Plant in Taiwan, PSAM 14, 2018

Hier wird das Risiko für eine stillgelegte Anlage untersucht, die ihren Brennstoff auf unbestimmte Zeit im BE-Lagerbecken lagert. Zu den untersuchten auslösenden Ereignissen gehören der Kühlmittelverlust, der Notstromfall, der Verlust der Kühlung, interne Brände, interne Überflutungen, seismische Ereignisse, starke Windereignisse und Flugzeugabstürze. Die ermittelte Häufigkeit für eine Freilegung abgebrannter Brennelemente ist etwa eine Größenordnung geringer als die Kernschadenshäufigkeit im Leistungsbetrieb. In der Untersuchung werden Systemänderungen und der Abbau von Systemen berücksichtigt.

Sihvola, Tunturivuori: Probabilistic Risk Assessment of the Spent Fuel Pools of Olkiluoto 1 and 2 NPP Units, PSAM 14, 2018

Hier wird über eine PSA für die BE-Lagerbecken des KKW Olkiluoto berichtet. Die PSA umfasst interne Ereignisse, interne Brände und Überflutungen sowie externe Ereignisse während des Leistungsbetriebs der Anlage. Es ergab sich eine sehr geringe Häufigkeit für eine Freilegung von Brennelementen, was auf verfügbare Redundanzen, unterschiedliche Wasserversorgungsmöglichkeiten und lange Karenzzeiten zurückzuführen ist.

Leloutre, Georgescu: Development of a spent fuel pool level 1 PSA model for the French EPR reactor (FA3), PSAM 11, 2012

IRSN hat eine PSA der Stufe 1 für das EPR-Lagerbecken entwickelt. Diese PSA und ihre Ergebnisse dienen dazu die PSA des Betreibers zu verifizieren und andere Sicherheitsanalysen zu unterstützen. Die Ergebnisse der PSA werden zu 99 % durch Ausfälle der Lagerbeckenkühlung bestimmt. Detaillierte quantitative Ergebnisse wurden nicht berichtet.

Fazit

Probabilistische Sicherheitsanalysen für das BE-Lagerbecken werden vielerorts als Teil einer Full Scope PSA /IAEA 16/, /IAEA 24/ durchgeführt. Es wird nur in wenigen Veröffentlichungen über eine PSA für eine stillgelegte Anlage berichtet. Es ist nur eine Untersuchung bekannt (Taiwan, PSAM 14), welche dauerhafte Außerbetriebnahmen von Systemen/Komponenten zur BE-Lagerbeckenkühlung während der Stilllegung der Anlage betrachtet.

3 Zu betrachtende Phasen

Der Nachbetrieb/Restbetrieb einer Anlage kann gemäß RSK-Stellungnahme „Anforderungen an die Kühlung der Brennelemente im Lagerbecken im Restbetrieb“ /RSK 20/ in vier Phasen unterteilt werden. Als Kriterium dient die Zeit bis zum Erreichen einer bestimmten Kühlmitteltemperatur im Lagerbecken bei Ausfall der Beckenkühlsysteme.

Tab. 3.1 Phasen des Nachbetriebs/Restbetriebs

Phase	Karenzzeit	Nachzerfallsleistung
Nachbetrieb	≤ 24 h bis 80° C	> 2,7 MW
Restbetrieb Phase 1	> 24 h bis 80° C	< 2,7 MW
Restbetrieb Phase 2	> 3 d bis 80° C	< 1,2 MW
Restbetrieb Passivkühlung	∞ bis 60° C	

Nachbetrieb

Diese Phase schließt sich unmittelbar an den Leistungsbetrieb an. In dieser Phase sind noch alle Einrichtungen zur BE-Lagerbeckenkühlung inklusive ihrer Hilfs- und Versorgungseinrichtungen verfügbar.

Restbetrieb Phase 1

Diese Phase wird ca. sechs Monate nach der endgültigen Abschaltung der Anlage erreicht. Die sichere Ereignisbeherrschung kann auf Basis der in Tab. 3.2 geschriebenen Mindestsystemkonfiguration gezeigt werden /RSK 20/, wobei die beschriebenen Vorkehrungen alle verfügbar sein müssen.

Tab. 3.2 Mindestsystemkonfiguration in Phase 1

Anforderungen an Systemfunktion Beckenkühlung in Phase 1		
Vorkehrungen für Kühlung	Auslegung gegen Bemessungserdbeben (BEB)	Notstromversorgung
Zwei Notnachkühlstränge	Ja	Zwei D2-Diesel (DWR) bzw. zwei Notstromdiesel (SWR)
Ein betrieblicher Beckenkühlstrang	Keine Anforderung	Notstromdiesel oder mobiler Diesel (auf Anlagengelände vorzuhalten)
Vorbereitete Maßnahmen zur Kühlstrang-Instandsetzung in < 24 h	Verfügbar nach BEB	Unter Notstrombedingungen durchführbar

Restbetrieb Phase 2

Diese Phase wird ca. 1,5 Jahre nach der endgültigen Abschaltung der Anlage erreicht. Die sichere Ereignisbeherrschung kann auf Basis der in Tab. 3.3 beschriebenen Mindestsystemkonfiguration gezeigt werden /RSK 20/, wobei die beschriebenen Vorkehrungen alle verfügbar sein müssen.

Tab. 3.3 Mindestsystemkonfiguration in Phase 2

Anforderungen an Systemfunktion Beckenkühlung in Phase 2		
Vorkehrungen für Kühlung	Auslegung gegen BEB	Notstromversorgung
Ein Notnachkühlstrang	Ja	Ein D2-Diesel (DWR) bzw. Notstromdiesel (SWR)
Ein betrieblicher Beckenkühlstrang	Keine Anforderung	Notstromdiesel oder mobiler Diesel (auf Anlagengelände vorzuhalten)
Eine Ersatzmaßnahme zur BELB-Kühlung in < 3 d	Ja	mobiler Diesel oder dieselbetriebene Pumpe
Vorbereitete Maßnahmen zur Kühlstrang-Instandsetzung in < 3 d	Verfügbar nach BEB	Unter Notstrombedingungen durchführbar

4 **Karenzzeiten für Personalhandlungen**

Im Rahmen des BMWi-Forschungsvorhabens RS1198 „Fortschrittliche Methoden und Werkzeuge für probabilistische Sicherheitsanalysen“ wurden für eine DWR- und eine SWR-Anlage Szenarien mit vollständigem Ausfall der BE-Lagerbeckenkühlung untersucht /GRS 14/. Dabei wurden eine DWR-Anlage vom Typ Konvoi und eine SWR-Anlage der Baulinie 72 betrachtet.

DWR-Anlage

Für eine DWR-Anlage vom Typ Konvoi ergaben sich folgende zeitliche Abläufe bei vollständigem Ausfall der BE-Lagerbeckenkühlung, siehe Tab. 4.1.

Tab. 4.1 Zeitlicher Ablauf bei Ausfall der BE-Lagerbeckenkühlung (DWR)

	Vollbeladung, Becken isoliert	Normalbeladung nach einer Revision
Nachzerfallsleistung	13,6 MW	2,43 MW
Sieden	ca. 8,5 h	ca. 30 h
Kühlmitteltemperatur im BE-Lagerbecken > 120°C	ca. 28 h	ca. 8 Tage
Wasserstand Oberkante Brennelemente	ca. 50 h	ca. 14 Tage

Im Zustand „Vollbeladung, Becken isoliert“ befinden sich alle Brennelemente im BE-Lagerbecken. Für diesen ungünstigsten Fall (vollständige Kernausschmelze in das BE-Lagerbecken unmittelbar nach der Abschaltung der Anlage) ergibt sich für die betrachtete DWR-Anlage eine Karenzzeit von ca. 8,5 Stunden, in der die Beckenkühlsysteme wieder in Betrieb genommen werden können und ca. 28 Stunden bis eine Druckentlastung des Sicherheitsbehälters erforderlich wird, um langfristig Schäden am BE-Lagerbecken zu verhindern. Nach spätestens 50 Stunden müsste wieder Kühlmittel in das BE-Lagerbecken eingespeist werden, um die Freilegung der Brennelemente zu verhindern. In den Restbetriebsphasen (Nachzerfallsleistung < 2,7 MW) steht sehr viel mehr Zeit für Diagnose und Personalhandlungen (> 24 Stunden) zur Verfügung.

SWR-Anlage

Für eine SWR-Anlage vom Typ SWR72 ergaben sich folgende zeitliche Abläufe bei vollständigem Ausfall der BE-Lagerbeckenkühlung, siehe Tab. 4.2.

Tab. 4.2 Zeitlicher Ablauf bei Ausfall der BE-Lagerbeckenkühlung (SWR)

	Vollbeladung, Becken isoliert	Normalbeladung nach einer Revision
Nachzerfallsleistung	13,8 MW	1,62 MW
Sieden	ca. 7,3 h	ca. 32 h
Öffnen von Druckabbauklappen zum Maschinenhaus	ca. 7,8 h	> 32 h
Wasserstand Oberkante Brennelemente	ca. 41 h	> 17 Tage

Für die betrachtete SWR-Anlage ergibt sich im ungünstigsten Fall (vollständige Kernausladung in das BE-Lagerbecken unmittelbar nach der Abschaltung der Anlage) eine Karenzzeit von ca. 7,3 Stunden, in der die Beckenkühlsysteme wieder in Betrieb genommen werden können. Kann das Sieden des Wassers im BE-Lagerbecken nicht verhindert werden, steigt der Druck im Reaktorgebäude, der aber nach geringem Druckaufbau durch selbsttätiges Öffnen der Druckabbauklappen zum Maschinenhaus wieder abgebaut wird. Nach spätestens 41 Stunden müsste wieder Kühlmittel in das BE-Lagerbecken eingespeist werden, um die Freilegung der Brennelemente zu verhindern.

Zuverlässigkeit von Personalhandlungen zur Diagnose

Nach einem Ausfall der BE-Lagerbeckenkühlung sind in jedem Fall Personalhandlungen erforderlich, um einen in Reserve stehenden Beckenkühlstrang zuzuschalten. Misslingen diese Maßnahmen und fallen auch die Systemfunktionen zur automatischen Füllstandshaltung aus, so sind weitere Personalhandlungen (Notfallmaßnahmen) zur Einspeisung von Kühlmittel in das BE-Lagerbecken vorzunehmen. In den entsprechenden Fehlerbäumen ist daher eine übergeordnete Diagnose berücksichtigt. Ziel der Diagnose ist es, den Ausfall der BE-Lagerbeckenkühlung zu erkennen und eine Strategie zu deren Wiedereinrichtung zu wählen.

Für die Nachbetriebsphase wurde im BMU-Projekt 4716R01323, Generische Sicherheitsbewertung von Kernkraftwerken im Nachbetrieb, eine Wahrscheinlichkeit von

1,7E-05 (Medianwert 5E-06, Error-Faktor 12,8) dafür abgeschätzt, dass diese übergeordnete Diagnose nicht erfolgreich durchgeführt wird.

Für die Restbetriebsphasen steht deutlich mehr Zeit für eine Diagnose (> 24 Stunden) zur Verfügung. Ein Ausfall der BE-Lagerbeckenkühlung kann hier durch spätere Schichtübergaben oder Rundgänger erkannt werden. Dafür, dass der Ausfall der Beckenkühlung auch später nicht erkannt wird, wird gemäß /SWA 83/, Tabelle 20-17 und Gleichung 10-15, eine Wahrscheinlichkeit von ca. 0,063 (Medianwert 0,05; Error-Faktor 3 gemäß Table 20-21, Item 2 a) angesetzt. Insgesamt ergibt sich mit dieser Abschätzung ein Erwartungswert von 1E-06 ($1,7E-05 \times 0,063$, Medianwert 2,5E-07, Error-Faktor 16) dafür, dass diese übergeordnete Diagnose nicht erfolgreich durchgeführt wird.

5 Reparatur

Gemäß RSK-Stellungnahme können vorbereitete Maßnahmen zur Kühlstrang-Instandsetzung für die Beherrschung von Ereignisabläufen herangezogen werden. Voraussetzung ist, dass dafür ausreichend Karenzzeit zur Verfügung steht. Im Folgenden wird die mittlere Reparaturzeit für eine ausgefallene BE-Lagerbeckenpumpe in DWR-Anlagen und eine zugehörige Versagenswahrscheinlichkeit für die rechtzeitige erfolgreiche Reparatur abgeschätzt. Als Grundlage dienen die in /GRS 19/ ermittelten meldepflichtigen Ereignisse mit Ausfall einer BE-Lagerbeckenpumpe. Die in der Tab. 5.1 aufgeführten Daten wurden den Ereignismeldungen entnommen.

Tab. 5.1 Ausfälle von BE-Lagerbeckenpumpen und Reparaturzeiten

Meldepflichtiges Ereignis	Durchgeführte Reparaturarbeiten	Dauer der Reparatur
2004/013	Motortausch	nicht bekannt (> 24 h)
2005/119	Lagertausch, Gleitringdichtungstausch	24 h
2007/071	Tausch des Pumpenlaufzeugs	nicht bekannt
2007/113	Motorreparatur	nicht bekannt
2014/010	Tausch des Pumpenlaufzeugs	33 h
2015/035	Tausch des Pumpenlaufzeugs, Fremdkörpersuche	3 Tage
2022/030	Statische und dynamische Entlüftungen	18 h

Nicht in allen Fällen ist der GRS die Dauer der Reparatur bekannt. Es wird angenommen, dass in diesen Fällen die Reparaturzeit in der gleichen Größenordnung wie bei den anderen Ereignissen liegt (zwischen 18 und 72 Stunden).

Aus den vier bekannten Reparaturzeiten ergibt sich eine mittlere Reparaturdauer von ca. 37 Stunden. Die Reparatur einer ausgefallenen BE-Lagerbeckenpumpe kann aufgrund dieser Daten in der Restbetriebsphase 2 zur Ereignisbeherrschung herangezogen werden, da hier eine Karenzzeit von > 3 Tagen zur Verfügung steht.

In den vier Fällen, bei denen die Reparaturdauer bekannt ist, wurde die Reparatur innerhalb von drei Tagen erfolgreich abgeschlossen. Die Wahrscheinlichkeit, dass die Reparatur einer BE-Lagerbeckenpumpe länger als drei Tage dauert, kann somit auf 0,1 (/FAK 05a/, Gl. 3-23) abgeschätzt werden. Dieser Wert entspricht der im PSA-Leitfaden

/FAK 05/, Abschnitt E 2.2, angegebenen Ausfallwahrscheinlichkeit einer Reparaturmaßnahme der Kategorie „gut reparierbar“.

Fazit

Für die Reparatur einer ausgefallenen BE-Lagerbeckenpumpe in der Restbetriebsphase 2 wird für die betrachtete DWR-Anlage eine Ausfallwahrscheinlichkeit von 0,1 verwendet.

6 Endzustände

Gemäß dem PSA-Leitfaden /FAK 15/ wird als Ergebnis der Untersuchungen die Brennstabschadenshäufigkeit pro Jahr ausgewiesen. Mit der Beschädigung der Brennstäbe wird eine wesentliche Radionuklidfreisetzung erwartet.

In den Ereignisbäumen wird vereinfachend nur ein beherrschter und ein unbeherrschter Endzustand unterschieden.

Beherrschter Zustand

OK: beherrschter Ereignisablauf

Die Brennelemente bleiben bis über ihre Oberkante mit Kühlmittel bedeckt. Beim DWR wurde die Kühlmitteltemperatur im BE-Lagerbecken ggf. bei gleichzeitig ausreichender Nachspeisung mittels ungefilterter Druckentlastung des Sicherheitsbehälters auf 120 °C begrenzt. Bis zu dieser Temperatur ist die Integrität des BE-Lagerbeckens langfristig gewährleistet /VGB 13/.

Unbeherrschter Zustand

BSZ: Brennstabschadenszustand

- Der Füllstand im BE-Lagerbecken ist durch Ausfall der Kühlsysteme und Ausfall der Nachspeisung von verdampftem Kühlmittel bis unter die Oberkante der Brennelemente abgefallen. Es kommt zur Freilegung der Hüllrohre. Ab diesem Zeitpunkt sind Hüllrohrschäden und dadurch die Freisetzung der Spaltgase aus den beschädigten Brennstäben möglich.
- Die Kühlmitteltemperatur im BE-Lagerbecken überschreitet 120 °C. D. h., bei Ausfall der Systeme zur BE-Lagerbeckenkühlung ist die Druckentlastung des Sicherheitsbehälters (DWR) oder des Reaktorgebäudes (SWR) misslungen. Oberhalb dieser Temperatur ist die Integrität des BE-Lagerbeckens langfristig nicht gewährleistet.

7 Probabilistische Bewertungen für DWR

Grundlage für die hier durchgeführten probabilistischen Bewertungen bildet das Risk-Spectrum-Modell aus dem BMU-Vorhaben 4716R01323, Generische Sicherheitsbewertung von Kernkraftwerken im Nachbetrieb /GRS 19/. Diese PSA wurde um die in der RSK-Stellungnahme /RSK 20/ beschriebenen Phasen weiterentwickelt. Es wurde das gleiche Ereignisspektrum und zusätzlich die Einwirkungen von außen „Flugzeugabsturz auf ein Nebenkühlwassergebäude“ sowie „Hochwasser“ betrachtet. Zudem wurden die in der RSK-Stellungnahme beschriebenen Ersatzmaßnahmen (vorbereitete Maßnahmen zur Kühlstrang-Instandsetzung, mobile Einrichtungen) berücksichtigt. Für die untersuchten Ereignisse wird gemäß PSA-Leitfaden /FAK 15/ die Häufigkeit für Brennstabschadenszustände ausgewiesen.

7.1 Nachbetrieb

Im Rahmen des BMU/BfS-Vorhabens 3616R01323 wurden Ereignisabläufe im Nachbetrieb einer Anlage vom Typ Vorkonvoi untersucht /GRS 19/. Dabei wurde davon ausgegangen, dass noch alle Einrichtungen zur BE-Lagerbeckenkühlung inklusive ihrer Hilfs- und Versorgungseinrichtungen verfügbar sind. Tab. 7.1 zeigt die berechneten Häufigkeiten für Brennstabschadenszustände für die untersuchten auslösenden Ereignisse. Insgesamt wurde für die betrachtete DWR-Anlage eine Brennstabschadenshäufigkeit von $9,8\text{E-}07/\text{a}$ ermittelt.

Tab. 7.1 Häufigkeiten für Brennstabschadenszustände für die betrachteten auslösenden Ereignisse

Auslösendes Ereignis	Häufigkeit für Brennstabschadenszustände /a, Erwartungswert
Notstromfall im Nachbetrieb	2,6E-08
Ausfall BE-Lagerbeckenkühlung	8,4E-07
Leck an der Lagerbeckenauskleidung	1,9E-08
Leck am BE-Lagerbecken (absperrrbar)	1,6E-08
Leck am BE-Lagerbecken (nicht absperrrbar)	4,2E-08
Flugzeugabsturz auf das Reaktorgebäude	5E-10
Flugzeugabsturz auf das Schaltanlagegebäude	1,2E-9
Explosionsdruckwelle im Nachbetrieb	3,1E-08
Gesamtergebnis:	9,8E-07

7.2 Restbetrieb Phase 1

7.2.1 Verfügbare Systeme

Für die probabilistischen Bewertungen wird von den in der RSK-Stellungnahme /RSK 20/ beschriebenen Anforderungen an die Systemfunktion „Beckenkühlung“ ausgegangen. Neben dem betrieblichen Beckenkühlstrang stehen zwei Becken-/Notnachkühlstränge für die BE-Lagerbeckenkühlung zur Verfügung. Diese bestehen aus je einem Becken-/Notnachkühlkreis mit einer Becken-/Notnachkühlpumpe, einem Zwischenkühlkreis mit einer Notzwischenkühlpumpe und einem Nebenkühlkreis mit einer Notnebenkühlwasserpumpe. Wie in Kapitel 5 beschrieben, werden Reparaturen nicht berücksichtigt.

Nicht mehr verfügbare Systemfunktionen

- Die Nachkühlpumpen stehen für die BE-Lagerbeckenkühlung nicht mehr zu Verfügung.
- Die D1-Notstomdiesel der Redundanzen 1 und 4 sind nicht mehr verfügbar.

- GHC - Nachspeisen der Verdampfungsrate mit dem Deionatsystem
Diese Systemfunktion ist im Notstromfall nicht mehr verfügbar, da die Deionatpumpen nicht vom D2-Netz notstromversorgt werden.

7.2.2 Notstromfall

Bei Ausfall der Eigenbedarfsversorgung über das Hauptnetz und das Reservenetz werden die Notstromdiesel automatisch gestartet und übernehmen die Stromversorgung der Notstromschienen. Für dieses Ereignis wurde eine Eintrittshäufigkeit von $6,4E-02/a$ ermittelt /GRS 03/, /GRS 19/.

Die notstromgesicherten Verbraucher werden, je nachdem ob sie vor Eintritt des Notstromfalls in Betrieb waren, gestaffelt wieder zugeschaltet oder zur Zuschaltung freigegeben. Dadurch wird auch der 3. Beckenkühlstrang FAK20 mit der zugehörigen Nachkühlkette wieder in Betrieb genommen. Gelingt die Wiederschaltung des 3. Beckenkühlstrangs, ist der Ereignisablauf beherrscht. Gelingt die Wiederschaltung nicht, beispielsweise als Folge des Ausfalls des Notstromdiesels 2, so muss die BE-Lagerbeckenkühlung über einen der Becken-/Notnachkühlstränge FAK10 oder 40 eingerichtet werden.

Fallen auch die beiden Becken-/Notnachkühlstränge FAK10 und 40 aus, muss die Nachwärme über Verdampfung aus dem BE-Lagerbecken abgeführt werden. Dies kann mit der Notfallmaßnahme „Externe Bespeisung des BE-Beckens“ erfolgen. Dazu wird eine Schlauchverbindung von einem Deionatbecken im Notspeisegebäude über eine mobile Pumpe zum BE-Beckenkühlsystem FAK10 hergestellt.

Bei der Wärmeabfuhr aus dem BE-Lagerbecken über Verdampfung kommt es zu einem Druckaufbau im Sicherheitsbehälter. Daher ist zusätzlich eine Druckentlastung des Sicherheitsbehälters erforderlich, um die Strukturen des BE-Lagerbeckens vor unzulässigen Temperaturen zu schützen. Diese Druckentlastung erfolgt über die Kompressorleitung für die Druckprobe des Sicherheitsbehälters und dient dazu, die Kühlmitteltemperatur im BE-Lagerbecken auf ca. 120 °C zu begrenzen. Bei dieser Temperatur ist die Integrität des BE-Lagerbeckens langfristig gewährleistet.

Notstromfall im Restbetrieb Phase 1	Wiederzuschalten Beckenkühlung mit FAK 20 bei NSF	Beckenkühlen mit FAK10	Beckenkühlen mit FAK40	Nofallmaßnahme Debonateneinspeisung von außen	Sicherheitsbehälter Druckerlastung			
T1-RB1	FAK20-EIN-NSF	FAK10	FAK40	NFM-GHC	SHB-DE	No.	Freq.	Conseq.
						1		OK
						2		OK
						3		OK
						4		OK
						5		BSZ
						6		BSZ

Abb. 7.1 Ereignisablaufdiagramm „Notstromfall im Restbetrieb Phase 1“

Die Häufigkeit (Punktwert) für Brennstabschadenszustände beim Ereignis „Notstromfall im Restbetrieb Phase 1“ beträgt

$$H_{BSZ_T1_RB1} = 4,6E-08/a.$$

Die größten Beiträge zu diesem Ergebnis stammen von den Reaktorschutzsignalen zum Start der Notstromdiesel und den Handmaßnahmen zur Inbetriebnahme von Reservesträngen.

7.2.3 Ausfall der BE-Lagerbeckenkühlung

Für einen Ausfall des laufenden BE-Lagerbeckenkühlstranges wurde eine Eintrittshäufigkeit von 3,7E-02/a ermittelt /GRS 19/.

Bei Ausfall des laufenden Beckenkühlstranges FAK20 muss die BE-Lagerbeckenkühlung über einen der Becken-/Notnachkühlstränge FAK10 oder 40 fortgesetzt werden.

Fallen auch die beiden Becken-/Notnachkühlstränge FAK10 und 40 aus, muss die Nachwärme über Verdampfung aus dem BE-Lagerbecken abgeführt werden. Über das Deionatnachspeiseventil FAL11AA007 und die Deionat-Betriebspumpen wird der Füllstand im BE-Lagerbecken automatisch konstant gehalten. Bei der Wärmeabfuhr über Verdampfung kommt es zu einem Druckaufbau im Sicherheitsbehälter. Daher ist zusätzlich eine Druckentlastung des Sicherheitsbehälters erforderlich, um die Strukturen des BE-Lagerbeckens vor unzulässigen Temperaturen zu schützen, siehe Ereignisablaufbeschreibung zum Notstromfall Abschnitt 7.2.2.

Ist auch die automatische Nachspeisung mit dem Deionatsystem unverfügbar, kann die Nachwärme mit den Notfallmaßnahmen „Externe Bespeisung des BE-Beckens“ und „Ungefilterter Druckentlastung des Sicherheitsbehälters“ abgeführt werden, siehe Ereignisablaufbeschreibung zum Notstromfall Abschnitt 7.2.2.

Die Wiedereinrichtung der Nachwärmeabfuhr aus dem BE-Lagerbecken erfolgt nicht automatisch. Dafür sind in jedem Fall Handmaßnahmen erforderlich, z. B. für die Zuschaltung der Becken-/Notnachkühlstränge FAK10/40 oder die Druckentlastung des Sicherheitsbehälters. In den Fehlerbäumen ist daher eine übergeordnete Diagnose berücksichtigt (siehe Kapitel 4).

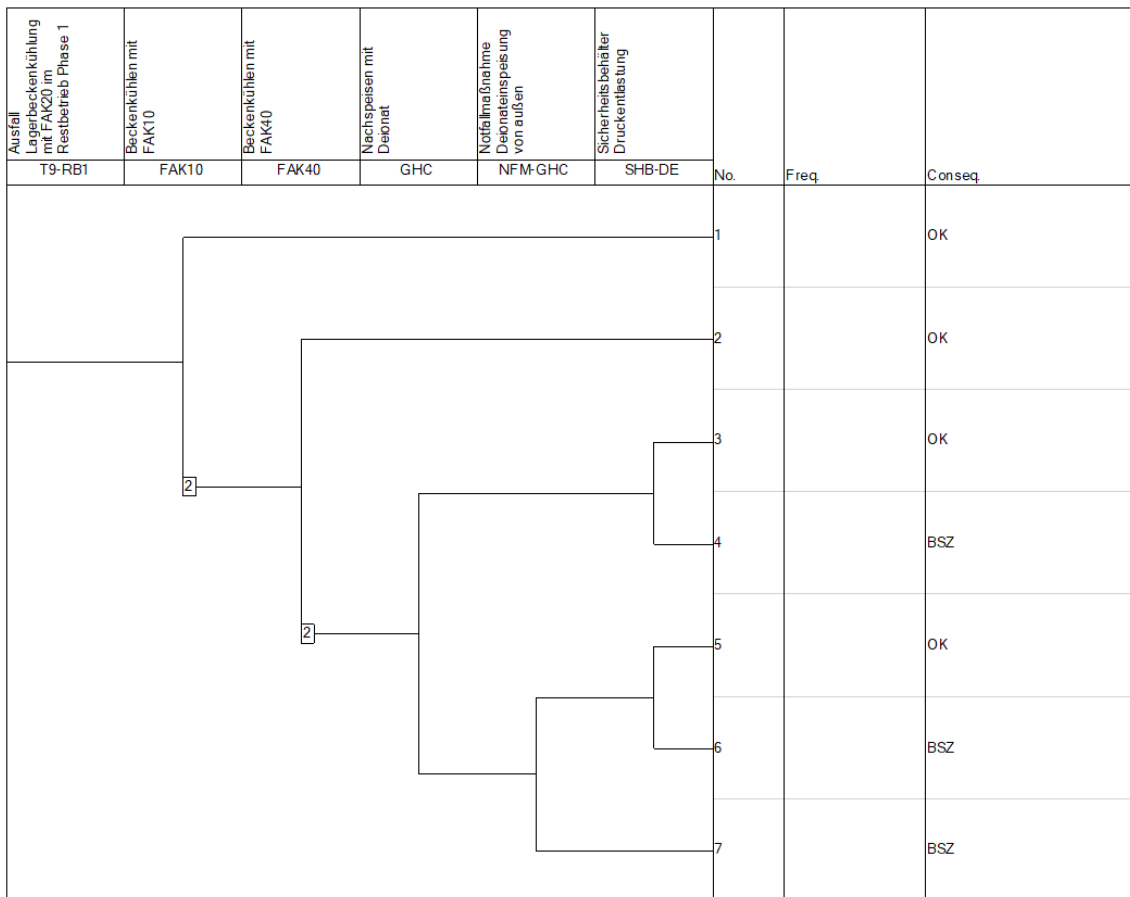


Abb. 7.2 Ereignisablaufdiagramm „Ausfall der BE-Lagerbeckenkühlung im Restbetrieb Phase 1“

Die Häufigkeit (Punktwert) für Brennstabschadenszustände beim Ereignis „Ausfall der BE-Lagerbeckenkühlung im Restbetrieb Phase 1“ beträgt

$$H_{BSZ_T9_RB1} = 4,8E-07/a.$$

Die größten Beiträge zu diesem Ergebnis stammen von der übergeordneten Diagnose und den Handmaßnahmen zur Inbetriebnahme von Reservesträngen.

7.2.4 Leck an der BE-Lagerbeckenauskleidung

Bei einem Lastabsturz (z. B. Brennelement oder Werkzeug) in das BE-Lagerbecken kann der Boden des Lagerbeckens beschädigt werden und ein Leck am Lagerbeckenboden entstehen. Ein solches Leck würde zu einem Kühlmittelverlust aus dem BE-Lagerbecken führen.

Zwischen dem Stahl liner und der Betonstruktur des BE-Lagerbeckens befindet sich ein Spalt. Der Liner ist auf Stegen gelagert, so dass sich einzelne gegeneinander dichte Segmente zwischen Liner und Beton ergeben. Die Segmente werden einzeln mittels eines Prüfrohrs auf Leckagen überwacht. Im Falle einer Leckage fällt Wasser an den Leckageüberwachungsschränken im Sicherheitsbehälter an. Diese Überwachungsschränke werden während des Schichttrundgangs (1-mal pro Nachtschicht) kontrolliert. Das Leckwasser fließt dem Sumpf im Sicherheitsbehälter zu. Dadurch ergibt sich eine weitere Erkennungsmöglichkeit (KMA-Meldung Sumpffüllstand hoch).

Lecks an der BE-Lagerbeckenauskleidung sind in den deutschen DWR-Anlagen nicht aufgetreten. Für ein Leck an der Lagerbeckenauskleidung durch Lastabsturz wurde eine Eintrittshäufigkeit von $1,6E-03/a$ abgeschätzt /GRS 19/. Aus der deutschen Betriebserfahrung sind ein Leck an der BE-Lagerbeckenauskleidung in einer SWR-Anlage (KWW, ME1991/031, Leckage nach Absturz einer Brennelementkasten-Schneidevorrichtung, Leckrate 230 l/h) und ein Leck am Absetzbecken einer DWR-Anlage (KKU, 1987/213, Leckage nach Absturz einer Sechskant-Antriebsspindel) durch Lastabsturz bekannt.

Es wird im Weiteren davon ausgegangen, dass ein solches Leck durch das Deionatsystem überspeisbar ist, d. h. die Leckrate ist vergleichbar mit der beim oben genannten meldepflichtigen Ereignis 1991/031. Eine Absperrung des Prüfrohrs am vom Leck betroffenen Segment des Lagerbeckens wird nicht berücksichtigt, da nicht bekannt ist, ob die Prüfrohre in allen Anlagen absperrbar sind. Bei der unterstellten Leckrate steht sehr viel Zeit für Gegenmaßnahmen zur Verfügung. Es würde ca. 1 Woche dauern, ehe der Füllstand im Lagerbecken von 13,5 m (Normalfüllstand) auf 13,05 m (Schutzabschaltung Beckenkühlstrang FAK20) abgefallen ist. In dieser Zeit kann der abgestürzte Gegenstand geborgen und das Leck abgedeckt werden (z. B. mittels Saugglocke oder Gummimatte).

Wird das Leck nicht abgedeckt, so würde es automatisch durch das Deionatsystem überspeist werden. D. h., solange die automatische Nachspeisung mit dem Deionatsystem funktioniert, kommt es nicht zum Ausfall des laufenden Beckenkühlstranges.

Bei Ausfall des Deionatsystems käme es zu einem langsamen Füllstandsabfall im BE-Lagerbecken mit einer entsprechenden Wartenmeldung. Gemäß BHB soll das BE-Lagerbecken nach einem Füllstandsabfall als Folge eines Lecks aus den Flutbecken wieder aufgefüllt werden. Gelingt das Auffüllen aus den Flutbecken nicht, muss mit der Notfallmaßnahme „Externe Bespeisung des BE-Beckens“ aufgefüllt werden. Solange

der Füllstand im BE-Lagerbecken nicht unter 13,05 m fällt, kommt es nicht zu Ausfall des laufenden Beckenkühlstranges.

Leck am BE-Lagerbecken durch Lastabsturz im Restbetrieb Phase 1	Leck abdichten	Nachspeisen mit Deionat	Fluten mit FAK10 oder FAK40	Notfallmaßnahme Deionateinspeisung von außen			
LA-RB1	LECKABD	GHC	RB-FLUTEN1	NFM-GHC	No.	Freq.	Conseq.
					1		OK
					2		OK
					3		OK
					4		OK
					5		BSZ

Abb. 7.3 Ereignisablaufdiagramm „Leck an der Lagerbeckenauskleidung im Restbetrieb Phase 1“

Die Häufigkeit (Punktwert) für Brennstabschadenzustände beim Ereignis „Leck an der Lagerbeckenauskleidung“ beträgt

$$H_{BSZ_LA_RB1} = 1E-11/a.$$

Die größten Beträge zu diesem Ereignis stammen vom Ausfall der automatischen Deionatnachspeisung und der Diagnose.

7.2.5 Leck an angeschlossenen Rohrleitungen

Es wird von einem Leck an einer Anschlussleitung des laufenden Beckenkühlstranges FAK20 mit einem Leckquerschnitt < 25 cm² ausgegangen. Für den Ereignisablauf ist zu unterscheiden, ob sich das Leck im absperrbaren Bereich (im Ringraum) oder im nicht

absperzbaren Bereich (im Sicherheitsbehälter) befindet. Für diese Lecks wurde eine Eintrittshäufigkeit von jeweils $2,5E-04/a$ ermittelt /GRS 03/, /GRS 19/.

7.2.5.1 Leck im absperzbaren Bereich

Das Leck befindet sich im Ringraum hinter den am Sicherheitsbehälter befindlichen Absperzarmaturen. Es wurde eine maximale anfängliche Leckrate von ca. 53 kg/s abgeschätzt (Δh ca. 23 m). Ein Wasseranfall im Sumpf des entsprechenden Ringraumquadranten wird auf der Warte signalisiert. Das Leck kann durch die automatische Nachspeisung des Deionatsystems nicht überspeist werden. Der Füllstand im BE-Lagerbecken kann im ungünstigsten Fall bis maximal zur Höhe des Anschlusses des dritten Beckenkühlstrangs an das BE-Lagerbecken auslaufen (Füllstandsabfall von 13,5 m auf ca. 11 m).

Der vom Leck betroffene Nachkühlstrang muss von Hand durch Schließen der Armaturen auf der Saug- und der Druckseite abgesperrt werden. Gemäß BHB soll das BE-Lagerbecken nach dem Absperren des Lecks aus den Flutbecken wieder aufgefüllt werden. Gelingt das Auffüllen aus den Flutbecken nicht, muss das BE-Lagerbecken mit dem Deionatsystem oder mit der Notfallmaßnahme „Externe Bespeisung des BE-Beckens“ wieder aufgefüllt werden. Anschließend kann die Lagerbeckenkühlung mit einem der Becken-/Notnachkühlstränge FAK10 oder FAK40 fortgesetzt werden. Gelingt es nicht einen der Beckenkühlstränge in Betrieb zu nehmen, muss die Nachwärme durch Verdampfung des Kühlmittels aus dem Lagerbecken abgeführt werden. Dafür sind langfristig die Überspeisung der Verdampfungsverluste sowie eine Druckentlastung des Sicherheitsbehälters erforderlich.

Gelingt die Absperzung des Lecks nicht, so wird davon ausgegangen, dass durch die Nachspeisung in das BE-Lagerbecken langfristig Kühlmittel in den Ringraum strömt und es dadurch zum Ausfall aller verfügbaren Beckenkühlstränge durch Überflutung der Pumpen kommt. Die Nachwärme würde dann durch Verdampfung des nachgespeisten Kühlmittels aus dem Lagerbecken abgeführt werden. Dafür ist eine Druckentlastung des Sicherheitsbehälters erforderlich.

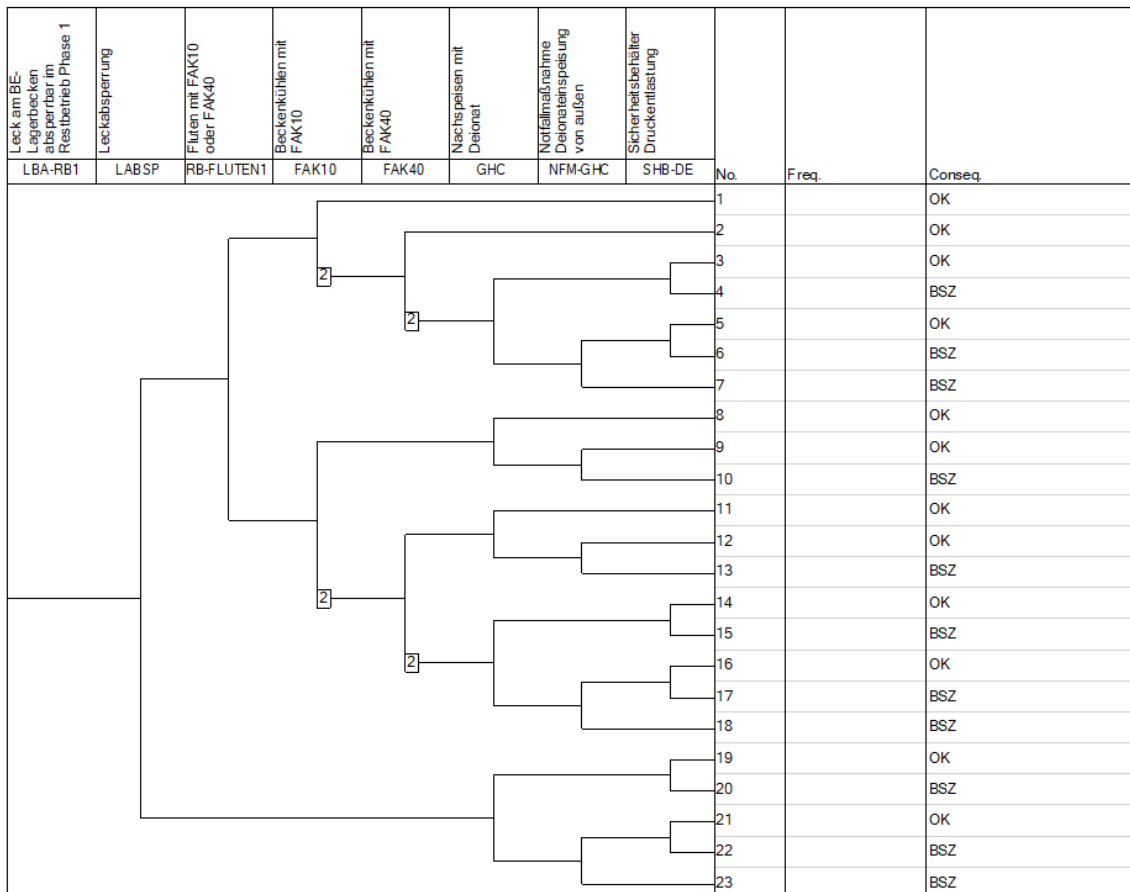


Abb. 7.4 Ereignisablaufdiagramm „Absperbares Leck an angeschlossenen Rohrleitungen des Lagerbeckenkühlsystems im Restbetrieb Phase 1“

Die Häufigkeit (Punktwert) für Brennstabschadenszustände beim Ereignis „Absperbares Leck an angeschlossenen Rohrleitungen“ beträgt

$$H_{BSZ_LBA_RB1} = 4,7 \text{ E-}09/a.$$

Der größte Beitrag zu diesem Ergebnis stammt von den Handmaßnahmen zur Inbetriebnahme von Reservesträngen und zur Sicherheitsbehälterdruckentlastung.

7.2.5.2 Leck im nicht absperrbaren Bereich

Das Leck befindet sich im Sicherheitsbehälter. Es wurde eine maximale anfängliche Leckrate von ca. 30 kg/s abgeschätzt (Δh ca. 7,5 m). Das Leck wird durch den Füllstandsabfall im BE-Lagerbecken und den Wasseranfall im Sumpf des Sicherheitsbehälters auf der Warte gemeldet. Das Leck kann durch die automatische Nachspeisung des Deionatsystems nicht überspeist werden. Der Füllstand im BE-Lagerbecken kann bis

maximal zur Höhe des Anschlusses des dritten Beckenkühlstrangs an das BE-Lagerbecken auslaufen (Füllstandsabfall von 13,5 m auf ca. 11 m).

Entsprechend BHB ist die betroffene Beckenöffnung mit einem leichten Stopfen gemäß einer Arbeitsanweisung zu verschließen. Anschließend ist das BE-Lagerbecken aus einem Flutbecken wieder aufzufüllen und die Lagerbeckenkühlung mit FAK10 oder FAK40 fortzusetzen. Das Auffüllen wäre auch mit dem Deionatsystem oder der Notfallmaßnahme „Externe Bespeisung des BE-Beckens“ möglich.

Gelingt es nicht das Leck mit einem Stopfen zu verschließen, so müsste das Leck durch Fluten mit den Beckenkühlpumpen 1 oder 4 überspeist werden. Nach der Einspeisung des Inventars eines Flutbeckens befindet sich ausreichend Kühlmittel im Sicherheitsbehältersumpf, um mit einer Becken-/Notnachkühlpumpe im Sumpfumwälzbetrieb die Nachwärme aus dem BE-Lagerbecken abzuführen. Die Leckrate beim hier betrachteten Leck ist dafür ausreichend.

Versagen die Maßnahmen zum Fluten, Sumpfumwälzbetrieb oder Beckenkühlbetrieb mit dem Beckenkühlsystem, muss die Nachwärme durch Verdampfung des Kühlmittels aus dem Lagerbecken abgeführt werden. Dafür sind langfristig die Überspeisung der Verdampfungsverluste mit dem Deionatsystem oder der Notfallmaßnahme „Externe Bespeisung des BE-Beckens“ sowie eine Druckentlastung des Sicherheitsbehälters erforderlich.

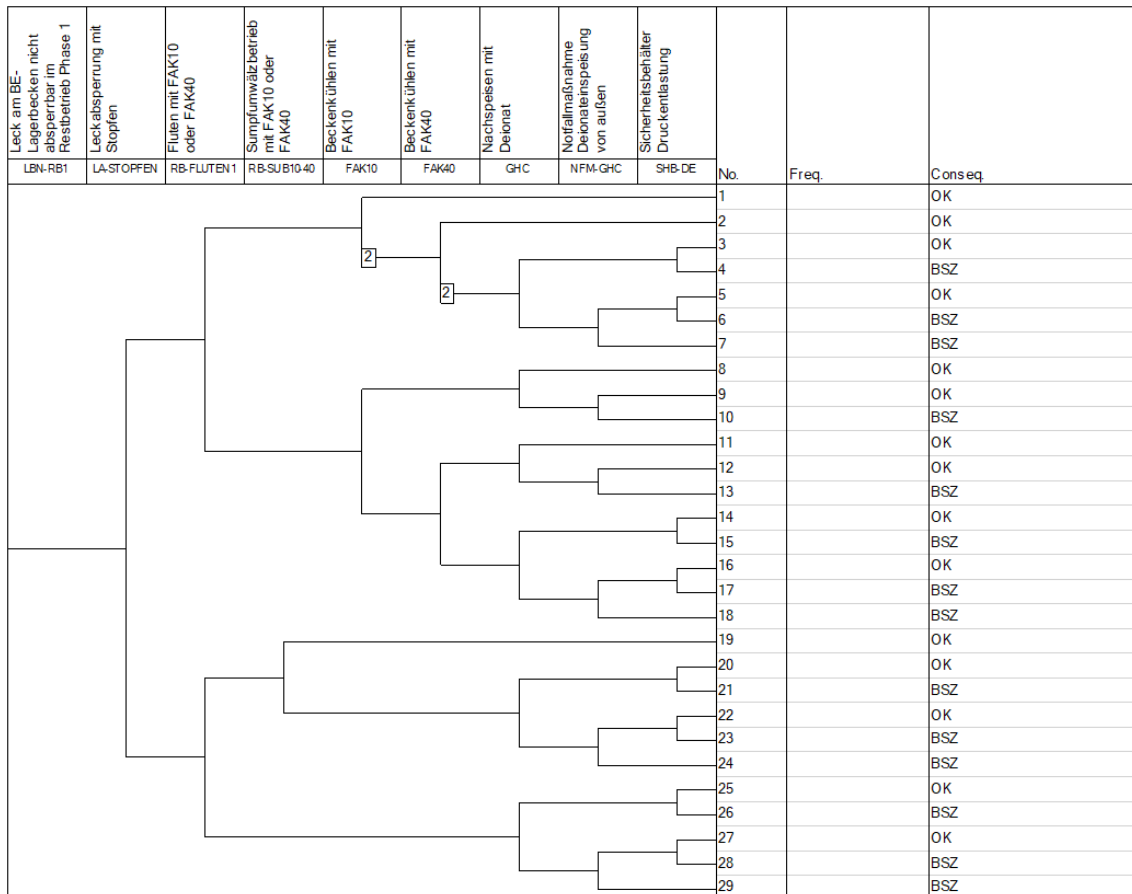


Abb. 7.5 Ereignisablaufdiagramm „Nichtabspergbares Leck an angeschlossenen Rohrleitungen im Restbetrieb Phase 1“

Die Häufigkeit (Punktwert) für Brennstabschadenszustände beim Ereignis „Nichtabspergbares Leck an angeschlossenen Rohrleitungen“ beträgt

$$H_{BSZ_LBN_RB1} = 3,5E-09/a.$$

Das Ergebnis wird von den Personalhandlungen zur Wiederinbetriebnahme der Beckenkühlstränge und zur Sicherheitsbehälterdruckentlastung bestimmt.

7.2.6 Einwirkungen von außen

Gemäß dem PSA-Methodenband /FAK 05/ sind für den Leistungsbetrieb der deutschen Kernkraftwerke die folgenden externen Einwirkungen zu betrachten:

- Flugzeugabsturz,
- Erdbeben,

- Explosionsdruckwelle und
- Hochwasser.

Für Nichtleistungszustände wurden diese Einwirkungen bisher in probabilistischen Analysen nicht untersucht. Im Folgenden soll der Beitrag dieser Ereignisse zu Brennstab-schadenszuständen im Restbetrieb abgeschätzt werden.

7.2.6.1 Flugzeugabsturz

Die Anlagen vom Typ Konvoi und Vor-Konvoi sind entsprechend der RSK-Leitlinie /RSK LL/ gegen Flugzeugabstürze ausgelegt. Daher kann praktisch ausgeschlossen werden, dass von kleineren Flugzeugen, wie z. B. Hubschrauber, Sport- und Geschäftsflugzeuge, eine Gefährdung der Anlage ausgeht.

Die folgende Tabelle zeigt beispielhaft Häufigkeiten für Treffer durch Flugzeugabstürze (zivile Maschinen > 7 t und Militärmaschinen) auf die Gefährdungsbereiche A (Reaktorgebäude, Notspeisegebäude) und B (übrige Gebäude mit sicherheitsrelevanten Einrichtungen) für zwei Konvoi und eine Vor-Konvoi-Anlage.

Tab. 7.2 Häufigkeiten für Treffer durch Flugzeugabstürze

Anlage	Gefährdungsbereich A: Reaktorgebäude, Not- speisegebäude Direkte Treffer	Gefährdungsbereich B: übrige Gebäude mit Si- cherheitsrelevanten Ein- richtungen Direkte Treffer und Wrackteiltreffer	Quelle:
KKG	5,2E-08/a	4E-06/a	/KKG 13/ Abs. 4.4.2.7.3.3.2.3
KKI-2	5,7E-08/a	3,7E-06/a	/TÜV 14/ Abs. 7.6.2
GKN-2	vernachlässigt	2,9E-06/a	/EBW 09/ Abs. 2.4.4.2

Für die folgenden Abschätzungen werden beispielhaft die Trefferhäufigkeiten und die Anlagenkonfiguration der Anlage KKI-2 herangezogen.

Gefährdungsbereich A

Da die Anlage entsprechend den RSK-Leitlinien gegen Flugzeugabstürze ausgelegt ist, ist bezüglich des Gefährdungsbereichs A von einer Penetrationswahrscheinlichkeit von

< 0,01 auszugehen /FAK 05/. Unterstellt man, dass es mit dieser Wahrscheinlichkeit zu einer Beschädigung des Lagebeckens oder seiner Kühleinrichtungen kommt, so ergibt sich eine Häufigkeit für Brennstabschadenszustände durch Treffer auf das Reaktor-gebäude von < 5,7E-10/a.

Gefährdungsbereich B

Durch Treffer auf andere Gebäude, wie die Kühlwasserpumpenbauwerke oder das Schaltanlagegebäude kann es zum Ausfall der BE-Lagerbeckenkühlung kommen. Teilt man die Trefferwahrscheinlichkeit auf den Gefährdungsbereich B vereinfachend auf das Schaltanlagegebäude und die Nebenkühlwassergebäude auf, ergibt sich je eine Trefferhäufigkeit von 1,9E-06/a.

Flugzeugabsturz auf das Schaltanlagegebäude

Bei einem Flugzeugabsturz auf das Schaltanlagegebäude fällt das laufende Beckenkühlsystem FAK20 aus. In diesem Fall kann die BE-Lagerbeckenkühlung mit einer der beiden Notnachkühlketten (Beckenkühlpumpe FAK10/40 – Notzwischenkühlpumpe KAA10/40 – Notnebenkühlpumpe PEC10/40) von der Notsteuerstelle im Notspeisegebäude wiedereingerichtet werden.

Die aktiven Komponenten der Notnachkühlketten müssen von den D2-Dieseln im Notspeisegebäude notstromversorgt werden. Ferner steht die Notfallmaßnahme zur externen Bespeisung des BE-Lagerbeckens zur Verfügung. Bei der Bespeisung des BE-Lagerbeckens von außen ist zusätzlich eine Druckentlastung des Sicherheitsbehälters erforderlich, um das BE-Lagerbecken vor unzulässigen Temperaturen zu schützen.

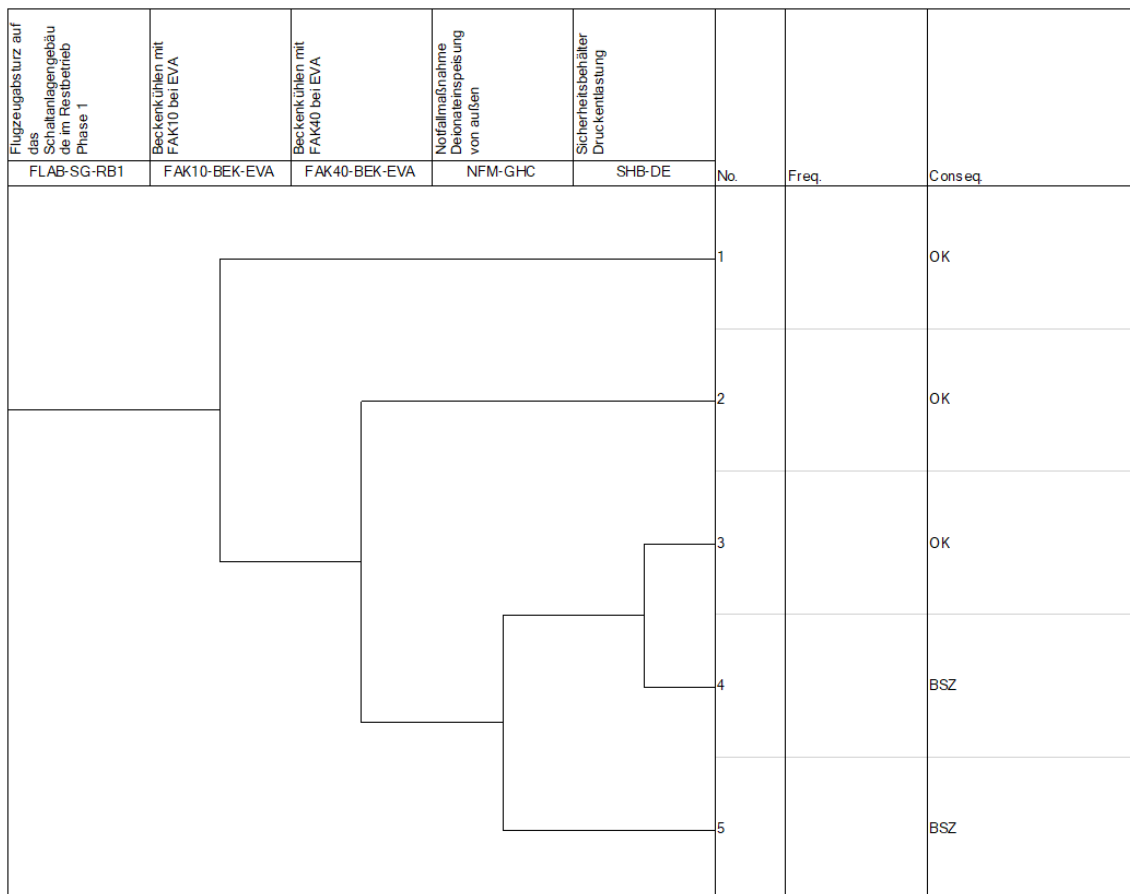


Abb. 7.6 Ereignisablaufdiagramm „Flugzeugabsturz auf das Schaltanlagengebäude im Restbetrieb Phase 1“

Die Häufigkeit (Punktwert) für Brennstabschadenszustände beim Ereignis „Flugzeugabsturz auf das Schaltanlagengebäude“ beträgt

$$H_{BSZ_FLAB_SG_RB1} = 3,6E-10/a.$$

Die größten Beiträge zu diesem Ereignis stammen von den Personalhandlungen für die Inbetriebnahme einer Notnackkühlkette und für die Notfallmaßnahme zur externen Be-
speisung und Sicherheitsbehälterdruckentlastung.

Flugzeugabsturz auf Nebenkühlwassergebäude

Die Notnebenkühlwasserversorgung ist durch räumliche Trennung gegen Flugzeugabstürze dahingehend geschützt, dass zumindest eine Redundanz verfügbar bleibt. Es wird von einem Absturz auf das Nebenkühlwasserpumpenbauwerk, welches die Redundanzen 1 und 2 versorgt, ausgegangen. Dadurch fällt die Nebenkühlwasserversorgung

für den laufenden 3. Beckenkühlstrang FAK20 und den Beckenkühlstrang FAK10 aus. Der Beckenkühlstrang FAK40 bliebe verfügbar und müsste dann für die Fortsetzung der Beckenkühlung herangezogen werden.

Ferner stehen Notfallmaßnahmen zur Verfügung. Zum einen kann der Beckenkühler FAK10 mit einer mobilen Pumpe über Anschlüsse am Zwischenkühlkreis KAA10 mit Kühlwasser versorgt werden (mobile verkürzte Kühlkette). Zum anderen kann das BE-Lagerbecken von außen bespeist werden. Bei der Bespeisung des BE-Lagerbeckens von außen ist zusätzlich eine Druckentlastung des Sicherheitsbehälters erforderlich, um das BE-Lagerbecken vor unzulässigen Temperaturen zu schützen.

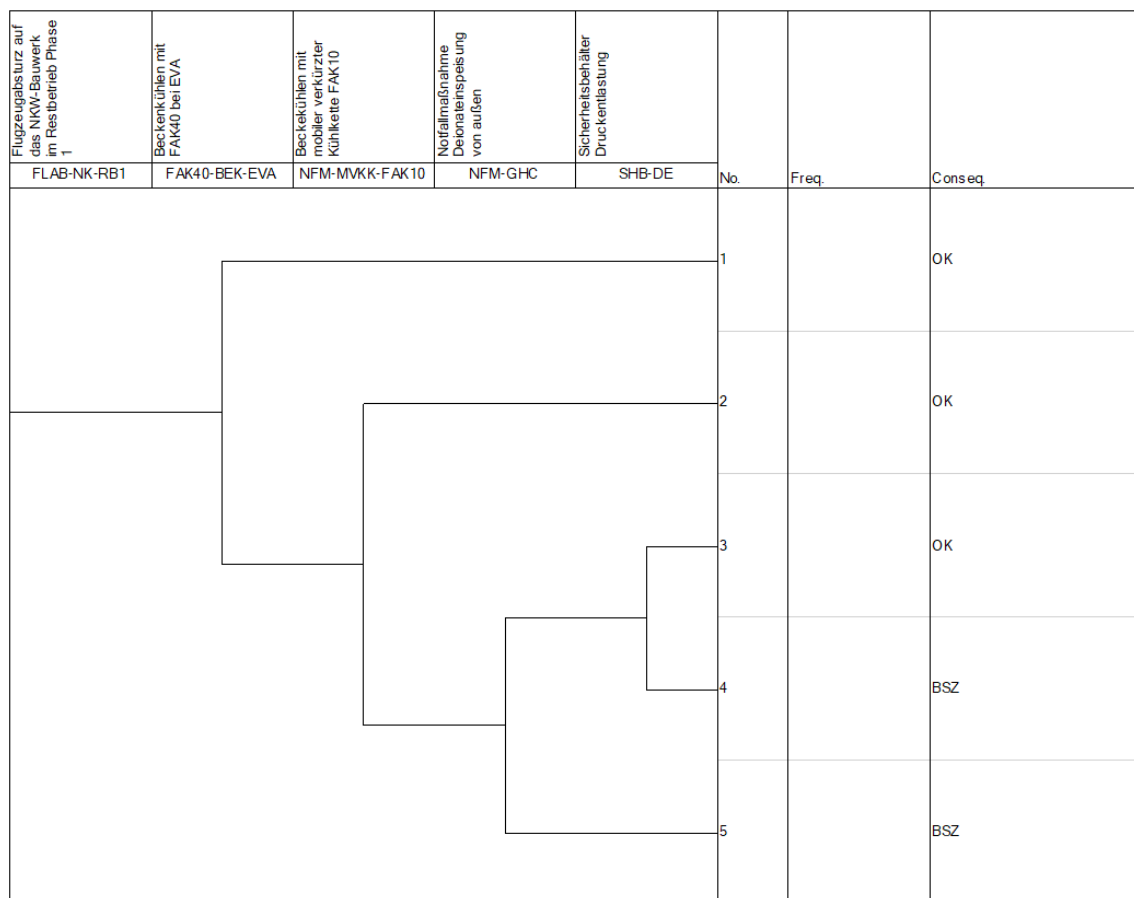


Abb. 7.7 Ereignisablaufdiagramm „Flugzeugabsturz auf das Nebenkühlwasserpumpenbauwerk im Restbetrieb Phase 1“

Die Häufigkeit (Punktwert) für Brennstabschadenzustände beim Ereignis „Flugzeugabsturz auf das Nebenkühlwasserpumpenbauwerk“ beträgt

$$H_{BSZ_FLAB_NK_RB1} = 7,0E-10/a.$$

Die größten Beiträge zu diesem Ereignis stammen von der Wartung der Redundanz FAK40 und verschiedenen Personalhandlungen.

7.2.6.2 Erdbeben

Entsprechend dem PSA-Leitfaden (Methodenband /FAK 05/) wurde für die betrachtete Konvoi-Anlage eine anlagenspezifische probabilistische Erdbeben-Sicherheitsanalyse für den Leistungsbetrieb durchgeführt. Der Erwartungswert der Häufigkeit für Gefährdungszustände durch Erdbeben beträgt $5,8E-9/a$, der von Kernschaden war etwa eine Zehnerpotenz niedriger und beträgt $9,3E-10/a$. Diese Werte waren mehr als zwei Größenordnungen kleiner als die Beiträge von internen auslösenden Ereignissen und trugen nur unbedeutend zu den Gesamthäufigkeiten von Gefährdungs- und Kernschaden bei. /EBW 09/

Probabilistische Untersuchungen zur Häufigkeit von Schadenszuständen der BE-Lagerbeckenkühlung als Folge von Erdbeben liegen uns nicht vor. Aufgrund des geringen Beitrags im Leistungsbetrieb, kann auch für den Restbetrieb von einem geringen Beitrag des Erdbebens zur Gesamthäufigkeit für Schadenszustände ausgegangen werden.

7.2.6.3 Explosionsdruckwelle

Gemäß dem Methodenband des PSA-Leitfadens /FAK 05/ soll mit einem Überprüfungsansatz festgestellt werden, ob für eine zu betrachtende Anlage die Häufigkeit für Kernschadenszustände infolge von Explosionsdruckwellen $< E-07/a$ beträgt. Dies ist dann der Fall, wenn

- die anzusetzende Gesamteintrittshäufigkeit des Ereignisses "Explosionsdruckwelle" mit kleiner als $10E-5/a$ ermittelt wurde,
- die Gebäude der Bereiche A und C entsprechend der Lastvorgaben in /BMI 76/ ausgelegt sind,
- die Sicherheitsabstände zum Ort des Umgangs mit bzw. der möglichen Freisetzung von explosionsfähigen Stoffen entsprechend der Vorgaben in /BMI 76/ eingehalten sind.

Liegen die Voraussetzungen dieses Überprüfungsansatzes vor, sind keine weiteren probabilistischen Nachweise zum Ereignis „Explosionsdruckwelle“ erforderlich.

Anhand dieses Überprüfungsansatzes kamen die Betreiber der Anlagen KWG, KBR, KKE, KKI-2 und GKN-2 im Rahmen ihrer periodischen Sicherheitsüberprüfungen zu dem Schluss, dass diese Kriterien erfüllt und daher keine weiteren probabilistischen Analysen zu diesem Ereignisablauf erforderlich sind. Vom Betreiber der Anlage KKP-2 wurden keine probabilistischen Analysen zum Ereignis „Explosionsdruckwelle“ durchgeführt.

In den betrachteten DWR-Anlagen sind das Reaktorgebäude das Notspeisegebäude und die Notnebenkühlwasser-Pumpengebäude mit Entnahmebauwerk gegen Explosionsdruckwellen ausgelegt. Zu betrachten wäre daher noch eine Explosionsdruckwelle, die das Schaltanlagengebäude beschädigt.

Für die hier betrachtete DWR-Anlage wurde im Rahmen der periodischen Sicherheitsüberprüfung ein Summenwert für die Eintrittshäufigkeit für eine Explosionsdruckwelle (Schiffs-, Bahn- und Straßenunfälle) $6,6E-07/a$ ermittelt /EBW 09/. Für die weiteren Untersuchungen wird davon ausgegangen, dass es mit dieser Häufigkeit durch eine Explosionsdruckwelle zur Beschädigung des Schaltanlagengebäudes und dadurch zum Ausfall der BE-Lagerbeckenkühlung kommt. In diesem Fall kann die BE-Lagerbeckenkühlung mit einer der beiden Notnachkühlketten (Beckenkühlpumpe FAK10/40 – Notzwischenkühlpumpe KAA10/40 – Notnebenkühlpumpe PEC10/40) von der Notsteuerstelle im Notspeisegebäude wiedereingerichtet werden.

Die aktiven Komponenten der Notnachkühlketten müssen von den D2-Dieseln im Notspeisegebäude notstromversorgt werden. Ferner steht die Notfallmaßnahme zur externen Bespeisung des BE-Lagerbeckens zur Verfügung. Bei der Bespeisung des BE-Lagerbeckens von außen ist zusätzlich eine Druckentlastung des Sicherheitsbehälters erforderlich, um das BE-Lagerbecken vor unzulässigen Temperaturen zu schützen.

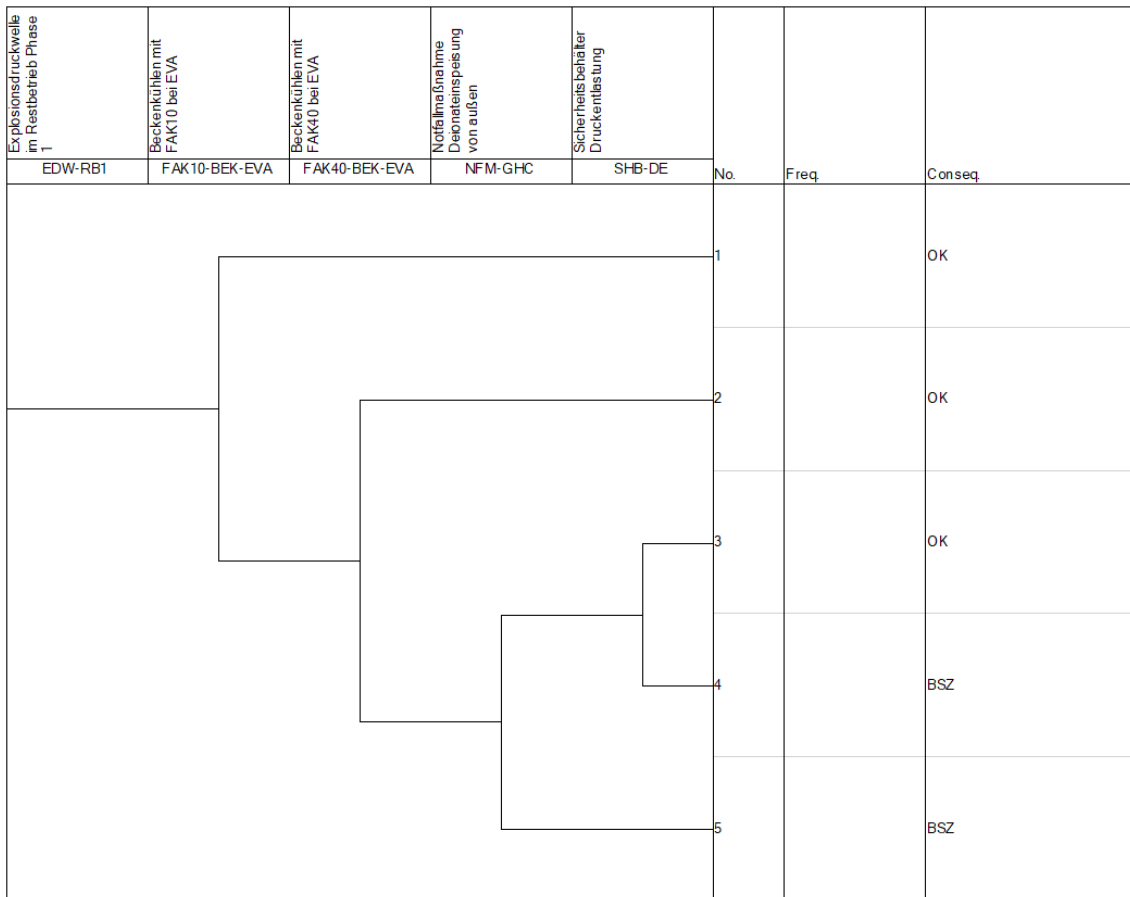


Abb. 7.8 Ereignisablaufdiagramm „Explosionsdruckwelle im Restbetrieb Phase 1“

Die Häufigkeit (Punktwert) für Brennstabschadenszustände beim Ereignis „Explosionsdruckwelle im Restbetrieb Phase 1“ beträgt

$$H_{BSZ_EDW_RB1} = 1,3E-10/a.$$

Die größten Beiträge zu diesem Ereignis stammen von den Handmaßnahmen zur Inbetriebnahme der Notnachkühlketten und der externen Bespeisung.

7.2.6.4 Hochwasser

Das Bemessungshochwasser (10 000 jährliches Hochwasser, Eintrittshäufigkeit E-04/a) für die betrachtete Anlage beträgt 172,66 müNN. Die Nullmeterkote der Anlage liegt bei 172,50 müNN (Kraftwerksnull) und die Schutzhöhe bei 173,50 müNN, wobei temporäre Schutzmaßnahmen erforderlich sind, um diese Schutzhöhe zu erreichen. Das betrifft insbesondere das Notstromerzeugergebäude, dessen Nullmeterkote bei 172,5 müNN liegt. /SSA 09/

Bei Erreichen eines Hochwasserstandes von 172 müNN und eindeutig steigender Tendenz sollen gemäß BHB durch die Betriebsfeuerwehr an den Türen des Notstromerzeugergebäudes die Hochwasserschwellen zu geschwenkt und die ständig montierten Schwellen vor den Montagetoren kontrolliert werden.

Für diese Untersuchung wird angenommen, dass das Hochwasser zum Ausfall der Eigenbedarfsversorgung der Anlage führt. Dadurch werden die Notstromdiesel automatisch gestartet und übernehmen die Stromversorgung der Notstromschienen. Die notstromgesicherten Verbraucher werden, je nachdem ob sie vor Eintritt des Notstromfalls in Betrieb waren, gestaffelt wieder zugeschaltet oder zur Zuschaltung freigegeben. Dadurch wird auch der 3. Beckenkühlstrang FAK20 mit der zugehörigen Nachkühlkette wieder in Betrieb genommen.

Es wird hier davon ausgegangen, dass bei Unterlassen der oben genannten temporären Schutzmaßnahmen das Notstromerzeugergebäude überflutet wird und die Notstromdiesel des D1-Netzes ausfallen. Für das Unterlassen dieser Personalhandlungen wird ein Erwartungswert von $1,25E-03$ angesetzt (/SWA 83/ Table 20-7, item 1). Die Überflutung des Notstromerzeugergebäudes würde dann zum Ausfall des 3. Beckenkühlstrangs FAK20 führen.

Bei Ausfall des 3. Beckenkühlstrangs als Folge der Überflutung des Notstromerzeugergebäudes kann die BE-Lagerbeckenkühlung mit einem der beiden Becken-/Notnachkühlstränge FAK10 und 40 fortgesetzt werden. Die aktiven Komponenten dieser Beckenkühlketten werden dann von den D2-Dieseln im Notspeisegebäude notstromversorgt.

Ferner steht die Notfallmaßnahme zur externen Bespeisung des BE-Lagerbeckens zur Verfügung. Bei der Bespeisung des BE-Lagerbeckens von außen ist zusätzlich eine Druckentlastung des Sicherheitsbehälters erforderlich, um das BE-Lagerbecken vor unzulässigen Temperaturen zu schützen.

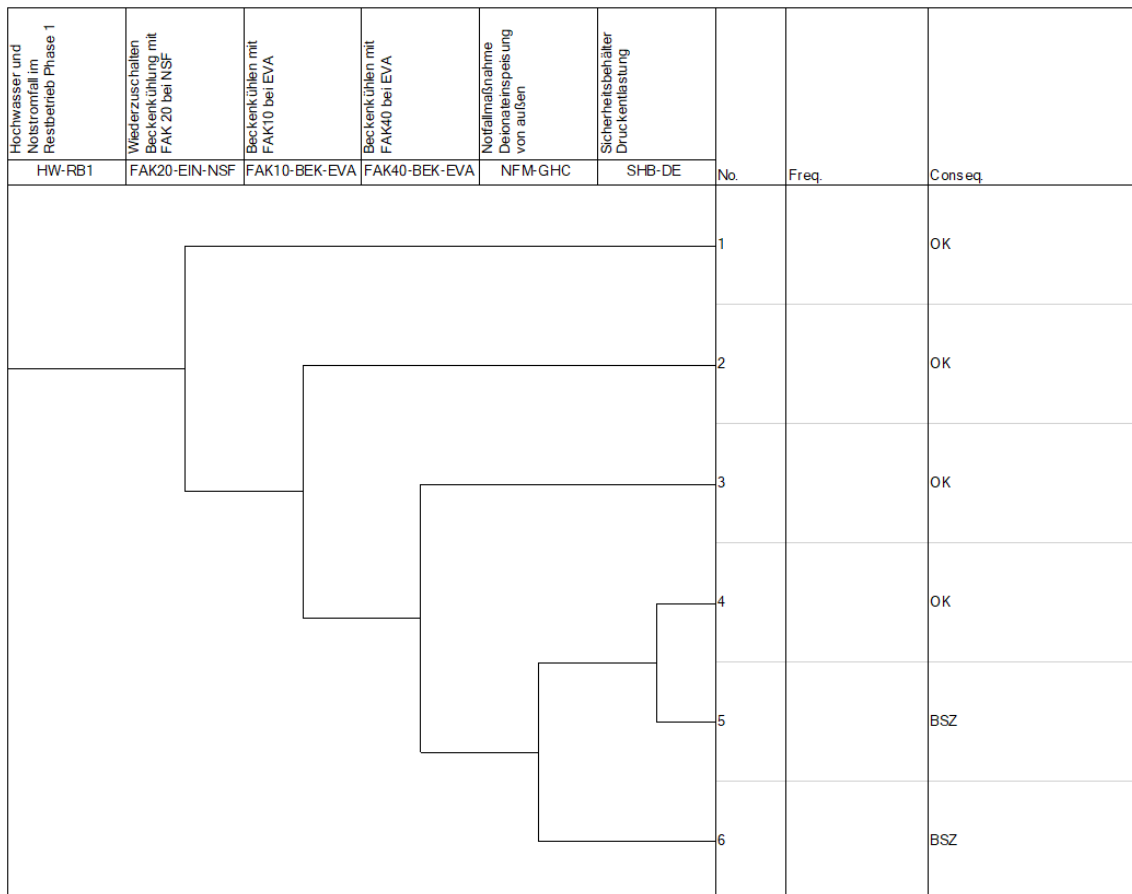


Abb. 7.9 Ereignisablaufdiagramm „Hochwasser im Restbetrieb Phase 1“

Die Häufigkeit (Punktwert) für Brennstabschadenszustände beim Ereignis „Hochwasser im Restbetrieb Phase 1“ beträgt

$$H_{BSZ_HW_RB1} = 3,5E-10/a.$$

Die größten Beiträge zu diesem Ergebnis stammen von den Reaktorschutzsignalen zum Start der Notstromdiesel und den Handmaßnahmen zur Inbetriebnahme von Reservesträngen.

7.3 Restbetrieb Phase 2

7.3.1 Verfügbare Systeme

Für die probabilistischen Bewertungen wird von den in der RSK-Stellungnahme /RSK 20/ beschriebenen Anforderungen an die Systemfunktion „Beckenkühlung“ ausgegangen. Neben dem betrieblichen Beckenkühlstrang steht ein Becken-

/Notnachkühlkühlstrang für die BE-Lagerbeckenkühlung zur Verfügung. Ferner wird die Reparatur einer ausgefallenen Beckenkühlpumpe und eine in der RSK-Stellungnahme erwähnte „mobile Beckenkühlpumpe mit installierten Anschlüssen zur Wiederherstellung eines Kreislaufbetriebs“ berücksichtigt.

Angepasste / zusätzliche Systemfunktionen

FAK10-BEK-RB-REP-AM – Beckenkühlen mit FAK10 + Reparatur + AM

BE-Lagerbeckenkühlung mit FAK10, diese Systemfunktion berücksichtigt auch eine Reparatur der Beckenkühlpumpe FAK10 (siehe Kapitel 5) sowie die Notfallmaßnahme zur Aufschaltung des mobilen Notstromdiesels bei Ausfall des D2-Notstromdiesels im Notstromfall.

FAK20-MOB – Ersatzmaßnahme: mobile Pumpe für FAK20

Beim auslösenden Ereignis „BE-Lagerbeckenkühlung“ wird der Einsatz einer mobilen Beckenkühlpumpe zum Ersatz der ausgefallenen Beckenkühlpumpe FAK20 berücksichtigt.

7.3.2 Notstromfall

Bei Ausfall der Eigenbedarfsversorgung über das Hauptnetz und das Reservenetz werden die Notstromdiesel automatisch gestartet und übernehmen die Stromversorgung der Notstromschienen. Die notstromgesicherten Verbraucher werden, je nachdem ob sie vor Eintritt des Notstromfalls in Betrieb waren, gestaffelt wieder zugeschaltet oder zur Zuschaltung freigegeben. Dadurch wird auch der 3. Beckenkühlstrang FAK20 mit der zugehörigen Nachkühlkette wieder in Betrieb genommen. Gelingt die Wiederschaltung des 3. Beckenkühlstrangs, ist der Ereignisablauf beherrscht. Gelingt die Wiederschaltung nicht, beispielsweise als Folge des Ausfalls des Notstromdiesels 2, so muss die BE-Lagerbeckenkühlung über den Reservebeckenkühlstrang FAK10 eingerichtet werden (Systemfunktion FAK10-BEK-RB-REP-AM). Diese Systemfunktion berücksichtigt auch eine Reparatur der Beckenkühlpumpe FAK10 (siehe Kapitel 5) sowie die Notfallmaßnahme zur Aufschaltung des mobilen Notstromdiesels bei Ausfall des D2-Notstromdiesels.

Fällt auch der Reservebeckenkühlstrang FAK10 aus, muss die Nachwärme über Verdampfung aus dem BE-Lagerbecken abgeführt werden. Dies kann mit der Notfallmaßnahme „Externe Bespeisung des BE-Beckens“ erfolgen. Dazu wird eine

Schlauchverbindung von einem Deionatbecken im Notspeisegebäude über eine mobile Pumpe zum Beckenkühlstrang FAK10 hergestellt.

Bei der Wärmeabfuhr aus dem BE-Lagerbecken über Verdampfung kommt es zu einem Druckaufbau im Sicherheitsbehälter. Daher ist zusätzlich eine Druckentlastung des Sicherheitsbehälters erforderlich, um die Strukturen des BE-Lagerbeckens vor unzulässigen Temperaturen zu schützen. Diese Druckentlastung erfolgt über die Kompressorleitung für die Druckprobe des Sicherheitsbehälters und dient dazu, die Kühlmitteltemperatur im BE-Lagerbecken auf ca. 120 °C zu begrenzen. Bei dieser Temperatur ist die Integrität des BE-Lagerbeckens langfristig gewährleistet.

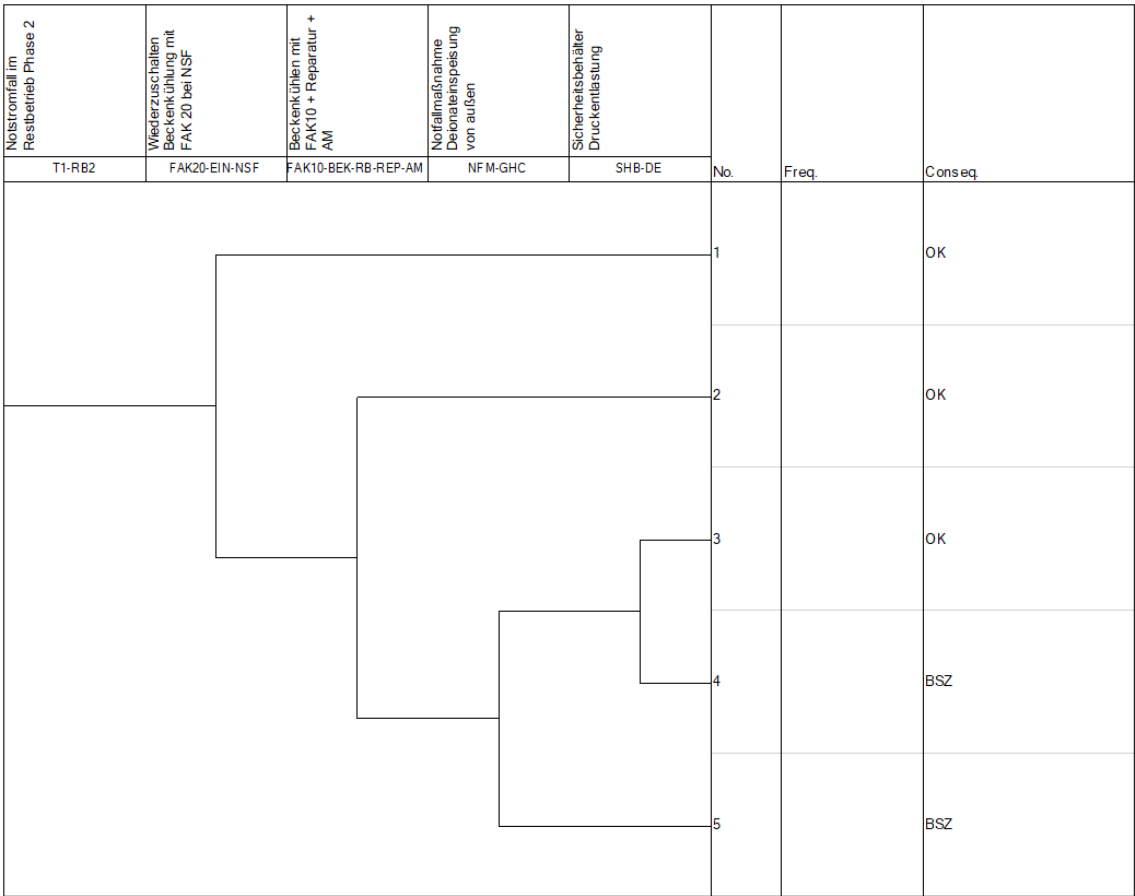


Abb. 7.10 Ereignisablaufdiagramm „Notstromfall im Restbetrieb Phase 2“

Die Häufigkeit (Punktwert) für Brennstabschadenszustände beim Ereignis „Notstromfall im Restbetrieb Phase 2“ beträgt

$$H_{BSZ_T1_RB2} = 2,6E-07/a.$$

Der größte Beitrag zu diesem Ergebnis stammt von den Reaktorschutzsignalen zum Start der Notstromdiesel.

7.3.3 Ausfall der BE-Lagerbeckenkühlung

Bei Ausfall des laufenden Beckenkühlstranges FAK20 muss die BE-Lagerbeckenkühlung über den Reservebeckenkühlstrang FAK10 eingerichtet werden (Systemfunktion FAK10-BEK-RB-REP-AM). Diese Systemfunktion berücksichtigt auch eine Reparatur der Beckenkühlpumpe FAK10 (siehe Kapitel 5). Gelingt die Fortsetzung des Beckenkühlbetriebs mit FAK10 nicht, so wäre der Einsatz einer mobilen Beckenkühlpumpe zum Ersatz der ausgefallenen Beckenkühlpumpe FAK20 möglich.

Sind der Reservebeckenkühlstrang FAK10 und die mobile Beckenkühlpumpe ausgefallen, muss die Nachwärme über Verdampfung aus dem BE-Lagerbecken abgeführt werden. Über das Deionatnachspeiseventil FAL11AA007 und die Deionat-Betriebspumpen wird der Füllstand im BE-Lagerbecken automatisch konstant gehalten.

Ist auch die automatische Nachspeisung mit dem Deionatsystem unverfügbar, kann die Nachwärme mit den Notfallmaßnahmen „Externe Bespeisung des BE-Beckens“ und „Ungefilterter Druckentlastung des Sicherheitsbehälters“ abgeführt werden, siehe Ereignisablaufbeschreibung zum Notstromfall Abschnitt 7.2.2

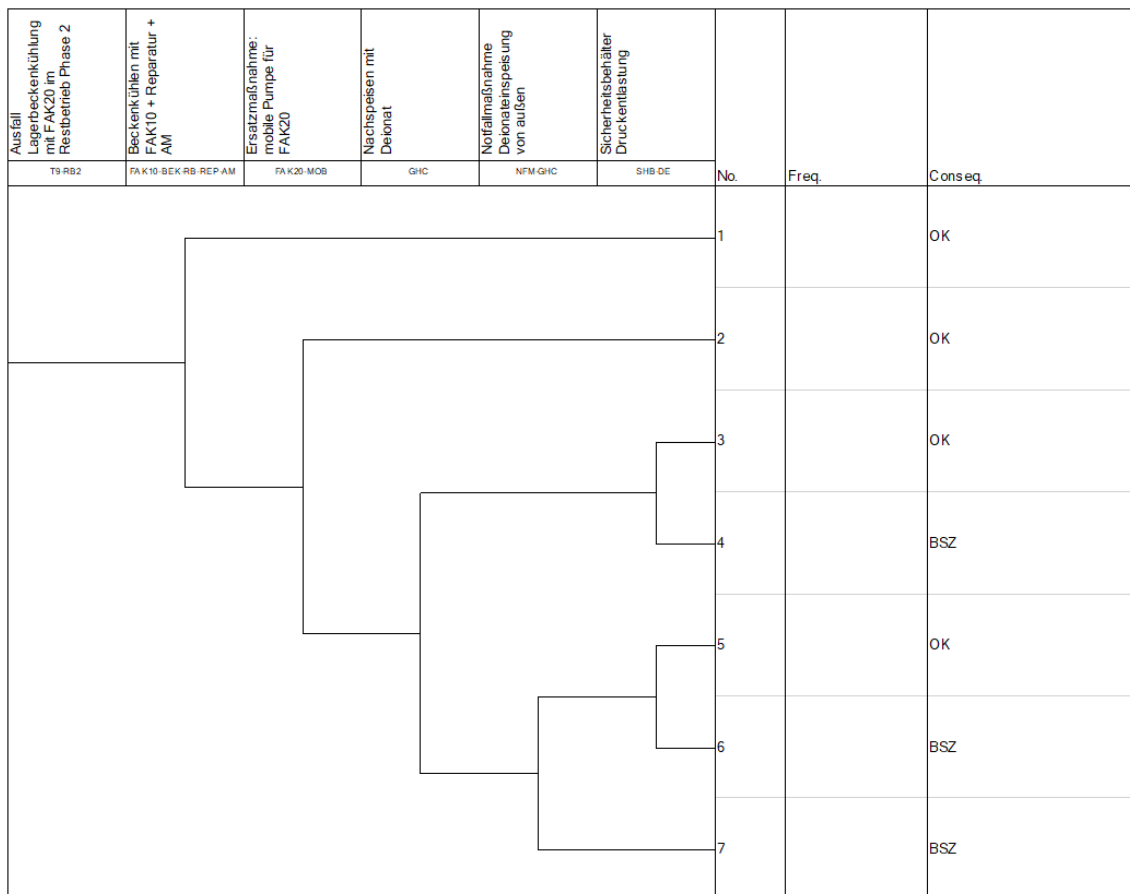


Abb. 7.11 Ereignisablaufdiagramm „Ausfall der BE-Lagerbeckenkühlung im Restbetrieb Phase 2“

Die Häufigkeit (Punktwert) für Brennstabschadenszustände beim Ereignis „Ausfall der BE-Lagerbeckenkühlung im Restbetrieb Phase 2“ beträgt

$$H_{BSZ_T9_RB2} = 5,3E-07/a.$$

Die größten Beiträge zu diesem Ergebnis stammen von der übergeordneten Diagnose des Ereignisses und den Handmaßnahmen zur Inbetriebnahme von Reservesträngen.

7.3.4 Leck an der BE-Lagerbeckenauskleidung

Der Ereignisablauf ist der Gleiche wie in der Restbetriebsphase 1, mit dem Unterschied, dass nur noch ein Beckenkühlstrang (FAK10) für die Kühlmittelergänzung aus einem Flutbecken zur Verfügung steht.

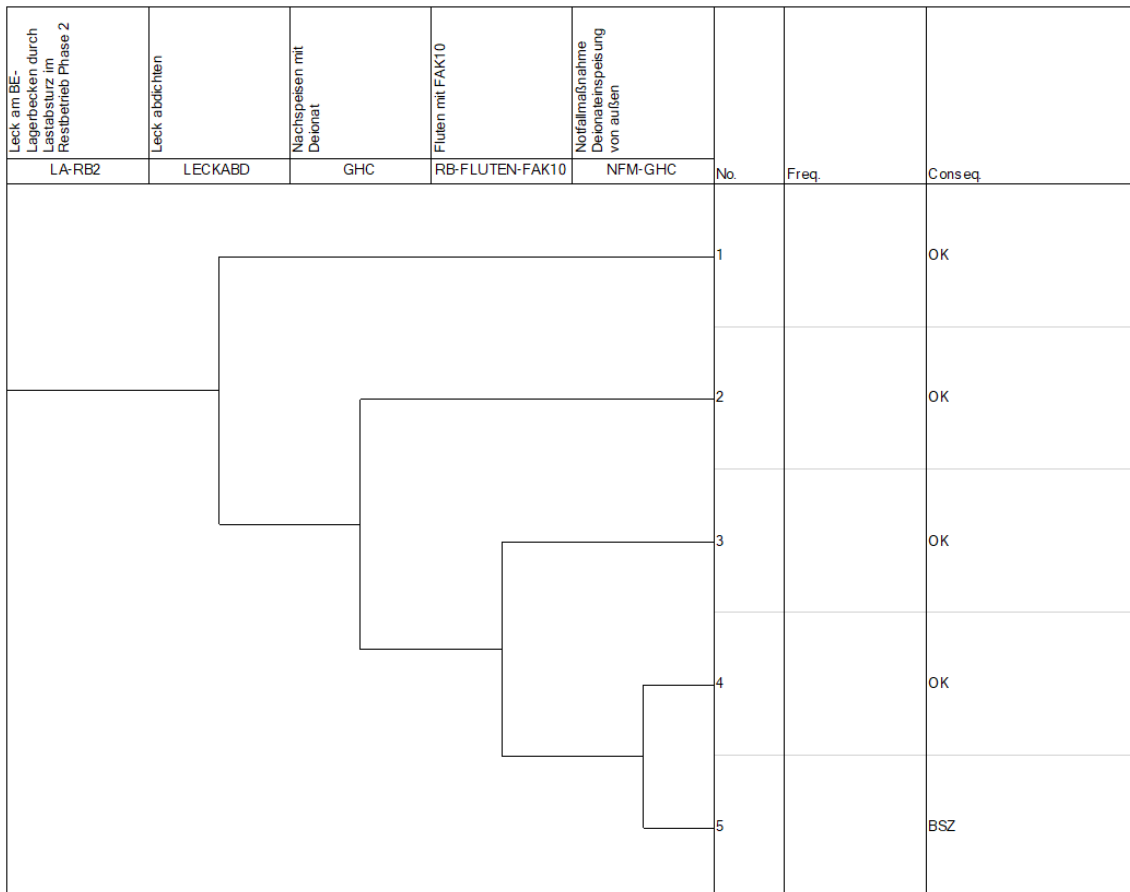


Abb. 7.12 Ereignisablaufdiagramm „Leck an der Lagerbeckenauskleidung im Restbetrieb Phase 2“

Die Häufigkeit (Punktwert) für Brennstabschadenszustände beim Ereignis „Leck an der Lagerbeckenauskleidung“ beträgt

$$H_{BSZ_LA_RB2} = 3,4E-11/a.$$

Die größten Beträge zu diesem Ereignis stammen vom Ausfall der automatischen Deionatnachspeisung und der Diagnose.

7.3.5 Leck an angeschlossenen Rohrleitungen

Zu Leckagen und -häufigkeiten siehe Abschnitt 7.2.5.

7.3.5.1 Leck im absperrbaren Bereich

Der Ereignisablauf ist der Gleiche wie in der Restbetriebsphase 1, mit dem Unterschied, dass nur noch ein Beckenkühlstrang (FAK10) für die Kühlmittelergänzung und die Lagerbeckenkühlung zur Verfügung steht.

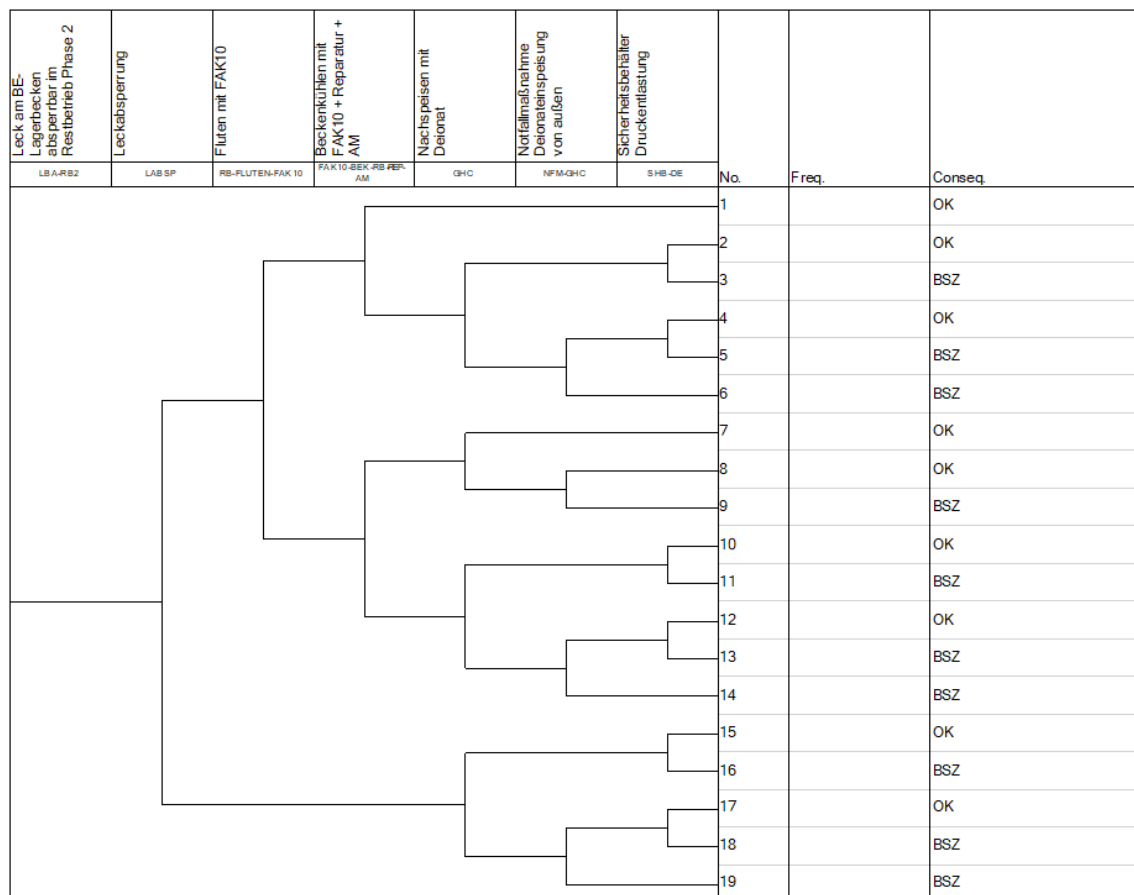


Abb. 7.13 Ereignisablaufdiagramm „Absperbares Leck an angeschlossenen Rohrleitungen des Lagerbeckenkühlsystems im Restbetrieb Phase 2“

Die Häufigkeit (Punktwert) für Brennstabschadenszustände beim Ereignis „Absperbares Leck an angeschlossenen Rohrleitungen“ beträgt

$$H_{BSZ_LBA_RB2} = 2,7E-08/a.$$

Der größte Beitrag zu diesem Ergebnis stammt von den Handmaßnahmen zur Inbetriebnahme von Reservesträngen und zur Sicherheitsbehälterdruckentlastung.

7.3.5.2 Leck im nicht absperrbaren Bereich

Der Ereignisablauf ist der Gleiche wie in der Restbetriebsphase 1, mit dem Unterschied, dass nur noch ein Beckenkühlstrang (FAK10) für die Kühlmittelergänzung und die Lagerbeckenkühlung zur Verfügung steht.

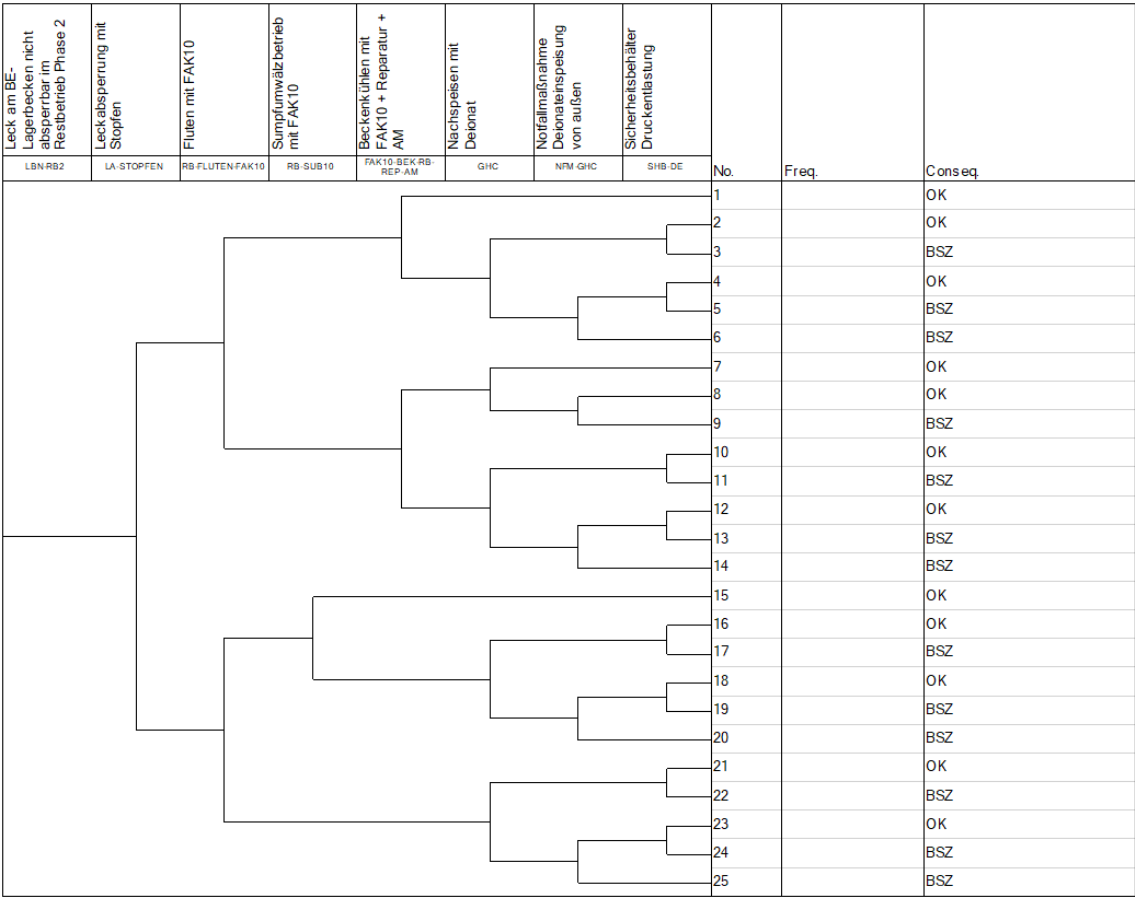


Abb. 7.14 Ereignisablaufdiagramm „Nicht absperbares Leck an angeschlossenen Rohrleitungen des Lagerbeckenkühlsystems im Restbetrieb Phase 2“

Die Häufigkeit (Punktwert) für Brennstabschadenszustände beim Ereignis „Absperbares Leck an angeschlossenen Rohrleitungen“ beträgt

$$H_{BSZ_LBN_RB2} = 2,8E-08/a.$$

Der größte Beitrag zu diesem Ergebnis stammt von den Handmaßnahmen zur Inbetriebnahme von Reservesträngen und zur Sicherheitsbehälterdruckentlastung.

7.3.6 Einwirkungen von außen

7.3.6.1 Flugzeugabsturz

Flugzeugabsturz auf das Schaltanlagengebäude

Der Ereignisablauf ist der Gleiche wie in der Restbetriebsphase 1, mit dem Unterschied, dass nur noch ein Beckenkühlstrang (FAK10) für die Lagerbeckenkühlung zur Verfügung steht.

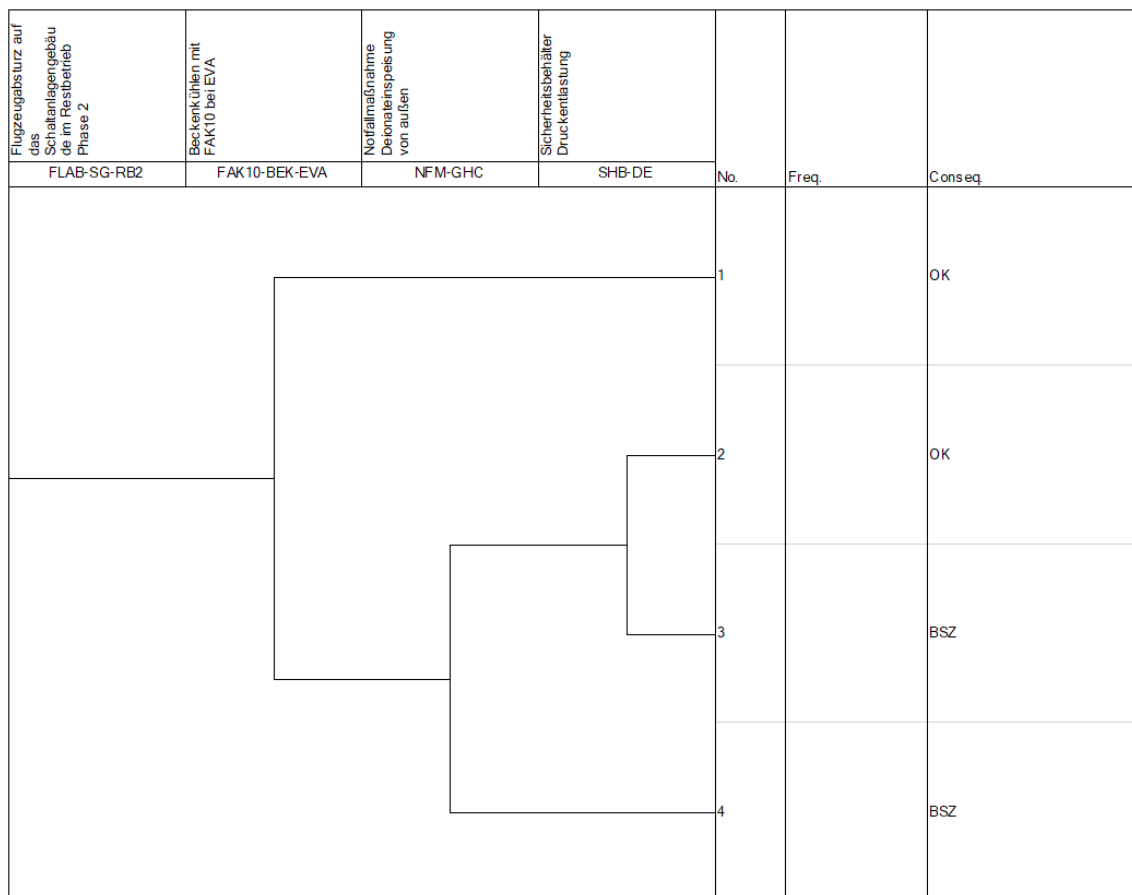


Abb. 7.15 Ereignisablaufdiagramm „Flugzeugabsturz auf das Schaltanlagengebäude im Restbetrieb Phase 2“

Die Häufigkeit (Punktwert) für Brennstabschadenzustände beim Ereignis „Flugzeugabsturz auf das Schaltanlagengebäude im Restbetrieb Phase 2“ beträgt

$$H_{BSZ_FLAB_SG_RB2} = 1,7E-09/a.$$

Der größten Beiträge zu diesem Ergebnis stammen von den Komponenten zur Notstromversorgung und zur Sicherheitsbehälterdruckentlastung.

Flugzeugabsturz auf Nebenkühlwassergebäude

Es wird von einem Absturz auf das Nebenkühlwasserpumpenbauwerk, welches die Redundanzen 1 und 2 versorgt, ausgegangen. Dadurch fällt die Nebenkühlwasserversorgung für den laufenden 3. Beckenkühlstrang FAK20 und den Beckenkühlstrang FAK10 aus.

Der Ereignisablauf ist der Gleiche wie in der Restbetriebsphase 1, mit dem Unterschied, dass nur noch ein Beckenkühlstrang (FAK10) für die Lagerbeckenkühlung zur Verfügung steht.

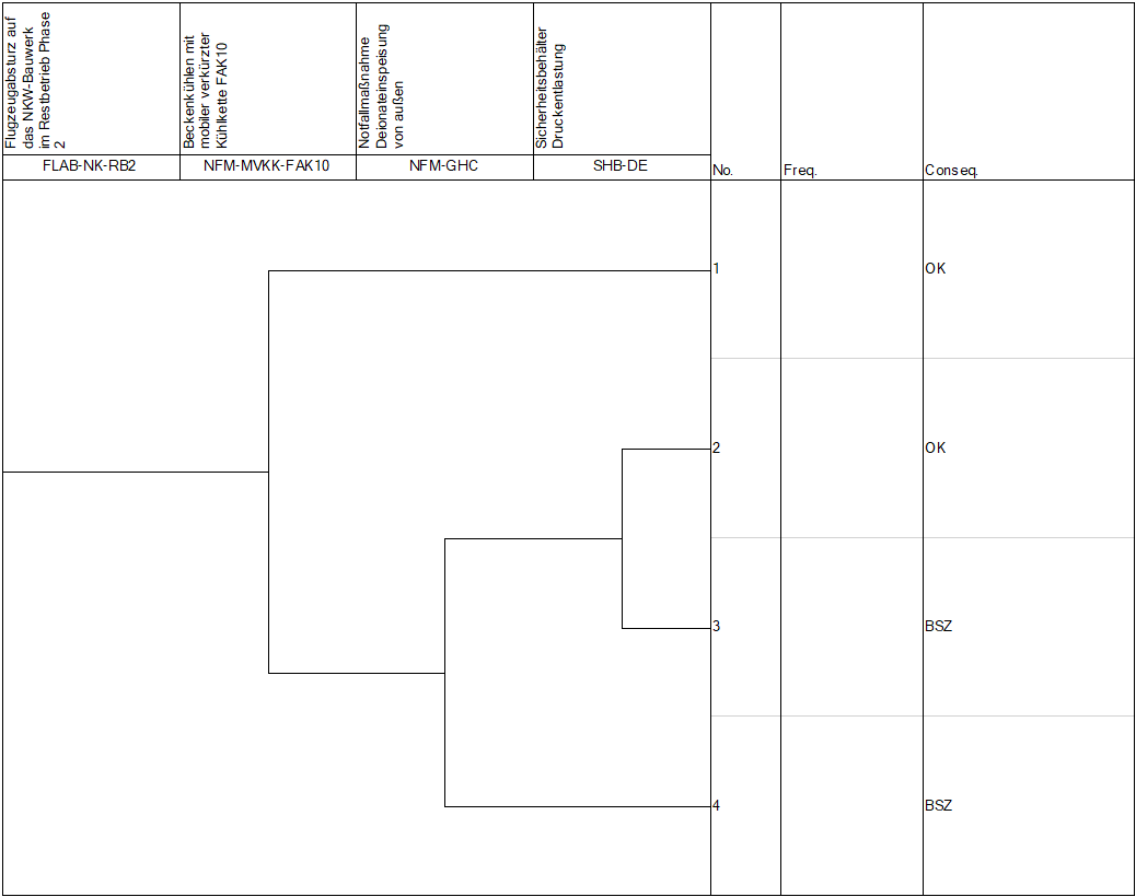


Abb. 7.16 Ereignisablaufdiagramm „Flugzeugabsturz auf das Nebenkühlwasserpumpenbauwerk im Restbetrieb Phase 2“

Die Häufigkeit (Punktwert) für Brennstabschadenszustände beim Ereignis „Flugzeugabsturz auf das Nebenkühlwasserpumpenbauwerk im Restbetrieb Phase 2“ beträgt

$$H_{BSZ_FLAB_NK_RB2} = 4,5E-09/a.$$

Die größten Beiträge zu diesem Ereignis stammen von der Notfallmaßnahme zur Inbetriebnahme der mobilen verkürzten Beckenkühlkette und Komponenten zur Sicherheitsbehälterdruckentlastung.

7.3.6.2 Explosionsdruckwelle

Der Ereignisablauf ist der Gleiche wie in der Restbetriebsphase 1, mit dem Unterschied, dass nur noch ein Beckenkühlstrang (FAK10) für die Lagerbeckenkühlung zur Verfügung steht.

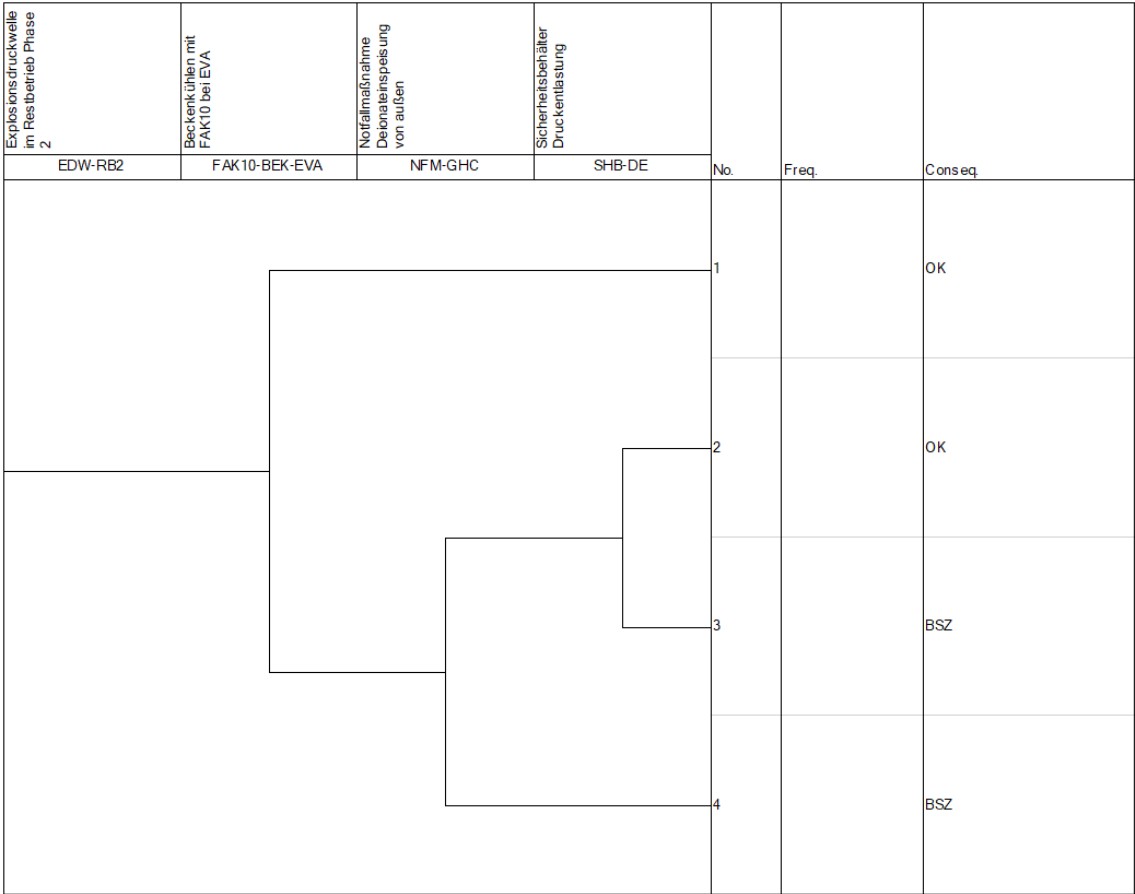


Abb. 7.17 Ereignisablaufdiagramm „Explosionsdruckwelle im Restbetrieb Phase 2“

Die Häufigkeit (Punktwert) für Brennstabschadenszustände beim Ereignis „Explosionsdruckwelle im Restbetrieb Phase 2“ beträgt

$$H_{BSZ_EDW_RB2} = 5,9E-10/a.$$

Die größten Beiträge zu diesem Ergebnis stammen von den Komponenten zur Notstromversorgung und zur Sicherheitsbehälterdruckentlastung.

7.3.6.3 Hochwasser

Der Ereignisablauf ist der Gleiche wie in der Restbetriebsphase 1, mit dem Unterschied, dass nur noch ein Beckenkühlstrang (FAK10) für die Lagerbeckenkühlung zur Verfügung steht.

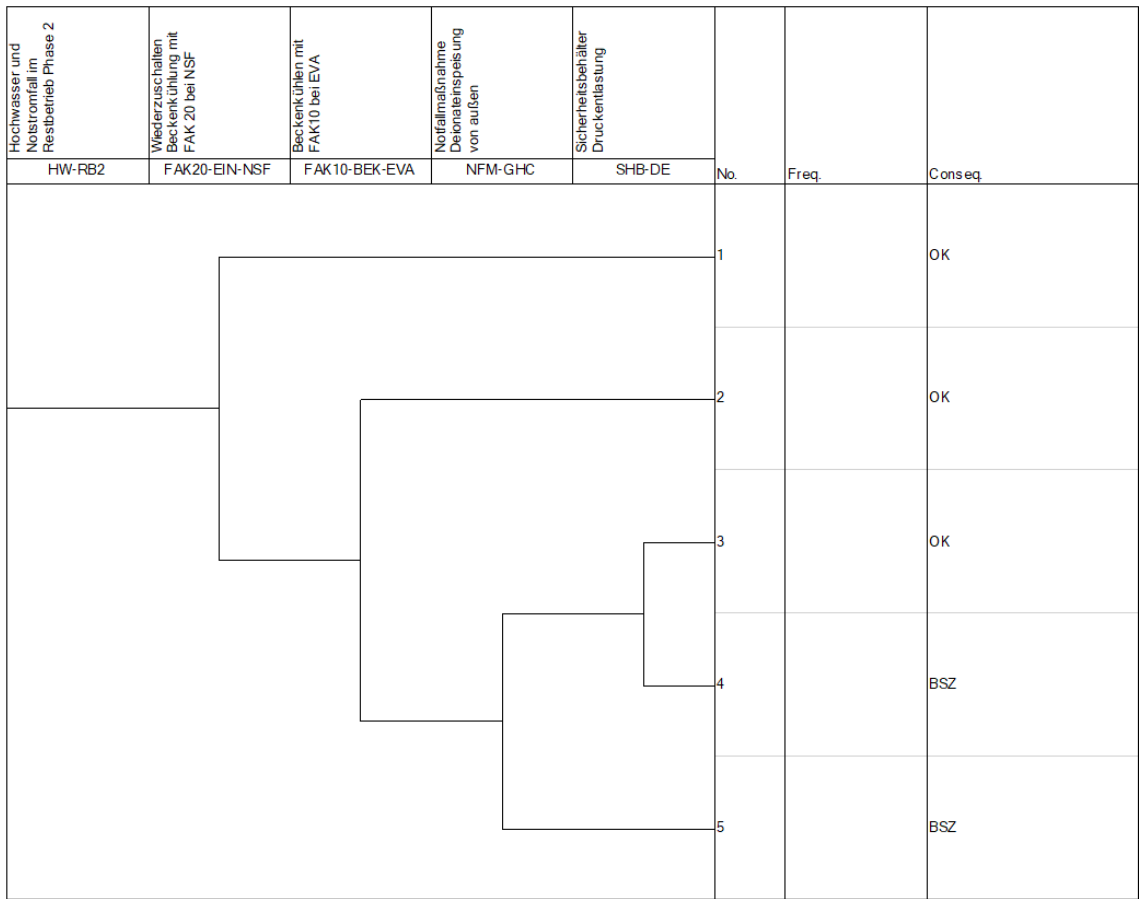


Abb. 7.18 Ereignisablaufdiagramm „Hochwasser im Restbetrieb Phase 2“

Die Häufigkeit (Punktwert) für Brennstabschadenszustände beim Ereignis „Hochwasser im Restbetrieb Phase 2“ beträgt

$$H_{BSZ_HW_RB2} = 1,6E-09/a.$$

Der größte Beitrag zu diesem Ergebnis stammt von den Reaktorschutzsignalen zum Start der Notstromdiesel.

7.4 Zusammenfassung der Ergebnisse

Restbetrieb Phase 1

In Tab. 7.3 sind die für die DWR-Anlage betrachteten auslösenden Ereignisse und die jeweils ermittelten Häufigkeiten für Brennstabschadenszustände in der Restbetriebsphase 1 zusammenfassend dargestellt.

Tab. 7.3 Fraktile und Erwartungswerte der Häufigkeiten für Brennstabschadenszustände für die betrachteten auslösenden Ereignisse in der Restbetriebsphase 1

Auslösendes Ereignis	Häufigkeit für Brennstabschadenszustände /a				
	5 % - Fraktil	50 % - Fraktil	Punktwert	Erwartungswert	95 % - Fraktil
Notstromfall in der Restbetriebsphase 1	5,9E-09	2,2E-08	4,6E-08	4,6E-08	1,3E-07
Ausfall BE-Lagerbeckenkühlung	4,6E-08	1,6E-07	4,8E-07	4,5E-07	1,3E-06
Leck an der Lagerbeckenauskleidung	1,8E-14	1,9E-12	1,0E-11	1,1E-11	3,7E-11
Leck am BE-Lagerbecken (absperrbar)	5,0E-11	7,4E-10	4,7E-09	4,2E-09	1,5E-08
Leck am BE-Lagerbecken (nicht absperrbar)	3,2E-11	4,8E-10	3,5E-09	3,7E-09	1,0E-08
Flugzeugabsturz auf das Reaktorgebäude	2,1E-11	2,1E-10	5,7E-10	5,7E-10	2,1E-09
Flugzeugabsturz auf das Schaltanlagengebäude	7,0E-12	1,0E-10	3,6E-10	3,4E-10	1,3E-09
Flugzeugabsturz auf das Nebenkühlwassergebäude	1,5E-11	2,0E-10	7,0E-10	6,6E-10	2,5E-09
Explosionsdruckwelle	2,9E-11	8,7E-11	1,3E-10	1,3E-10	3,5E-10
Hochwasser	8,7E-12	1,0E-10	3,5E-10	3,4E-10	1,3E-09
Gesamtergebnis:	6,2E-08	2,0E-07	5,3E-07	4,7E-07	1,4E-06

Insgesamt wurde ein Erwartungswert von 4,7E-07/a für die Brennstabschadenshäufigkeit in der Restbetriebsphase 1 ermittelt. Das Ergebnis wird zu ca. 95 % durch den Beitrag des auslösenden Ereignisses „Ausfall BE-Lagerbeckenkühlung“ bestimmt.

Abb. 7.19 zeigt die Fussell-Vesely-Importanz (FV, Anteil der Minimalschnitte, die das Basisereignis enthalten, im Verhältnis zum Gesamtergebnis) der Basisereignisse in der Restbetriebsphase 1. Den größten Einfluss auf das Gesamtergebnis haben die auslösenden Ereignisse „Ausfall BE-Lagerbeckenkühlung“ (T9-NB) und „Notstromfall“ (T1-NB) sowie die Personalhandlungen zur Wiederinbetriebnahme der ausgefallenen

BE-Lagerbeckenkühlung (OP_BEK-BHB, OP_REVOV_VO) und zur Sicherheitsbehälterdruckentlastung (OP_VENT).

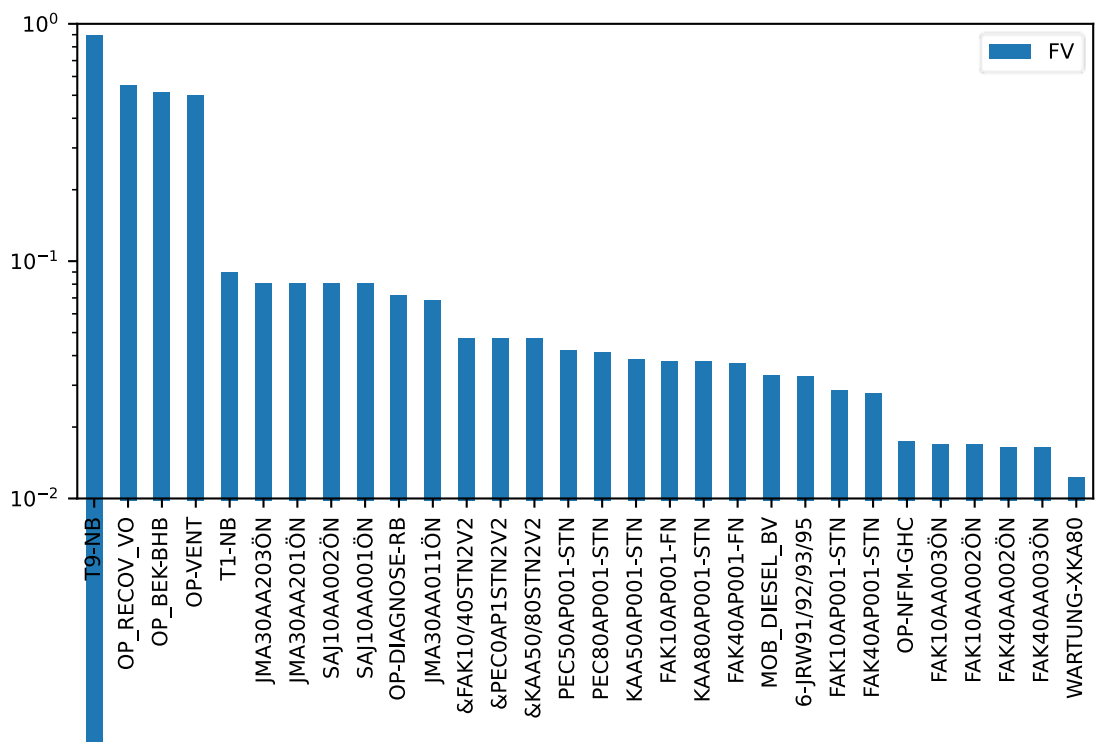


Abb. 7.19 Fussell-Vesely-Importanz der Basisereignisse in der Restbetriebsphase 1

Restbetrieb Phase 2

In Tab. 7.4 sind die für die DWR-Anlage betrachteten auslösenden Ereignisse und die jeweils ermittelten Häufigkeiten für Brennstabschadenszustände in der Restbetriebsphase 2 zusammenfassend dargestellt.

Tab. 7.4 Fraktile und Erwartungswerte der Häufigkeiten für Brennstabschadenszustände für die betrachteten auslösenden Ereignisse in der Restbetriebsphase 2

Auslösendes Ereignis	Häufigkeit für Brennstabschadenszustände /a				
	5 % - Fraktil	50 % - Fraktil	Punktwert	Erwartungswert	95 % - Fraktil
Notstromfall in der Restbetriebsphase 2	4,0E-08	1,6E-07	2,6E-07	2,6E-07	7,4E-07
Ausfall BE-Lagerbeckenkühlung	6,2E-08	2,5E-07	5,3E-07	5,1E-07	1,7E-06
Leck an der Lagerbeckenauskleidung	4,7E-14	5,3E-12	3,4E-11	3,4E-11	1,4E-10
Leck am BE-Lagerbecken (absperrbar)	3,1E-10	5,0E-09	2,7E-08	2,3E-08	9,1E-08
Leck am BE-Lagerbecken (nicht absperrbar)	3,2E-10	5,4E-09	2,8E-08	2,6E-08	9,8E-08
Flugzeugabsturz auf das Reaktorgebäude	2,1E-11	2,1E-10	5,7E-10	5,7E-10	2,1E-09
Flugzeugabsturz auf das Schaltanlagengebäude	3,6E-11	4,7E-10	1,7E-09	1,7E-09	6,5E-09
Flugzeugabsturz auf Nebenkühlwassergebäude	1,0E-10	1,3E-09	4,5E-09	4,7E-09	1,7E-08
Explosionsdruckwelle im Nachbetrieb	1,4E-10	4,1E-10	5,9E-10	5,9E-10	1,6E-09
Hochwasser	4,0E-11	4,8E-10	1,6E-09	1,6E-09	6,2E-09
Gesamtergebnis:	1,3E-07	4,7E-07	8,6E-07	8,4E-07	2,7E-06

Insgesamt wurde ein Erwartungswert von 8,4E-07/a für die Brennstabschadenshäufigkeit in der Restbetriebsphase 2 ermittelt. Das Ergebnis wird zu ca. 90 % durch den Beitrag der auslösenden Ereignisse „Ausfall BE-Lagerbeckenkühlung“ und „Notstromfall“ bestimmt.

Abb. 7.20 zeigt die Fussel-Vesely-Importanz der Basisereignisse in der Restbetriebsphase 2. Den größten Einfluss auf das Gesamtergebnis haben die auslösenden Ereignisse „Ausfall BE-Lagerbeckenkühlung“ (T9-NB) und „Notstromfall“ (T1-NB), die Personalhandlungen zu Inbetriebnahme der mobilen Pumpe (OP-MOB-Pumpe) sowie

Komponenten zur BE-Lagerbeckenkühlung (PEC50, KAA50) und zur Sicherheitsbehälterdruckentlastung (JMA30, SAJ10).

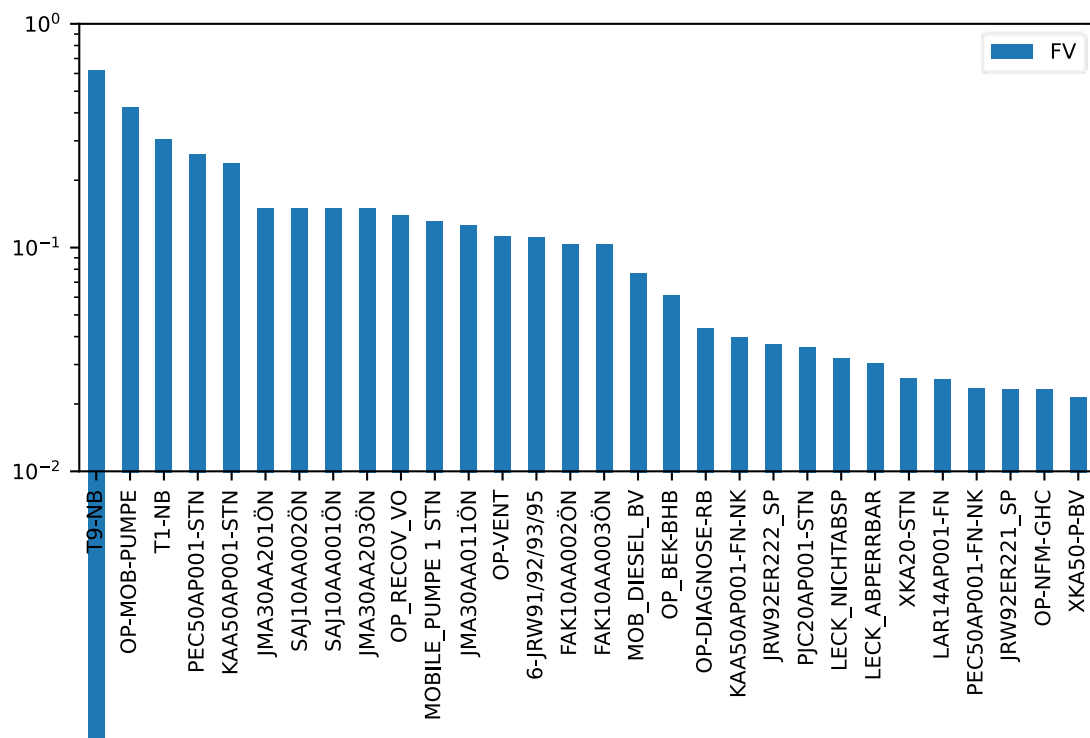


Abb. 7.20 Fussell-Vesely-Importanz der Basisereignisse in der Restbetriebsphase 2

Vergleich der Phasen

In Tab. 7.5 sind die für die DWR-Anlage betrachteten auslösenden Ereignisse und die jeweils ermittelten Häufigkeiten für Brennstabschadenszustände im Nachbetrieb und den Restbetriebsphasen 1 und 2 zusammenfassend dargestellt.

Tab. 7.5 Vergleich der Phasen

Auslösendes Ereignis	Häufigkeit für Brennstabschadenszustände /a Erwartungswerte		
	Nachbetrieb /GRS 19/	Restbetrieb Phase 1	Restbetrieb Phase 2
Notstromfall	2,6E-08	4,6E-08	2,6E-07
Ausfall BE-Lagerbeckenkühlung	8,4E-07	4,5E-07	5,1E-07
Leck an der Lagerbecken-auskleidung	1,9E-08	1,1E-11	3,4E-11
Leck am BE-Lagerbecken (absperrbar)	1,6E-08	4,2E-09	2,3E-08
Leck am BE-Lagerbecken (nicht absperrbar)	4,2E-08	3,7E-09	2,6E-08
Flugzeugabsturz auf das Reaktorgebäude	5E-10	5,7E-10	5,7E-10
Flugzeugabsturz auf das Schaltanlagegebäude	1,2E-9	3,4E-10	1,7E-09
Flugzeugabsturz auf Nebenköhlwassergebäude	-	6,6E-10	4,7E-09
Explosionsdruckwelle	3,1E-08	1,3E-10	5,9E-10
Hochwasser	-	3,4E-10	1,6E-09
Gesamtergebnis:	9,8E-07	4,7E-07	8,4E-07

Die Gesamtergebnisse liegen in den drei betrachteten Phasen in der gleichen Größenordnung ($E-07/a < H < E-06/a$). Die Ergebnisse werden dadurch bestimmt, dass sich über den Zeitverlauf die Anzahl der Redundanzen zur BE-Lagerbeckenkühlung verringert und andererseits mehr Zeit für die Personalhandlungen zur Verfügung steht. In der Restbetriebsphase 2 wurden zudem eine Reparatur und eine Ersatzmaßnahme berücksichtigt.

8 Probabilistische Bewertungen für SWR

Die GRS hat bisher keine probabilistischen Analysen für das BE-Lagerbecken für Anlagen vom Typ SWR72 durchgeführt. Es liegen uns keine Vorarbeiten vor. Die Betrachtung eines umfangreichen Spektrums an auslösenden Ereignissen ist in diesem Vorhaben nicht möglich. Für diesen Anlagentyp wird daher exemplarisch der Ereignisablauf „Ausfall der Brennelement-Lagerbeckenkühlung“ für die drei in der RSK-Stellungnahme beschriebenen Phasen probabilistisch bewertet. Dafür wurde ein RiskSpectrum-Projekt erstellt.

8.1 Eintrittshäufigkeit des auslösenden Ereignisses

Ausfälle einer laufenden Beckenkühlpumpe wurden aus der betrachteten Anlage nicht gemeldet. Es wird von einer Gesamtbeobachtungszeit von 74 Jahren ausgegangen (2 Blöcke, 1985 – 2021). Damit ergibt sich eine Eintrittshäufigkeit für einen Ausfall des laufenden BE-Lagerbeckenkühlstranges von $6,8\text{E-}03/\text{a}$ /FAK 05a/, Gl. 3-11 mit der in Tab. 8.1 angegebenen Verteilung.

Tab. 8.1 Eintrittshäufigkeit für einen Ausfall des laufenden Beckenkühlstranges

Randbedingung	Alpha	Beta	Erwartungswert	Bezug	Verteilungstyp
Ausfall des laufenden Beckenkühlstranges	0,5	74	$6,8\text{E-}03$	pro Jahr	Beta

8.2 Verfügbare Systeme

Die folgenden Systemfunktionen werden in den Ereignisbäumen berücksichtigt:

TM2 – Umschaltung auf Beckenkühlstrang TM2

Bei Ausfall des in Betrieb befindlichen Beckenkühlstrangs TM1 kann auf den Beckenkühlstrang TM2 umgeschaltet und so die Nachwärmeabfuhr fortgesetzt werden.

TH2 – Beckenkühlung mit Nachkühlstrang TH2 (direkte Kühlung)

Bei Ausfall beider Beckenkühlstränge TM1 und TM2 kann der Nachkühlstrang TH2 für die Lagerbeckenkühlung in Betrieb genommen werden. Der Nachkühlstrang TH2 verfügt über Anschlüsse an die Einspeise- und Ansaugleitungen des BE-Lagerbeckens und kann daher das Kühlwasser im BE-Lagerbecken direkt kühlen.

TH1/TH3 – Beckenkühlung mit Nachkühlstrang TH1/TH3 (indirekte Kühlung)

Mit dieser Funktion kann bei Ausfall der Beckenkühlung mit TM1/2 und TH2 eine indirekte Beckenkühlung hergestellt werden. Dafür wird die Nachkühlkette TH1/TF1/VE1 oder TH3/TF3/VE3 in der Betriebsweise „KOKA-Kühlen“ in Betrieb genommen. Für die indirekte Beckenkühlung werden Armaturen des Beckenreinigungssystems TG geöffnet. Ein Teilstrom der Fördermenge des TH-Systems wird dadurch in das Lagerbecken gefördert und fließt über das Beckenreinigungssystem zurück in die KOKA.

TD99 – Verdampfen und Nachspeisen mit TD99 Spülwasser

Über das Nachspeiseventil TD99S130 und die Spülwasserpumpen TD99D001/2 wird der Füllstand im BE-Lagerbecken automatisch konstant gehalten. Diese Spülwassereinspeisung ist gemäß BHB vor Inbetriebnahme der indirekten Lagerbeckenkühlung mit den Nachkühlsträngen TH1 oder TH3 (Funktionen TH1/TH3) außer Betrieb zu nehmen. Sie müsste bei Ausfall von TH1 und TH3 wieder von Hand in Betrieb genommen werden.

UJ-MP – Verdampfen und Nachspeisen mit UJ oder mobiler Pumpe

Mit dem Feuerlöschsystem UJ kann in das BE-Lagerbecken eingespeist werden. Dazu muss eine Schlauchverbindung vom Feuerlöschsystem zum BE-Lagerbecken hergestellt und eine Armatur des Feuerlöschsystems geöffnet werden. Steht das Feuerlöschsystem nicht zur Verfügung, kann das BE-Lagerbecken mit einer mobilen Pumpe (Hydrosub) aufgefüllt werden. Bei dieser Maßnahme des Notfallhandbuches wird mit einer Tauchpumpe Flusswasser in das BE-Lagerbecken gefördert. Dazu werden Schläuche vom Einlaufkanal bis zum Reaktorgebäude verlegt. Für die Einspeisung in das BE-Lagerbecken wird der gleiche Schlauchanschluss wie bei der Einspeisung mit UJ genutzt.

HYDROSUB – BE-Lagerbeckenkühlung mit Hydrosub

Diese Ersatzmaßnahme wird in der Restbetriebsphase 2 berücksichtigt. Bei Ausfall der Zwischen- und Nebenkühlwassersysteme VJ/VF/VM für das Beckenkühlsystem TM und Ausfall der Beckenkühlung mit dem Nachkühlstrang TH2 kann mit der mobilen Pumpe (Hydrosub) der Beckenkühlbetrieb fortgesetzt werden. Über Schlauchverbindungen wird der Beckenkühler auf der Zwischenkühlseite mit einer mobilen Pumpe mit Flusswasser gekühlt. Für diese Ersatzmaßnahme ist der Betrieb der Beckenkühlpumpe TM2 erforderlich.

TL10 – Öffnen von Druckausgleichsklappen

Gemäß BHB sind bei Ausfall aller Systeme zur BE-Lagerbeckenkühlung spätestens

10 Stunden nach dem Erreichen einer BE-Lagerbeckentemperatur von 35 °C zwei Druckausgleichsklappen zwischen Reaktorgebäude und Maschinenhaus zu öffnen. Diese Klappen öffnen auch selbsttätig bei einem Überdruck von 100 mbar. Es wird hier davon ausgegangen, dass das Öffnen einer der sechs vorhandenen Druckausgleichsklappen ausreicht, um einen Druckaufbau im Reaktorgebäude zu verhindern und die Strukturen des BE-Lagerbeckens vor unzulässigen Temperaturen zu schützen.

8.3 Nachbetrieb

Es wurden noch keine Änderung an der Verfügbarkeit der Beckenkühlsysteme vorgenommen. Alle Einrichtungen zur Beckenkühlung, mit Ausnahme der Ersatzmaßnahme, stehen zur Verfügung.

Bei Ausfall der laufenden Beckenkühlpumpe sind Handmaßnahmen erforderlich, um die Lagerbeckenkühlung wieder in Betrieb zu nehmen. Im Ereignisbaum ist daher eine übergeordnete Diagnose berücksichtigt, siehe Kapitel 4. Wird der Ausfall der Lagerbeckenkühlung nicht erkannt oder werden keine Maßnahmen zur Wiederinbetriebnahme der Lagerbeckenkühlung durchgeführt, so würde die Nachwärme über Verdampfung abgeführt werden, wobei das Spülwassersystem TD99 die Verdampfungsverluste automatisch nachspeisen würde. Der dadurch im Reaktorgebäude entstehende Überdruck muss durch Öffnen von Druckausgleichsklappen (TH10) in Richtung Maschinenhaus begrenzt werden.

Bei Ausfall des laufenden Beckenkühlstranges TM1 muss die BE-Lagerbeckenkühlung auf den Reservestrang TM2 umgeschaltet werden. Fällt auch der 2. Beckenkühlstrang aus, kann der Nachkühlstrang TH2 für eine direkte Lagerbeckenkühlung in Betrieb genommen werden. Ist auch der Nachkühlstrang TH2 unverfügbar, so kann eine indirekte Lagerbeckenkühlung mit den Nachkühlsträngen TH1 oder TH3 eingestellt werden.

Sind sämtliche Becken- und Nachkühlstränge ausgefallen, muss die Nachwärme über Verdampfung aus dem BE-Lagerbecken abgeführt werden. Für die Nachspeisung von Verdampfungsverlusten stehen das Spülwassersystem TD99, das Feuerlöschsystem oder eine mobile Pumpe (Notfallmaßnahme) zur Verfügung. Zusätzlich müssen in diesem Fall die Druckausgleichsklappen (TH10) des Reaktorgebäudes in Richtung Maschinenhaus öffnen, um einen Druckaufbau im Reaktorgebäude zu verhindern und die Strukturen des BE-Lagerbeckens vor unzulässigen Temperaturen zu schützen.

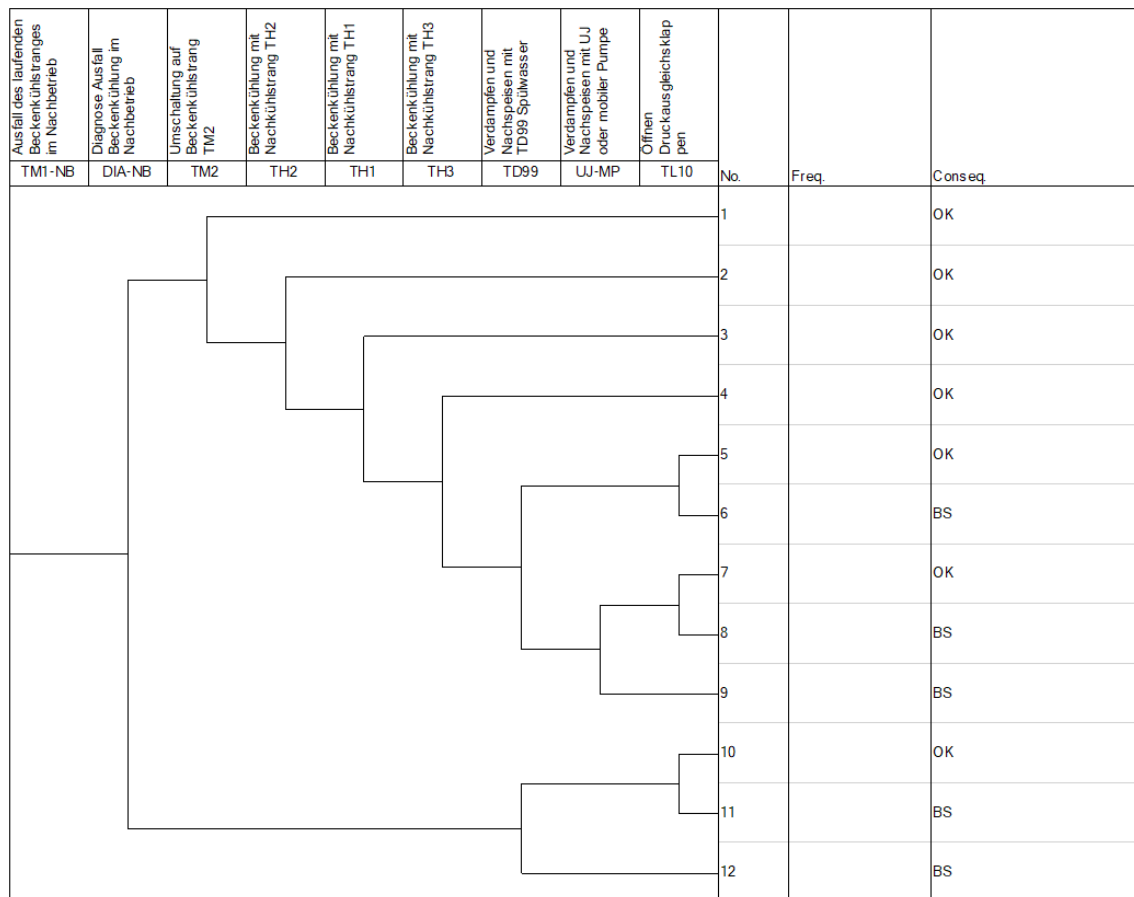


Abb. 8.1 Ereignisablaufdiagramm „Ausfall BE-Lagerbeckenkühlung“ im Nachbetrieb (SWR)

Die Häufigkeit (Punktwert) für Brennstabschadenszustände beim Ereignis „Ausfall BE-Lagerbeckenkühlung“ beträgt im Nachbetrieb

$$H_{BSZ_TM1-NB} = 4,0E-09/a.$$

Der größte Beitrag zu diesem Ergebnis stammt vom Ausfall der übergeordneten Diagnose und vom Ausfall des Spülwassersystems TD99 (Pfad 12 im Ereignisablaufdiagramm).

8.4 Restbetrieb Phase 1

Für die probabilistischen Bewertungen wird davon ausgegangen, dass ein Nachkühlstrang (TH3) nicht mehr verfügbar ist. Das betriebliche Beckenkühlsystem und zwei Nachkühlstränge bleiben verfügbar. Diese Systemkonfiguration entspricht den Anforderungen der RSK-Stellungnahme /RSK 20/. Reparaturen werden nicht berücksichtigt.

Der Ereignisablauf entspricht dem im Nachbetrieb, mit dem Unterschied, dass der Nachkühlstrang TH3 nicht mehr verfügbar ist. Für die Diagnose steht mehr Zeit zur Verfügung, siehe Kapitel 4.

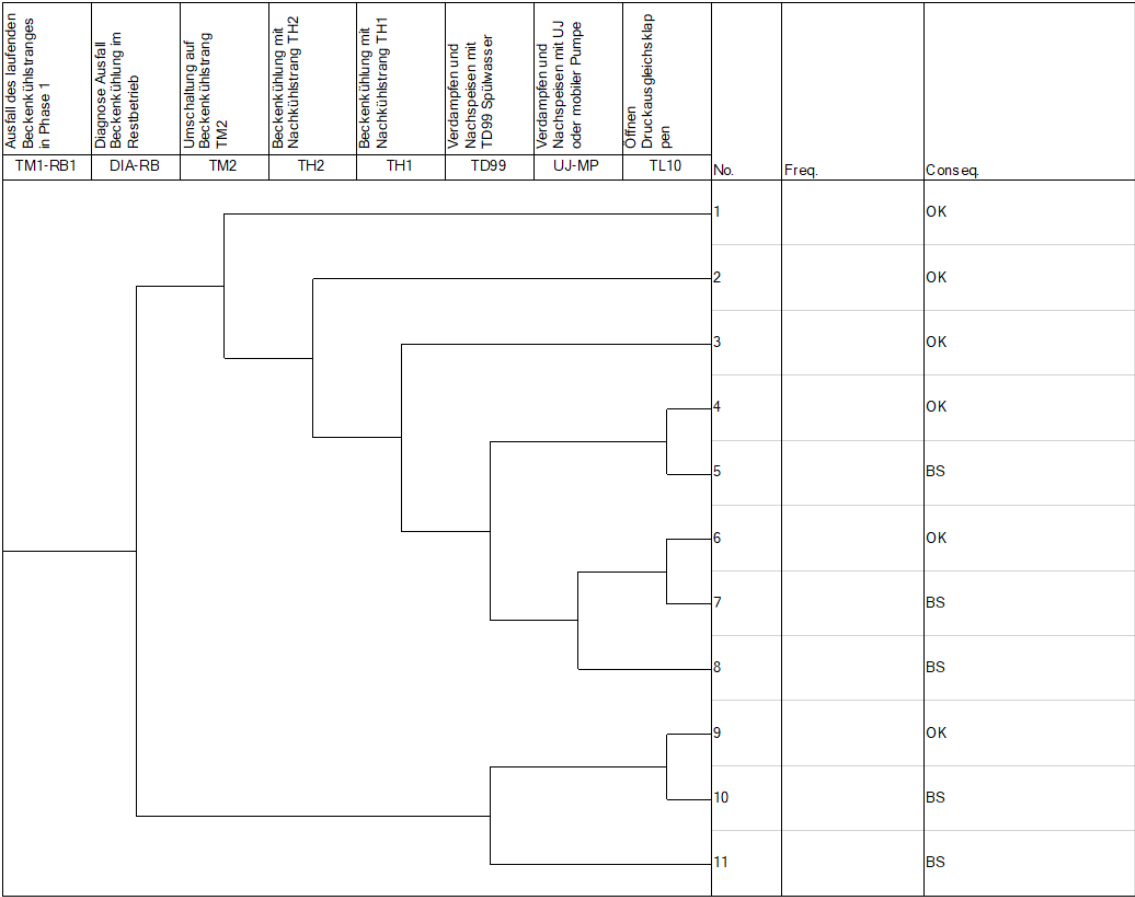


Abb. 8.2 Ereignisablaufdiagramm „Ausfall BE-Lagerbeckenkühlung“ im Restbetrieb Phase 1 (SWR)

Die Häufigkeit (Punktwert) für Brennstabschadenszustände beim Ereignis „Ausfall BE-Lagerbeckenkühlung“ beträgt im Restbetrieb Phase 1

$$H_{BSZ_TM1-RB1} = 8,8E-09/a.$$

Die einzelnen Minimalschnitte liefern nur kleine Beiträge (< 1 %, < 1E-10/a) zu diesem Ergebnis.

8.5 Restbetrieb Phase 2

Für die probabilistischen Bewertungen wird von der im BHB beschriebenen Systemkonfiguration ausgegangen. Die Nachkühlstränge TH1 und TH3 sind nicht mehr verfügbar. Das betriebliche Beckenkühlsystem und der Nachkühlstrang TH2 sind verfügbar. Des Weiteren steht eine Ersatzmaßnahme (BE-Lagerbeckenkühlung mit Hydrosüb) zur Verfügung. Reparaturen werden nicht berücksichtigt.

Der Ereignisablauf entspricht dem im Restbetrieb Phase 1, mit dem Unterschied, dass nun auch der Nachkühlstrang TH1 nicht mehr verfügbar ist. Stattdessen kann mit der mobilen Pumpe (Hydrosüb) der Beckenkühlbetrieb fortgesetzt werden. Für diese Ersatzmaßnahme ist der Betrieb der Beckenkühlpumpe TM2 erforderlich.

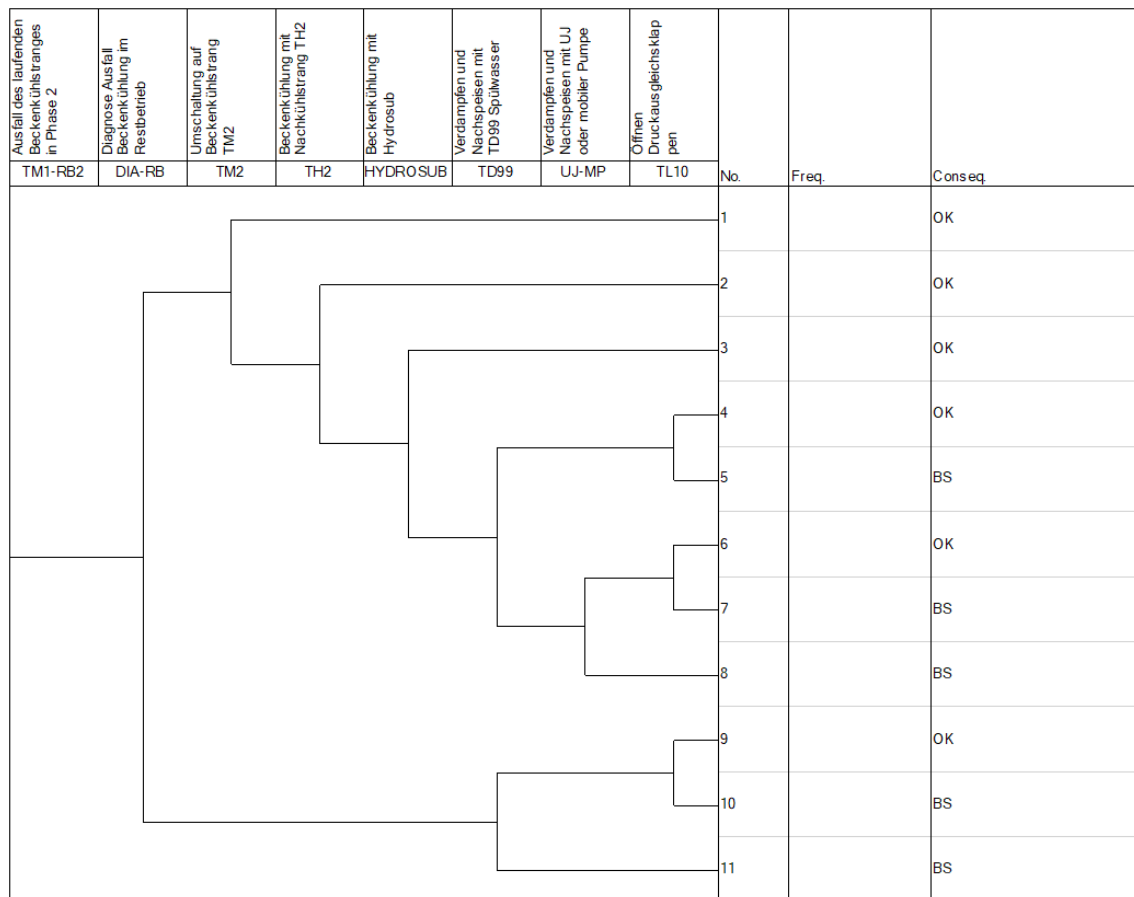


Abb. 8.3 Ereignisablaufdiagramm „Ausfall BE-Lagerbeckenkühlung“ im Restbetrieb Phase 2 (SWR)

Die Häufigkeit (Punktwert) für Brennstabschadenszustände beim Ereignis „Ausfall BE-Lagerbeckenkühlung“ beträgt im Restbetrieb Phase 2

$$H_{BSZ_TM1-RB2} = 1,2E-08/a.$$

Die einzelnen Minimalschnitte liefern nur sehr kleine Beiträge ($< 0,5 \%$, $< 5E-11/a$) zu diesem Ergebnis.

8.6 Ereignisabläufe die ohne Brennelementschäden zur Freisetzung von radioaktiven Stoffen führen können

In der PSA der GRS für den Nachbetrieb einer DWR-Anlage und einer Anlage vom Typ SWR69 /GRS 19/ wurden auch Aktivitätsfreisetzungen aus anderen Quellen (Behälter, Container) betrachtet. Hier soll auch für Anlagen vom Typ SWR72 die Häufigkeit für solche Aktivitätsfreisetzungen ermittelt werden.

Als Grundlage dient der Sicherheitsbericht für die Stilllegung der betrachteten Anlage /RWE 16/, in dem auch solche Aktivitätsfreisetzungen untersucht wurden. Für die radiologisch abdeckenden Ereignisse wurden die in Tab. 8.2 aufgeführten potenziellen Strahlenexpositionen ermittelt.

Tab. 8.2 Strahlenexposition in der Umgebung für radiologisch abdeckende Ereignisse /RWE 16/

Ereignis	Maximale effektive Dosis [mSv]
Anlageninterner Brand	2,3
Leckagen von Behältern mit aktivitätsführenden Medien	0,02
Absturz von Lasten	0,0001
Ereignisse bei Transportvorgängen	0,0027
Brennelementbeschädigung bei der Handhabung	0,002
Erdbeben	5,3
Flugzeugabsturz auf das Maschinenhaus	0,1

Die größten Aktivitätsfreisetzungen und damit die größten potenziellen Strahlungsexpositionen sind zu erwarten bei den Ereignissen

- Erdbeben und
- anlageninterner Brand.

Die potenzielle Strahlenexposition liegt bei diesen Ereignissen deutlich unterhalb der vorgegebenen Begrenzung der Exposition durch Störfälle (50 mSv, § 104 Abs. 1 StrlSchV /SSV 18/). Jedoch ist davon auszugehen, dass die im BHB spezifizierten Genehmigungswerte für die Ableitung deutlich überschritten werden. Für diese beiden Ereignisse soll im Folgenden die Häufigkeit für eine Freisetzung abgeschätzt werden.

8.6.1 Erdbeben

Im Sicherheitsbericht für die Stilllegung der hier betrachteten Anlage wurde davon ausgegangen, dass bei einem Erdbeben nur die Gebäude der Anlage integer bleiben, die gegen das Bemessungserdbeben ausgelegt sind. An allen anderen Gebäuden und an den darin untergebrachten Systemen wurden Schäden postuliert, in deren Folge radioaktive Stoffe in die Umgebung freigesetzt werden. Des Weiteren wurde zur konservativen Ermittlung der Auswirkungen auf die Umgebung eine Freisetzung radioaktiver Stoffe wie im Leistungsbetrieb angenommen. Für die am höchsten exponierte Altersgruppe der $\leq$ Einjährigen ergab sich so eine potenzielle Effektivdosis von maximal 5,3 mSv /RWE 16/.

Das Bemessungserdbeben für die Anlage entspricht einer Intensität von $I_{MSK} = VII$ /KRB 11/. Für die nicht gegen das Bemessungserdbeben ausgelegten Gebäude ist bei dieser Erdbebenintensität von einem Versagen auszugehen. Die Überschreitungshäufigkeit für ein Erdbeben der Intensität $I_{MSK} = VII$ beträgt $3E-06/a$ /KRB 11/. Es wird hier davon ausgegangen, dass es mit dieser Häufigkeit zu den im Sicherheitsbericht /RWE 16/ ermittelten radiologischen Auswirkungen kommt.

8.6.2 Anlageninterner Brand

Im Sicherheitsbericht für die Stilllegung der hier betrachteten Anlage wurde als radiologisch abdeckendes Ereignis für die anlageninternen Brände der Brand eines Containers mit 5,5 Mg brennbaren Mischabfällen in der Gleisdurchfahrt eines Maschinenhauses postuliert. Durch den Brand gelangen radioaktive Aerosole in die Raumluft. Die

Auswirkungen blieben jedoch vorerst aufgrund der vorhandenen Maßnahmen zur Rückhaltung radioaktiver Stoffe weitgehend auf das Innere des Kontrollbereichs beschränkt. Im Zuge der eingeleiteten Maßnahmen zur Brandbekämpfung und ggf. Personenrettung kann es jedoch erforderlich sein, dass die Maschinenhausdachklappen zur Entrauchung des Maschinenhauses geöffnet werden. Aus diesem Grund wird konservativ eine ungefilterte Abgabe der Brandgase über das Maschinenhausdach unterstellt. Für die am höchsten exponierte Altersgruppe der $\leq$ Einjährigen ergab sich so eine potenzielle Effektivdosis von maximal 2,3 mSv. /RWE 16/

Aus der deutschen Betriebserfahrung sind keine Ereignisse bekannt, bei denen es zu einem Brand von offen gelagerten kontaminierten Stoffen (z. B. in einem offenen 20'-Container) kam. Die Eintrittshäufigkeit für ein solches Brandereignis wurde in der PSA der GRS für den Nachbetrieb /GRS 19/ zu $1,8\text{E-}03/\text{a}$ abgeschätzt. Es wird hier davon ausgegangen, dass es mit dieser Häufigkeit zu den im Sicherheitsbericht /RWE 16/ ermittelten radiologischen Auswirkungen kommt.

8.7 Zusammenfassung der Ergebnisse

Ausfall der BE-Lagerbeckenkühlung

In Tab. 8.3 sind die für die SWR-Anlage ermittelten Häufigkeiten für Brennstabschadenszustände für das auslösende Ereignis „Ausfall der BE-Lagerbeckenkühlung“ in den betrachteten Phasen des Nach-/Restbetriebs dargestellt.

Tab. 8.3 Häufigkeiten für Brennstabschadenszustände für das auslösende Ereignis „Ausfall der BE-Lagerbeckenkühlung“

Betriebsphase	Häufigkeit für Brennstabschadenszustände /a				
	5 % - Fraktil	50 % - Fraktil	Punktwert	Erwar- tungswert	95 % - Fraktil
Nachbetrieb	3,6E-12	7,4E-10	4,0E-09	4,5E-09	1,9E-08
Restbetrieb Phase 1	6,9E-12	1,4E-09	8,8E-09	8,4E-09	4,1E-08
Restbetrieb Phase 2	6,2E-12	1,8E-09	1,2E-08	1,3E-08	5,0E-08

Für die betrachtete Anlage des Typs SWR72 ergaben sich sehr geringe Häufigkeiten für Brennstabschadenszustände beim auslösenden Ereignis „Ausfall der BE-Lagerbeckenkühlung“. In allen drei Phasen des Nach-/Restbetriebs liegt diese unter $\text{E-}07/\text{a}$.

Die deutlich geringeren Häufigkeiten für Brennstabschadenszustände im Vergleich zu denen in der DWR-Anlage sind darauf zurückzuführen, dass die SWR-Anlage über ein zweisträngiges betriebliches Beckenkühlsystem verfügt und dass bei einem vollständigen Ausfall der Beckenkühlsysteme das Reaktorgebäude über Druckentlastungsklappen selbsttätig druckentlastet wird.

Aktivitätsfreisetzungen aus anderen Aktivitätsinventaren

In Tab. 8.4 sind die ermittelten Häufigkeiten für Aktivitätsfreisetzungen für die Ereignisse mit den größten potenziellen Strahlungsexpositionen zusammenfassend dargestellt.

Tab. 8.4 Häufigkeiten für Aktivitätsfreisetzungen aus anderen Aktivitätsinventaren

Ereignis	Maximale effektive Dosis	Freisetzungshäufigkeit
Erdbeben	5,3 mSv	3E-06/a
Anlageninterner Brand	2,3 mSv	1,8E-03/a

Brände und Erdbeben können bei Anlagen vom Typ SWR72 zu den größten Aktivitätsfreisetzungen führen. Für die betrachteten radiologisch relevanten Ereignisse sind die potenziellen Strahlenexpositionen deutlich geringer als die vorgegebene Begrenzung der Exposition durch Störfälle (50 mSv, § 104 Abs. 1 StrlSchV /SSV 18/).

In Tab. 8.5 sind zum Vergleich die im Vorhaben „Generische Sicherheitsbewertung von Kernkraftwerken im Nachbetrieb“ /GRS 19/ ermittelten Häufigkeiten für Aktivitätsfreisetzungen für eine Anlage des Typs Vorkonvoi und eine Anlage des Typs SWR69 dargestellt.

Tab. 8.5 Häufigkeiten für Aktivitätsfreisetzungen aus anderen Aktivitätsinventaren

Ereignis	DWR (Vorkonvoi)		SWR69		SWR72	
	Maximale effektive Dosis	Freisetzungshäufigkeit	Maximale effektive Dosis	Freisetzungshäufigkeit	Maximale effektive Dosis	Freisetzungshäufigkeit
Brand	0,28 mSv	5,4E-03/a	2,8 mSv	1,8E-03/a	2,3 mSv	1,8E-03/a
Erdbeben	0,27 mSv	1E-05/a	11,2 mSv	1,6E-06/a	5,3 mSv	3E-06/a

In den drei betrachteten Anlagen würden Brände und Erdbeben zu den größten Freisetzungen führen. Zur größten effektiven Dosis würde es bei einem Erdbeben in der Anlage

des Typs SWR69 kommen, wobei bei diesem Ereignis zusätzlich ein Folgebrand postuliert wurde. Für diesen Ereignisablauf wurde jedoch die geringste Freisetzungshäufigkeit ($1,6\text{E-}06/\text{a}$) ermittelt.

Bei der im Vorhaben „Generische Sicherheitsbewertung von Kernkraftwerken im Nachbetrieb“ /GRS 19/ betrachteten DWR-Anlage (KKG) waren die im Sicherheitsbericht ausgewiesenen maximalen effektiven Dosen deutlich geringer als in den SWR-Anlagen. Hier stellt sich die Frage, ob dies generell für die DWR-Anlagen des Typs Konvoi/Vorkonvoi zutrifft. Zum Vergleich sind daher in der Tab. 8.6 die in den Sicherheitsberichten ausgewiesenen maximalen effektiven Dosen für die anderen DWR-Anlagen des Typs Konvoi/Vorkonvoi dargestellt.

Tab. 8.6 Potenzielle Strahlenexpositionen in der Umgebung für radiologisch repräsentative Ereignisse in DWR-Anlagen des Typs Konvoi/Vorkonvoi

Anlage	radiologisch repräsentative Ereignisse mit der höchsten potenziellen Dosis	Effektive Dosis in mSv	Quelle
KKG	Brand Filtermobil	0,28	/EON 16/
	Erdbeben mit Versagen des Abwasser- verdampfers	0,27	
KKP-2	Erdbeben mit Folgebrand	14,2	/EBW 18/
	Brand eines 20'-Containers	11,5	
KWG	Absturz eines 20'-Containers	8,1	/PRE 21/
	Absturz eines Dampferzeugers	2,5	
KBR	Absturz eines 20'-Containers	3,4	/PRE 20/
	Absturz eines Dampferzeugers	2,6	
KKI-2	Absturz eines 20'-Containers	3,4	/PRE 21a/
	Absturz eines Dampferzeugers	2,5	
KKE	Absturz eines Dampferzeugers	7,8	/KLE 22/
	Brand eines 20'-Containers	2,3	
GKN-2	Erdbeben mit Folgebrand	12,6	/EBW 18a/
	Brand eines 20'-Containers	7,9	

Die radiologisch repräsentativen Ereignisse mit den höchsten potenziellen Dosen sind von Anlage zu Anlage unterschiedlich. So würde beispielsweise der Brand eines 20'-Containers mit radioaktiven Mischabfällen in den Anlagen KKP-2 und GKN-2 zu einer relativ hohen Dosis führen, während dieses Ereignis in anderen Anlagen ausgeschlossen wurde. Auffällig ist weiterhin, dass in der Anlage KKG die höchsten potenziellen

Dosen um ca. eine Größenordnung geringer wären als in den anderen Anlagen. Die Ursachen für die Unterschiede hinsichtlich der betrachteten Ereignisse und der ermittelten potenziellen Dosen sind der GRS nicht bekannt und könnten Gegenstand weiterer Untersuchungen sein.

9 Bewertung der sicherheitstechnischen Bedeutung

Die im Restbetrieb betrachteten Ereignisabläufe wurden hinsichtlich ihrer sicherheitstechnischen Bedeutung bewertet, um zu prüfen, ob ggf. ein Verbesserungspotential vorhanden ist. Dazu dienten die berechneten Häufigkeiten für Brennstabschadenszustände.

DWR-Anlage

In Tab. 9.1 sind die für die DWR-Anlage ermittelten Gesamthäufigkeiten für Brennstabschadenszustände im Nachbetrieb und in den Restbetriebsphasen 1 und 2 zusammenfassend dargestellt.

Tab. 9.1 Gesamthäufigkeit für Brennstabschadenszustände (Erwartungswerte) in den verschiedenen Phasen (DWR)

Nachbetrieb /GRS 19/	Restbetrieb Phase 1	Restbetrieb Phase 2
9,8E-07/a	4,7E-07/a	8,4E-07/a

Die berechnete Gesamthäufigkeit für Brennstabschadenszustände ist in der Restbetriebsphase 1 geringer, da sich durch die längere Karenzzeit die Ausfallwahrscheinlichkeit für die Diagnose verringert hat. In der Restbetriebsphase 2 wird die Gesamthäufigkeit für Brennstabschadenszustände im Wesentlichen durch die Stilllegung eines Beckenkühlstranges beeinflusst. Das auslösende Ereignis mit dem höchsten Beitrag zur Gesamthäufigkeit für Brennstabschadenszustände ist in allen Phasen der „Ausfall der BE-Lagerbeckenkühlung“.

SWR72

In Tab. 9.2 sind die für die DWR-Anlage ermittelten Gesamthäufigkeiten für Brennstabschadenszustände im Nachbetrieb und in den Restbetriebsphasen 1 und 2 dargestellt.

Tab. 9.2 Häufigkeit für Brennstabschadenszustände (Erwartungswerte) beim auslösenden Ereignis „Ausfall der BE-Lagerbeckenkühlung“ in den verschiedenen Phasen (SWR)

Nachbetrieb	Restbetrieb Phase 1	Restbetrieb Phase 2
4,5E-09/a	8,4E-09/a	1,3E-08/a

Für die betrachtete SWR-Anlage des Typs SWR72 ergaben sich sehr geringe Häufigkeiten für Brennstabschadenszustände beim auslösenden Ereignis „Ausfall der BE-Lagerbeckenkühlung“. In allen drei Phasen des Nach-/Restbetriebs liegt diese Häufigkeit unter $1,0\text{E-}07/\text{a}$. Die geringfügige Erhöhung der Brennstabschadenshäufigkeit über den Zeitverlauf ist auf die Außerbetriebnahme von Komponenten zur BE-Lagerbeckenkühlung zurückzuführen.

Fazit

Zusammenfassend lässt sich für die betrachteten Anlagen feststellen,

- dass die Häufigkeit für Brennstabschadenszustände in allen Phasen $< \text{E-}06/\text{a}$ beträgt ($\text{E-}06/\text{a}$: in /GRS 12/ vorgeschlagener Zielwert für die Kernschadenshäufigkeit inklusive Brennstabschadenshäufigkeit) und
- dass die in der RSK-Stellungnahme /RSK 20/ getroffenen Festlegungen zur Redundanz im Restbetrieb nicht zu einer signifikanten Erhöhung der Brennstabschadenshäufigkeiten führen ($\Delta < \text{E-}07/\text{a}$: in /GRS 12/ vorgeschlagener Grenzwert für die Änderung der Kernschadenshäufigkeit bei geplanten Anlagenänderungen).

Aus den ermittelten Brennstabschadenshäufigkeiten ergibt sich kein Hinweis auf Schwachstellen. Die in der RSK-Stellungnahme /RSK 20/ festgelegten Redundanzanforderungen an die Sicherheitssysteme erscheinen ausreichend. Derzeit ist kein Verbesserungspotential und keine Notwendigkeit für Maßnahmen zur Verringerung der Brennstabschadenshäufigkeiten abzuleiten.

10 Zusammenfassung

In diesem Vorhaben wurden Phasen des Restbetriebes betrachtet, in denen noch eine aktive Kühlung der Brennelemente erforderlich ist, um Temperaturgrenzwerte im Lagerbecken einzuhalten. Grundlage für die Definition der Phasen bildet die RSK-Stellungnahme „Anforderungen an die Kühlung der Brennelemente im Lagerbecken im Restbetrieb“ /RSK 20/. Entsprechend dieser RSK-Stellungnahme sind, in Abhängigkeit von der vorhandenen Karenzzeit bis zum Erreichen bestimmter Kühlmitteltemperaturen, die dauerhafte Außerbetriebnahme von Komponenten sowie Ersatzmaßnahmen zur BE-Lagerbeckenkühlung zulässig. Es wurde untersucht, welchen Einfluss die Stilllegung von Komponenten und die Ersatzmaßnahmen auf die Häufigkeit von Brennstabschadenszuständen für Anlagen vom Typ Konvoi/Vorkonvoi und SWR72 haben.

DWR-Anlagen

Die PSA für den Nachbetrieb von DWR-Anlagen wurde um die in der RSK-Stellungnahme /RSK 20/ festgelegten Phasen weiterentwickelt. Es wurde das gleiche Ereignisspektrum und zusätzlich der Flugzeugabsturz auf ein Nebenkühlwassergebäude sowie das Hochwasser betrachtet. Die probabilistischen Bewertungen beinhalten auch die in der RSK-Stellungnahme /RSK 20/ beschriebenen Ersatzmaßnahmen (Reparatur, mobile Beckenkühlpumpe).

Für die **Restbetriebsphase 1** wurde ein Erwartungswert von **4,7E-07/a** für die Brennstabschadenshäufigkeit ermittelt. Das Ergebnis wird zu ca. 95 % durch den Beitrag des auslösenden Ereignisses „Ausfall der BE-Lagerbeckenkühlung“ bestimmt. Den größten Einfluss auf das Ergebnis haben die auslösenden Ereignisse „Ausfall der BE-Lagerbeckenkühlung (T9)“ und „Notstromfall (T1)“ sowie die Handmaßnahmen zur Wiederinbetriebnahme der ausgefallenen BE-Lagerbeckenkühlung und zur Sicherheitsbehälterdruckentlastung.

In der **Restbetriebsphase 2** beträgt der Erwartungswert für die Brennstabschadenshäufigkeit **8,4E-07/a**. Das Ergebnis wird zu ca. 90 % durch den Beitrag der auslösenden Ereignisse „Ausfall der BE-Lagerbeckenkühlung“ und „Notstromfall“ bestimmt. Den größten Einfluss haben hier die auslösenden Ereignisse „Ausfall BE-Lagerbeckenkühlung (T9)“ und „Notstromfall (T1)“ sowie Komponenten zur BE-Lagerbeckenkühlung und zur Sicherheitsbehälterdruckentlastung.

Für die Nachbetriebsphase unmittelbar nach Abschaltung der Anlage ergab sich ein Erwartungswert für eine Brennstabschadenshäufigkeit von $9,8\text{E-}07/\text{a}$ /GRS 19/. Die Gesamtergebnisse liegen in den drei betrachteten Phasen (Nachbetrieb, Restbetrieb Phasen 1 und 2) in der gleichen Größenordnung ($\text{E-}07/\text{a} < \text{H} < \text{E-}06/\text{a}$). Die Ergebnisse werden dadurch bestimmt, dass sich über den Zeitverlauf die Anzahl der Redundanzen zur BE-Lagerbeckenkühlung verringert und andererseits mehr Zeit für die Personalhandlungen zur Verfügung steht.

SWR-Anlagen

Für Anlagen vom Typ SWR72 lagen bisher keine probabilistischen Analysen zum Nachbetrieb/Restbetrieb vor. Die Betrachtung eines umfangreichen Spektrums an auslösenden Ereignissen war daher in diesem Vorhaben nicht möglich. Für diesen Anlagentyp wurde exemplarisch der Ereignisablauf „Ausfall der Brennelement-Lagerbeckenkühlung“ für die drei Phasen Nachbetrieb, Restbetrieb Phasen 1 und 2 probabilistisch bewertet.

Für die betrachtete SWR-Anlage ergaben sich sehr geringe Häufigkeiten für Brennstabschadenszustände beim auslösenden Ereignis „**Ausfall der BE-Lagerbeckenkühlung**“. In allen drei Phasen des Nach-/Restbetriebs liegt diese unter **E-07/a**. Die deutlich geringeren Häufigkeiten für Brennstabschadenszustände im Vergleich zu denen in der DWR-Anlage sind darauf zurückzuführen, dass die SWR-Anlage über ein zweisträngiges betriebliches Beckenkühlsystem verfügt und dass bei einem vollständigen Ausfall der Beckenkühlsysteme das Reaktorgebäude über Druckentlastungsklappen selbsttätig druckentlastet wird.

Aktivitätsfreisetzungen aus anderen Aktivitätsinventaren

Bei den Anlagen vom Typ SWR72 sind die größten Aktivitätsfreisetzungen und damit die größten potenziellen Strahlungsexpositionen bei den Ereignissen Erdbeben und anlageninterner Brand zu erwarten. Für das **Erdbeben** wurde eine Freisetzungshäufigkeit von **3E-06/a** und für den **anlageninternen Brand** von **1,8E-03/a** berechnet. Die potenziellen Strahlenexpositionen sind jedoch deutlich geringer als die vorgegebene Begrenzung der Exposition durch Störfälle (50 mSv, § 104 Abs. 1 StrlSchV /SSV 18/). Die ermittelten Freisetzungshäufigkeiten liegen in der gleichen Größenordnung wie die in der PSA für den Nachbetrieb /GRS 19/ ermittelten Freisetzungshäufigkeiten für eine Vorkonvoi-Anlage und eine Anlage vom Typ SWR69.

Ein Vergleich der radiologisch repräsentativen Ereignisse mit den höchsten potenziellen Dosen zeigt, dass diese von Anlage zu Anlage unterschiedlich sind. So würde beispielsweise der Brand eines 20'-Containers mit radioaktiven Mischabfällen in den Anlagen KKP-2 und GKN-2 zu einer relativ hohen Dosis führen, während dieses Ereignis in anderen Anlagen ausgeschlossen wurde. Auffällig erscheint auch, dass in der Anlage KKG die höchsten potenziellen Dosen um ca. eine Größenordnung geringer sind als in den anderen Anlagen. Die Ursachen für diese Unterschiede sind der GRS nicht bekannt und könnten Gegenstand weiterer Untersuchungen sein.

Sicherheitstechnische Bedeutung

Hinsichtlich der sicherheitstechnischen Bedeutung von Ereignisabläufen im Restbetrieb war zu untersuchen, ob sich aus den Ergebnissen der probabilistischen Analysen ein Verbesserungspotential ableiten lässt. Für die betrachteten Anlagen wurden für den Restbetrieb Brennstabschadenshäufigkeiten von $< E-06/a$ berechnet. Die in der RSK-Stellungnahme getroffenen Festlegungen zur Redundanz im Restbetrieb führen nicht zu einer signifikanten Erhöhung der Brennstabschadenshäufigkeiten. Daher ist derzeit kein Verbesserungspotential abzuleiten.

Literaturverzeichnis

- /BAN 05/ Bundesanzeiger 207a, Bekanntmachung des Leitfadens zur Durchführung der Sicherheitsüberprüfung gemäß §19a des Atomgesetzes – Leitfaden Probabilistische Sicherheitsanalyse – für Kernkraftwerke in der Bundesrepublik Deutschland, BAnz-Nr. 207a, 03.11.2005
- /BMI 76/ Bekanntmachung des BMI, Richtlinie für den Schutz von Kernkraftwerken gegen Druckwellen aus chemischen Reaktionen durch Auslegung der Kernkraftwerke hinsichtlich ihrer Festigkeit und induzierten Schwingungen sowie durch Sicherheitsabstände, BAnz Nr. 179, September 1976
- /EBW 09/ EnBW Kernkraft GmbH, Kernkraftwerk Neckarwestheim Kernkraft GmbH: SÜ – GKN II, Probabilistische Sicherheitsanalyse, Externe Ereignisse für den Leistungsbetrieb, Dezember 2009
- /EBW 18/ EnBW Kernkraft GmbH, Stilllegung und Abbau von Anlagenteilen des Kernkraftwerks Philippsburg Block 2 (KKP 2), Sicherheitsbericht, Stand Januar 2018
- /EBW 18a/ EnBW Kernkraft GmbH, Stilllegung und Abbau von Anlagenteilen des Kernkraftwerks Neckarwestheim Block II (GKN II), Sicherheitsbericht, Stand Mai 2018
- /EON 16/ EON Kernkraft, Kernkraftwerk Grafenrheinfeld, Stilllegung und Abbau, Sicherheitsbericht, Mai 2016
- /FAK 05/ Facharbeitskreis Probabilistische Sicherheitsanalyse für Kernkraftwerke, Methoden zur probabilistischen Sicherheitsanalyse für Kernkraftwerke, BfS-SCHR-37/05, Oktober 2005
- /FAK 05a/ Facharbeitskreis Probabilistische Sicherheitsanalyse für Kernkraftwerke, Daten zur probabilistischen Sicherheitsanalyse für Kernkraftwerke, BfS-SCHR-38/05, Oktober 2005

- /FAK 15/ Facharbeitskreis Probabilistische Sicherheitsanalyse für Kernkraftwerke, Methoden und Daten zur probabilistischen Sicherheitsanalyse für Kernkraftwerke, Stand: Mai 2015, BfS-SCHR-61/16, Salzgitter, September 2016

- /GRS 03/ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Sicherheits-technische Bedeutung von Zuständen bei Nicht-Leistungsbetrieb eines DWR, GRS-A-3114, Mai 2003

- /GRS 06/ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Methodenentwicklung zur Bewertung von auslösenden Ereignissen bei Nichtleistungsbetrieb für SWR der Baulinie 69, GRS-A-3328, Dezember 2006

- /GRS 12/ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Vorschlag für eine bundeseinheitliche Anwendung von IRIDM-Verfahren bei sicherheitstechnischer Entscheidungsfindung, GRS-A-3666, September 2012

- /GRS 14/ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Fortschrittliche methodische Ansätze für die PSA der Stufe 2, GRS-A-3743, 2014

- /GRS 19/ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Generische Sicherheitsbewertung von Kernkraftwerken im Nachbetrieb
GRS – 541, Juli 2019

- /GRS 20/ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Probabilistische Bewertungen für den Ausfall der Probabilistische Bewertungen für den Ausfall der Lagerbeckenkühlung in verschiedenen Phasen des Nachbetriebs in verschiedenen Phasen des Nachbetriebs, Technische Notiz, 2020

- /IAEA 16/ International Atomic Energy Agency, Attributes of Full Scope Level 1 Probabilistic Safety Assessment (PSA) for Applications in Nuclear Power Plants, IAEA-TECDOC-1804, October 2016

- /IAEA 24/ International Atomic Energy Agency, Development and Application of Level 1 Probabilistic Safety Assessment for Nuclear Power Plants, Specific Safety Guide SSG-3 (Rev. 1), Vienna 2024

- /KKG 13/ Kernkraftwerk Grafenrheinfeld, SÜ 2008, Probabilistische Sicherheitsanalyse, Revision B, Mai 2013
- /KLE 22/ Kernkraftwerke Lippe-Ems GmbH, Stilllegung und Abbau des Kernkraftwerkes Emsland (KKE), Sicherheitsbericht, März 2022
- /KRB 11/ KRB II Gundremmingen, EU-Sicherheitsüberprüfung, Fortschrittsbericht zum Stresstest europäischer Kernkraftwerke unter Berücksichtigung der Ereignisse in Fukushima-1 (Japan), Stand 09.08.2011
- /PRE 20/ Preussen Elektra, Kernkraftwerk Brokdorf, Stilllegung und Abbau, Sicherheitsbericht, Mai 2020
- /PRE 21/ Preussen Elektra, Kernkraftwerk Grohnde, Stilllegung und Abbau, Sicherheitsbericht, März 2021
- /PRE 21a/ Preussen Elektra, Kernkraftwerk Isar 2, Stilllegung und Abbau, Sicherheitsbericht, August 2021
- /RSK 19/ Reaktorsicherheitskommission, Anforderungen bei einer passiven Kühlung der Brennelemente im Lagerbecken, RSK-Stellungnahme 509. Sitzung der Reaktor-Sicherheitskommission (RSK) am 27.03.2019
- /RSK 20/ Reaktorsicherheitskommission, Anforderungen an die Kühlung der Brennelemente im Lagerbecken im Restbetrieb, RSK-Stellungnahme 518. Sitzung der Reaktor-Sicherheitskommission (RSK) am 21.10.2020
- /RSK 23/ Reaktorsicherheitskommission, Anforderungen an die Kühlung der Brennelemente im Lagerbecken im Restbetrieb (Revidierte Fassung vom 13.12.2023), RSK-Stellungnahme 539. Sitzung der Reaktor-Sicherheitskommission (RSK) am 13.12.2023
- /RSK LL/ Reaktor-Sicherheitskommission, RSK-Leitlinien für Druckwasserreaktoren, Fassung 01/97
- /RWE 16/ RWE Power AG, Kernkraftwerk Gundremmingen GmbH, Abbau des Kernkraftwerks Gundremmingen, Sicherheitsbericht, 23.09.2016

- /SIA 15/ Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke, 22. November 2012, Neufassung vom 3. März 2015
- /SLF 21/ Leitfaden zur Stilllegung, zum sicheren Einschluss und zum Abbau von Anlagen oder Anlagenteilen nach § 7 des Atomgesetzes vom 16. September 2021, BAnz AT 23.11.2021 B2
- /SSA 09/ Areva, Sicherheitsstatusanalyse für das Kernkraftwerk Neckarwestheim, Block II, Dezember 2009
- /SSV 18/ Verordnung zum Schutz vor der schädlichen Wirkung ionisierender Strahlung (Strahlenschutzverordnung – StrlSchV), Ausfertigungsdatum 29.11.2018
- /SWA 83/ Swain, A. D.; Guttman, H. E., Handbook of Human Reliability Analysis with Emphasis on Nuclear Power Plant Applications NUREG/CR-1278, U.S. Regulatory Commission, August 1983
- /TÜV 14/ TÜV SÜD Industrie Service GmbH, Kernkraftwerk Isar 2, Prüfbericht zur Sicherheitsüberprüfung 2009, Teil 2: Probabilistische Sicherheitsanalyse (PSA), August 2014
- /VGB 13/ VGB Powertech, Erfahrungen bei der Umsetzung der RSK-Empfehlung zur Robustheit der deutschen Kernkraftwerke, 463. RSK-Sitzung am 11.12.2013, Bericht der Betreiber

Abkürzungsverzeichnis

ANS	American Nuclear Society
BE	Brennelement
BSZ	Brennstabschadenzustand
BfS	Bundesamt für Strahlenschutz
BHB	Betriebshandbuch
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit
BMUV	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft
DWR	Druckwasserreaktor
EPR	European Pressurized Water Reactor, Evolutionary Pressurized Water Reactor
FAK	Lagerbecken-Kühlsystem
GHC	Deionatsystem
GKN-2	Kernkraftwerk Neckarwestheim, Block 2
IAEA	International Atomic Energy Agency
IRSN	Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire
KAA	Gesichertes Zwischenkühlsystem
KBR	Kernkraftwerk Brokdorf
KKE	Kernkraftwerk Emsland
KKG	Kernkraftwerk Grafenrheinfeld
KKI-2	Kernkraftwerk Isar, Block 2
KKP-2	Kernkraftwerk Philippsburg, Block 2
KKU	Kernkraftwerk Unterweser
KKW	Kernkraftwerk
KMA	Konventionelle Meldeanlage
KWG	Kernkraftwerk Grohnde
KWW	Kernkraftwerk Würgassen
PEC	Gesichertes Nebenkühlwassersystem
PSA	Probabilistische Sicherheitsanalyse
PSAM	International Conference on Probabilistic Safety Assessment and Management
RSK	Reaktorsicherheitskommission
SAG	Stilllegungs- und Abbaugenehmigung
SWR	Siedewasserreaktor
TH	Nachkühlsystem
TM	Beckenkühlsystem (SWR72)

Tabellenverzeichnis

Tab. 3.1	Phasen des Nachbetriebs/Restbetriebs	13
Tab. 3.2	Mindestsystemkonfiguration in Phase 1	13
Tab. 3.3	Mindestsystemkonfiguration in Phase 2	14
Tab. 4.1	Zeitlicher Ablauf bei Ausfall der BE-Lagerbeckenkühlung (DWR)	15
Tab. 4.2	Zeitlicher Ablauf bei Ausfall der BE-Lagerbeckenkühlung (SWR)	16
Tab. 5.1	Ausfälle von BE-Lagerbeckenpumpen und Reparaturzeiten	19
Tab. 7.1	Häufigkeiten für Brennstabschadenzustände für die betrachteten auslösenden Ereignisse	24
Tab. 7.2	Häufigkeiten für Treffer durch Flugzeugabstürze	35
Tab. 7.3	Fraktile und Erwartungswerte der Häufigkeiten für Brennstabschadenzustände für die betrachteten auslösenden Ereignisse in der Restbetriebsphase 1	56
Tab. 7.4	Fraktile und Erwartungswerte der Häufigkeiten für Brennstabschadenzustände für die betrachteten auslösenden Ereignisse in der Restbetriebsphase 2	58
Tab. 7.5	Vergleich der Phasen	60
Tab. 8.1	Eintrittshäufigkeit für einen Ausfall des laufenden Beckenkühlstranges	61
Tab. 8.2	Strahlenexposition in der Umgebung für radiologisch abdeckende Ereignisse /RWE 16/	67
Tab. 8.3	Häufigkeiten für Brennstabschadenzustände für das auslösende Ereignis „Ausfall der BE-Lagerbeckenkühlung“	69
Tab. 8.4	Häufigkeiten für Aktivitätsfreisetzungen aus anderen Aktivitätsinventaren	70
Tab. 8.5	Häufigkeiten für Aktivitätsfreisetzungen aus anderen Aktivitätsinventaren	70
Tab. 8.6	Potenzielle Strahlenexpositionen in der Umgebung für radiologisch repräsentative Ereignisse in DWR-Anlagen des Typs Konvoi/Vorkonvoi	71
Tab. 9.1	Gesamthäufigkeit für Brennstabschadenzustände (Erwartungswerte) in den verschiedenen Phasen (DWR)	73
Tab. 9.2	Häufigkeit für Brennstabschadenzustände (Erwartungswerte) beim auslösenden Ereignis „Ausfall der BE-Lagerbeckenkühlung“ in den verschiedenen Phasen (SWR)	74

Abbildungsverzeichnis

Abb. 7.1	Ereignisablaufdiagramm „Notstromfall im Restbetrieb Phase 1“	26
Abb. 7.2	Ereignisablaufdiagramm „Ausfall der BE-Lagerbeckenkühlung im Restbetrieb Phase 1“	28
Abb. 7.3	Ereignisablaufdiagramm „Leck an der Lagerbeckenauskleidung im Restbetrieb Phase 1“	30
Abb. 7.4	Ereignisablaufdiagramm „Absperrbares Leck an angeschlossenen Rohrleitungen des Lagerbeckenkühlsystems im Restbetrieb Phase 1“	32
Abb. 7.5	Ereignisablaufdiagramm „Nichtabsperribares Leck an angeschlossenen Rohrleitungen im Restbetrieb Phase 1“	34
Abb. 7.6	Ereignisablaufdiagramm „Flugzeugabsturz auf das Schaltanlagegebäude im Restbetrieb Phase 1“	37
Abb. 7.7	Ereignisablaufdiagramm „Flugzeugabsturz auf das Nebenkühlwasserpumpenbauwerk im Restbetrieb Phase 1“	38
Abb. 7.8	Ereignisablaufdiagramm „Explosionsdruckwelle im Restbetrieb Phase 1“	41
Abb. 7.9	Ereignisablaufdiagramm „Hochwasser im Restbetrieb Phase 1“	43
Abb. 7.10	Ereignisablaufdiagramm „Notstromfall im Restbetrieb Phase 2“	45
Abb. 7.11	Ereignisablaufdiagramm „Ausfall der BE-Lagerbeckenkühlung im Restbetrieb Phase 2“	47
Abb. 7.12	Ereignisablaufdiagramm „Leck an der Lagerbeckenauskleidung im Restbetrieb Phase 2“	48
Abb. 7.13	Ereignisablaufdiagramm „Absperrbares Leck an angeschlossenen Rohrleitungen des Lagerbeckenkühlsystems im Restbetrieb Phase 2“	49
Abb. 7.14	Ereignisablaufdiagramm „Nicht absperribares Leck an angeschlossenen Rohrleitungen des Lagerbeckenkühlsystems im Restbetrieb Phase 2“	50
Abb. 7.15	Ereignisablaufdiagramm „Flugzeugabsturz auf das Schaltanlagegebäude im Restbetrieb Phase 2“	51
Abb. 7.16	Ereignisablaufdiagramm „Flugzeugabsturz auf das Nebenkühlwasserpumpenbauwerk im Restbetrieb Phase 2“	52

Abb. 7.17	Ereignisablaufdiagramm „Explosionsdruckwelle im Restbetrieb Phase 2“	53
Abb. 7.18	Ereignisablaufdiagramm „Hochwasser im Restbetrieb Phase 2“	54
Abb. 7.19	Fussel-Vesely-Importanz der Basisereignisse in der Restbetriebsphase 1	57
Abb. 7.20	Fussel-Vesely-Importanz der Basisereignisse in der Restbetriebsphase 2	59
Abb. 8.1	Ereignisablaufdiagramm „Ausfall BE-Lagerbeckenkühlung“ im Nachbetrieb (SWR)	64
Abb. 8.2	Ereignisablaufdiagramm „Ausfall BE-Lagerbeckenkühlung“ im Restbetrieb Phase 1 (SWR)	65
Abb. 8.3	Ereignisablaufdiagramm „Ausfall BE-Lagerbeckenkühlung“ im Restbetrieb Phase 2 (SWR)	66

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

Schwertnergasse 1
50667 Köln

Telefon +49 221 2068-0

Telefax +49 221 2068-888

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 978-3-911727-03-7