
RSK-Stellungnahme
(446. Sitzung am 05.04.2012)

Ausfall der Primären Wärmesenke
(veröffentlicht im Bundesanzeiger: BAnz AT 03.08.2012 B5)

Inhalt

1	Anlass und Beratungsablauf	2
2	Begriffe und Betrachtungsumfang	2
3	Nationale und internationale Betriebserfahrungen	4
4	Potenzielle Ursachen die zum Ausfall der Primären Wärmesenke führen können	5
5	Die Primäre Wärmesenke in deutschen Anlagen.....	9
6	Potenzielle Folgen eines Ausfalls der Primären Wärmesenke	10
7	EU–Stresstest: Status und Überlegungen in anderen Ländern	12
8	Bewertung.....	14
9	Empfehlungen.....	16
9.1	Maßnahmen zur Überprüfung und ggf. Verbesserung der Zuverlässigkeit der Primären Wärmesenke im Hinblick auf Blockaden des Kühlwasserzulaufs.....	16
9.2	Maßnahmen zur Stärkung der Zuverlässigkeit der Primären Wärmesenke im Hinblick auf den Eintritt von seltenen Einwirkungen von Außen	18
9.3	Maßnahmen zur Beherrschung des Ausfalls der Primären Wärmesenke	18
10	Literatur.....	20

1 Anlass und Beratungsablauf

Basierend auf einer Aufforderung durch den Deutschen Bundestag hat das Bundesumweltministerium (BMU) die Reaktor-Sicherheitskommission (RSK) in ihrer 433. Sitzung am 17.03.2011 gebeten aufgrund der Ereignisse im japanischen Kernkraftwerk Fukushima I zunächst die deutschen Leistungsreaktoren einer Sicherheitsüberprüfung zu unterziehen. Die zugehörige RSK-Stellungnahme „Anlagenspezifische Sicherheitsüberprüfung (RSK-SÜ) deutscher Kernkraftwerke unter Berücksichtigung der Ereignisse in Fukushima-I (Japan)“ /1/ vom 16.05.2011 wurde auf der 437. RSK-Sitzung vom 11.-14.05.2011 verabschiedet und ist auf der Internetseite der RSK veröffentlicht (<http://www.rskonline.de>).

In weiterer Umsetzung der Bitte des BMU hat die RSK am 09.06.2011 in ihrer 438. Sitzung, Beratungsthemen identifiziert, die im Nachgang zur Sicherheitsüberprüfung der deutschen Kernkraftwerke vertieft beraten werden sollen. In diesem Zusammenhang wurde beschlossen, die Robustheit der bestehenden Auslegung der Nebenkühlwasserversorgung unter Berücksichtigung aktueller Betriebserfahrung zu betrachten. In ihrer 439. Sitzung vom 07.07.2011 hat die RSK ein diesbezügliches Beratungskonzept verabschiedet und den RSK-Ausschuss REAKTORBETRIEB (RB) mit der Bearbeitung dieser Fragestellung beauftragt. Zu diesem Zweck hat der RSK-Ausschuss RB in seiner 204. Sitzung vom 27.07.2011 die Ad-hoc-Arbeitsgruppe AUSFALL NEBENKÜHLWASSER (AG NKW) ins Leben gerufen.

In ihrer 1. Sitzung am 09.09.2011 hat sich die AG NKW zunächst von der GRS über die vorläufigen Ergebnisse des hierzu in Auftrag gegebenen GRS-Berichtes „Beeinträchtigung des Nebenkühlwassers durch Blockierung des Kühlwassereinlaufbauwerkes“ in Kenntnis setzen lassen, der einen Überblick über die aktuelle nationale und internationale Betriebserfahrung in diesem Themenfeld vermittelt. Hieraus wurden relevante Szenarien und mögliche, gemeinsame Ereignisursachen für die weitere Beratung abgeleitet. Im Verlauf der 2. Sitzung am 02.12.2011 wurde die grundsätzliche Struktur einer Stellungnahme abgestimmt sowie die internationalen Entwicklungen im Hinblick auf künftige Anforderungen an die Auslegung der Nebenkühlwasserversorgung ermittelt. Die 3. Sitzung der Ad-hoc-AG NKW am 07.02.2012 diente der Abstimmung eines ersten Stellungnahme-Entwurfes innerhalb der Arbeitsgruppe. Zwischenzeitlich hat die RSK in ihrer 444. Sitzung vom 12.01.2012 entschieden, dass die Beratungsergebnisse der Ad-hoc-AG NKW unmittelbar in der RSK vorgestellt und beraten werden. Dementsprechend wurde der Entwurf der Stellungnahme auf der 445. RSK-Sitzung am 29.02./01.03.2012 beraten und nachfolgend auf der 446. RSK-Sitzung am 05.04.2012 verabschiedet. Die vorliegende Stellungnahme der RSK stellt die Ergebnisse dieser Überprüfung durch die RSK dar.

2 Begriffe und Betrachtungsumfang

Die in einem Kernkraftwerk anfallende Verlustwärme wird über technische Einrichtungen an die Umgebung abgegeben. Die Abfuhr der Verlustwärme aus dem thermodynamischen Prozess sowie die Wärme aus der Kühlung der Komponenten erfolgt in der Regel entweder an Wasser (in einen Fluss oder das Meer, den sog. Vorfluter) oder über Nasskühltürme oder Zellenkühler an die Umgebung. Die Wärmeabgabe an Wasser erfolgt grundsätzlich über Wärmetauscher. Für die Wirksamkeit des einphasigen Wärmeübergangs ist ein erheblicher Wasserdurchfluss erforderlich, so dass für die Wärmeabgabe die Entnahme großer Wassermengen aus dem Fluss erforderlich ist. Bei einer Wärmeabgabe über Verdunstung in Kühltürmen ist eine vergleichsweise geringe Wasserzufuhr erforderlich, so dass zumindest über einige Stunden eine Wärmeabfuhr mit systemeigenen Vorräten möglich ist.

Aus diesen Betrachtungen wird deutlich, dass zur Wärmeabgabe an die Umgebung - die Wärmesenke des Kraftwerks - technische Einrichtungen und Umgebungsbedingungen zusammen wirken müssen. Als Verlust der Wärmesenke wird in dieser Stellungnahme bezeichnet, wenn die Wärmeabgabe an die Umgebung z. B. durch Beeinträchtigung der notwendigen technischen Einrichtungen zur Wärmeabgabe (wie in Fukushima durch Überfluten der Pumpen) oder durch Verhinderung der Wasserentnahme verhindert wird. Die Wärmesenke als solche wird in der Regel nicht verloren gehen.

Begriffe im Zusammenhang mit Wärmesenken werden weder national noch international einheitlich gehandhabt. Die im Zusammenhang mit dieser Stellungnahme verwendeten Begriffe werden deshalb wie folgt definiert.

Wärmeabfuhrsysteme:

Die abzuführende Wärme muss von der Wärmequelle (Reaktor, Turbinenkondensator etc.) zu der Wärmesenke transportiert werden. Hierzu dienen Wärmeabfuhrsysteme. Für eine gesicherte Wärmeabfuhr sind demzufolge immer ein funktionierendes Wärmeabfuhrsystem, das die Wärme vom Entstehungsort zur Wärmesenke transportiert, und die Verfügbarkeit einer Wärmesenke erforderlich.

Hauptwärmesenke:

Die Hauptwärmesenke dient zur Abfuhr der bei der elektrischen Energieerzeugung anfallenden Verlustwärme - bei Kernkraftwerken ist dies üblicherweise der Turbinenkondensator. Dem Wärmetransport von der Hauptwärmesenke in die Umgebung dient das Hauptkühlwassersystem. Die Hauptwärmesenke hat im Wesentlichen betriebliche Aufgaben, sie gehört demzufolge nicht zu den Sicherheitseinrichtungen. Der Ausfall der Hauptwärmesenke ist auslegungsgemäß ein Ereignis des anomalen Betriebs („Transiente“) und ist zu beherrschen.

Primäre Wärmesenke¹:

Im Zusammenhang mit dieser Stellungnahme ist die Primäre Wärmesenke die sicherheitstechnisch relevante Wärmesenke an die die Nachzerfallsleistung des Reaktors nach Abschaltung sowie die bei Betrieb und Störfällen anfallende Verlustwärme der Sicherheitssysteme letztendlich abgeführt wird. Im Zusammenhang mit Störfällen hat die Abfuhr der Nachzerfallswärme der Brennelemente im Reaktor und BE-Becken eine hohe sicherheitstechnische Bedeutung um eine Zerstörung des Reaktorkerns und der Aktivitätsbarrieren infolge Überhitzung zu verhindern. Der dafür notwendige Wärmetransport vom Reaktor zur Primären Wärmesenke erfolgt beim deutschen Anlagenkonzept durch die sogenannte „Nachkühlkette“. Diese besteht im Wesentlichen aus drei Systemen, dem „Not- und Nachkühlsystem“ und dem in dieses integrierte Beckenkühlsystem, dem „Zwischenkühlwassersystem für gesicherte Anlagen“ und dem „Nebenkühlwassersystem für gesicherte Anlagen“. Das Letztere transportiert die Abwärme vom

¹ Im englischen Sprachgebrauch wird für die sicherheitstechnisch relevante „Primäre Wärmesenke“ häufig der Begriff: „ultimate heat sink“ oder „primary ultimate heat sink“ verwendet.

Zwischenkühlwassersystem über Wärmetauscher (Nukleare Zwischenkühler) an die Primäre Wärmesenke. Hierbei wird bei den meisten Anlagen dieselbe Primäre Wärmesenke genutzt wie für die Hauptwärmesenke.

Im Zusammenhang mit dieser Stellungnahme sind der Aufbau, die Funktionsweise sowie die möglichen Versagensmöglichkeiten die zum Verlust des letzten Gliedes der sicherheitstechnisch relevanten Nachkühlkette d. h. dem Nebenkühlwassersystem für gesicherte Anlagen und der zugehörigen Wärmesenke führen können, von Relevanz.

Der Vollständigkeit halber sei erwähnt dass es weitere Kühlketten in Kernkraftwerken gibt z. B. das „Nebenkühlwassersystem für konventionelle Anlagen“. Diese Kühlsysteme sind meist verfahrenstechnisch mit der Hauptwärmesenke und der Primären Wärmesenke verknüpft, sie haben keine sicherheitstechnische Bedeutung und werden in dieser Stellungnahme nicht betrachtet.

Diversitäre Wärmesenke²:

Eine weitere sicherheitstechnisch relevante Wärmesenke die unabhängig von der Primären Wärmesenke in der Lage ist die Nachzerfallsleistung des Reaktors nach Abschaltung sowie die bei Betrieb und Störfällen anfallende Verlustwärme von sicherheitstechnisch relevanten Systemen abzuführen. Diversitäre Konzepte nutzen z. B. eine andere Wärmesenke (Luft anstatt Wasser; Brunnen anstatt Fluss) als die Primäre Wärmesenke. Eine vollständige Diversität wird dann erreicht, wenn neben der Diversitären Wärmesenke auch für den Wärmetransport diversitäre Systeme (technisch oder funktional) zur Anwendung kommen.

3 Nationale und internationale Betriebserfahrungen

Der eingangs erwähnte Ausfall der Primären Wärmesenke infolge Überflutung durch einen Tsunami in Fukushima hat wegen der katastrophalen Auswirkungen auf die Kühlung der Reaktoren zu Nachbewertungen der sicherheitstechnisch relevanten Kühlwasserversorgung geführt. Diese Nachbewertung umfasst nicht nur die in Fukushima auslösenden Ursachen „Überflutung“ mit Folgeausfall der Energieversorgungssysteme, sondern weitere aus der Betriebserfahrung bekannte Ausfallursachen wie Blockierung der Kühlwasserzufuhr oder Verlust des Kühlmediums der Wärmesenke. Die GRS hat auf Veranlassung der RSK nationale und internationale relevante Vorkommismeldungen ausgewertet /2/. Quellen dieser Auflistung sind die Meldepflichtigen Ereignisse in Deutschland gemäß AtSMV sowie die IRS-Datenbank der IAEA. Dabei ist anzumerken, dass einzelnen Meldungen in der IRS-Datenbank mehrere Ereignisse zugrunde liegen, wobei die der Meldung zugrunde liegende Anzahl von Ereignissen nicht erläutert ist.

Insgesamt sind Beeinträchtigungen der Wärmesenke in Kernkraftwerken keineswegs sehr selten. Allerdings führten Probleme mit der Kühlwasserversorgung in erster Linie (in ca. 80 % der Fälle) zu einem Ausfall der Hauptwärmesenke und in deren Folge zur Beeinträchtigung der Energieerzeugung.

Da die Primäre Wärmesenke deutlich geringere Kühlwassermengen erfordert als die Hauptwärmesenke, konnten die Reinigungsanlagen nach Leistungsreduzierungen oder nach Abschaltung der Anlagen zumeist noch ausreichende Kühlwassermengen zur Versorgung der sicherheitstechnisch relevanten

² Im englischen Sprachgebrauch wird für die sicherheitstechnisch relevante „Diversitäre Wärmesenke“ häufig der Begriff: „alternate ultimate heat sink“ verwendet.

Nebenkühlwasserstränge bereitstellen. In ca. 20 % der Fälle waren allerdings die Nebenkühlwasserstränge ebenfalls beeinträchtigt.

Mit den zuvor genannten Informationen besteht ein umfangreicher Erfahrungsschatz in Bezug auf Ausfallphänomene mit den Wärmesenken von Kernkraftwerken, der ausweist, dass die Zuverlässigkeit der Primären Wärmesenke nicht nur infolge des Ereignisses in Fukushima sondern auch unter Berücksichtigung anderer Ausfallmechanismen einer Neubewertung bedarf.

4 Potenzielle Ursachen die zum Ausfall der Primären Wärmesenke führen können

Aus den genannten Betriebserfahrungen und der Betrachtung potenzieller Mechanismen lassen sich sieben typische Ursachen für Beeinträchtigungen der Primären Wärmesenke ableiten wobei zahlenmäßig die Verstopfungseignisse dominieren.

- a Verstopfung der Einlaufbauwerke durch Fremdstoffe im Vorfluter sowie Verstopfung der Einlaufbauwerke durch Eisbildung.
- b Bildung von biologischen Fremdkörpern in den Kühlwassersystemen.
- c Beeinträchtigung der Wärmetauscherwirksamkeit infolge Verschlechterung des Wärmeübergangs an den Wärmetauscherflächen (Ablagerungen, Fouling).
- d Überflutung der Einlauf- oder Pumpenbauwerke durch interne Ereignisse.
- e Überflutung der Einlauf- oder Pumpenbauwerke durch externe Ereignisse.
- f Fehlendes Kühlwasser bzw. Blockierung der Zu- bzw. Abläufe als Folge ereignisbedingter äußerer Einwirkungen.

Diese Mechanismen werden im Folgenden im Hinblick auf ihre Eintrittswahrscheinlichkeit und die sicherheitstechnischen Konsequenzen betrachtet. Inwieweit die genannten Aspekte auf eine Anlage zutreffen, ist sowohl von der geografischen Lage des Standortes als auch von der zur Anwendung kommenden Technologie der Wärmesenke abhängig.

Das Fukushima Ereignis

Die Nebenkühlwasserversorgung der Anlagen in Fukushima war durch den Tsunami in zweierlei Hinsicht betroffen: die Überflutung führte sowohl zum Ausfall der Systeme des Nebenkühlwassers - vor allem der Pumpenanlagen - als auch zum Ausfall der Stromversorgung für die Nebenkühlwasserpumpen.

Jede dieser Ausfallursachen hätte für sich alleine bereits zum Ausfall der Wärmeabfuhr an die Primäre Wärmesenke geführt. Die Besonderheit der Ereignisse in Fukushima lag darin, dass beide Ausfallursachen praktisch zeitgleich und eine Folge desselben einleitenden Ereignisses - eines Tsunamis - waren. Ein wesentlicher neuer Gesichtspunkt bei der Bewertung von potenziellen Ausfallursachen der Primären

Wärmesenke ist deshalb die Betrachtung von überlagerten Ausfallursachen, vor allem wenn dabei eine gewisse Zwangsläufigkeit angenommen werden muss.

Verstopfung der Einlaufbauwerke durch Fremdstoffe im Vorfluter

Aus den Betriebserfahrungen lässt sich ableiten, dass die Verstopfung der Einlaufbauwerke und der zugehörigen Systemkomponenten die häufigste Ursache für Beeinträchtigungen der Primären Wärmesenke sind.

Das den Vorflutern entnommene Kühlwasser wird in der Regel mittels Grob- und Feinrechen sowie kleinmaschigen Sieben (Siebbandmaschinen, Trommelsiebe) gefiltert um die nachgelagerten Komponenten vor Verunreinigungen zu schützen. Feinsiebe werden aufgrund der dortigen Bedingungen allerdings nicht an allen Standorten verwendet.

Schutzbedürftige Komponenten in Kühlkreisläufen sind:

- Kühlwasserpumpen und
- nachgelagerte Kondensatoren und Wärmetauscher u. a. auch die zur Primären Wärmesenke gehörenden sicherheitstechnisch relevanten „Nuklearen Zwischenkühler“.

Die Filtereinrichtungen sind in ihrer Leistungsfähigkeit begrenzt, insbesondere dann, wenn der Vorfluter hohe Fremdstoffbelastungen mit sich führt. Hierbei kann es zum Verblocken der Kühlwasserzufuhr kommen, einige Systeme besitzen für diesen Fall zum Selbstschutz der Filtereinrichtungen Überdruckklappen, die allerdings beim - meist plötzlichen - Öffnen zu einem ungewollten Eindringen großer Fremdstoffmengen in die Kühlwasserkreisläufe führen. Sowohl die Blockade der Reinigungsanlagen als auch der Eintrag großer Fremdstoffmengen infolge des Anspringens von Überdruckklappen oder eines Versagens der Filtersiebe kann je nach vorhandener Systemkonfiguration zum Ausfall einer oder mehrerer Redundanzen der Nebenkühlwassersysteme führen.

Dem GRS-Bericht /2/ kann entnommen werden, dass Blockaden von Kühlwassereinläufen sowohl an Küsten- als auch an Flusstandorten mehrfach vorgekommen sind. An Flusstandorten dominieren dabei hohe Schmutzfrachten des Vorfluters z. B. durch Laub, Gras und andere Feststoffe, häufig im Zusammenhang mit Unwettern oder Hochwassersituationen. Küstenstandorte sind vor allem gefährdet durch pflanzliche oder tierische Stoffe im Vorfluter wie Algen, Seegras, Quallen oder Fischschwärme.

Die Wärmeabfuhr über **Kühltürme** ist von hohen Schmutzfrachten im Vorfluter in der Regel kaum betroffen, insbesondere dann, wenn die Versorgung der Kühltürme mit Verdunstungswasser durch den Ausfall der zugehörigen Versorgungssysteme längerfristig nicht beeinträchtigt ist, weil entsprechende Wasservorräte mit sauberem Wasser für den Ersatz des Verdunstungswassers zur Verfügung stehen. Es besteht jedoch ein Potenzial für die Beeinträchtigung der Wirksamkeit von Kühltürmen (vor allem von solchen mit kleinerer Leistung) durch eine Blockierung der Zuluft infolge umherfliegender Folien, Papier oder ähnliche Fremdkörper, z. B. bei Sturm oder durch Versagen von Einbauteilen der Kühltürme, z. B. im Erdbebenfall oder durch Brand.

Verstopfung der Einlaufbauwerke durch Eisbildung im Vorfluter oder an den Reinigungseinrichtungen

Eisbildung im Bereich der Kühlwassereinläufe kann zu einer Blockierung des Kühlwassereinlaufs und in Folge zum Ausfall der Primären Wärmesenke führen. Dabei sind unterschiedliche Varianten von Eisbildungen zu betrachten.

Bei **Sulzeis** handelt sich um Eispartikel in Millimetergröße, die sich in fließendem unterkühltem Wasser bilden. Als lockeres Eis-Wasser-Gemisch kann es sich an Strukturen anlagern, überfrieren und sich dabei unter bestimmten Voraussetzungen (z. B. Veränderung des Salzgehaltes an Tidengewässern) derartig schnell verfestigen, dass es zur Blockierung von Einlaufkammern oder zur Beeinträchtigung der Kühlwasserreinigung kommen kann. In einigen Fällen führten die Vereisungen durch Verblocken der Kühlwasserreinigung (Grobrechen, Feinrechen, Siebband, Siebtrommel) zum Ausfall mehrerer Stränge verschiedener Kühlwassersysteme.

Sinken die Wassertemperaturen unter den Gefrierpunkt, besteht die Gefahr der **Eisbildung** bei der sich große Eisbrocken bilden. Diese können die Kühlwasserreinigungsanlage, vor allem den Grobrechen, stark beschädigen. Wie sich gezeigt hat, kann starker Wind eine bestehende Eisdecke aufbrechen und die entstehenden Eisbrocken in das Entnahmebauwerk drücken. Dies kann durch Verblockung der Reinigungsanlagen zu einer starken Beeinträchtigung der Kühlwasserversorgung führen.

Selbst bei Wassertemperaturen über dem Gefrierpunkt kann es zu **Vereisungen** an verschiedenen Stellen im Bereich von Kühlwasserpumpen, die oberhalb der Wasseroberfläche Kontakt mit der Umgebungsluft haben, kommen. Dabei drohen Verstopfungen in den Ansaugleitungen. Solche Vereisungen können auch Impulsleitungen von Messungen blockieren mit der Folge von Schutzabschaltungen der Kühlwasserpumpen.

Als Gegenmaßnahmen gibt es in einigen Anlagen die Möglichkeit erwärmtes Rücklaufwasser in den Einlaufbereich umzuleiten, um die Eisbildung zu verhindern. Die hierzu erforderlichen Schalthandlungen sind präventiv vor Erreichen geringer Kühlwassertemperaturen durchzuführen. Die Maßnahme kann allerdings nur beim Leistungsbetrieb der Anlage wirksam angewandt werden. Angesichts der evtl. noch mehrere Jahre erforderlichen Kühlung von Brennelementlagerbecken in abgeschalteten Anlagen ist dieser Aspekt auch für diese Anlagen von besonderer Relevanz.

Bildung von biologischen Fremdkörpern (Muscheln) in den Kühlwassersystemen

Ein in den letzten Jahren zunehmend zu beobachtendes Phänomen ist die Bildung von Muscheln in den Kühlwassersystemen der Anlage. Die Siebeinrichtungen halten Muschellarven nicht zurück und die Larven wachsen - teilweise in erheblichen Mengen - in den Systemen heran. Diese Muscheln können in die Kühler der Anlage eingetragen werden und deren Kühlwirkung verringern bzw. die Kühler blockieren. Eine chemische Bekämpfung, z. B. mittels Stoßchlorierung, ist aus Umweltschutzgründen unzulässig, so dass dieses Phänomen nur durch sorgfältige Beobachtung des Systemzustandes und rechtzeitige Entfernung solcher Muschelbestände beherrscht werden kann.

Beeinträchtigung der Wärmetauscherwirksamkeit infolge Verschlechterung des Wärmeübergangs an den Wärmetauscherflächen

Neben den zuvor genannten tendenziell sporadischen Ereignissen können schleichende und langsam verlaufende Phänomene die Wirksamkeit der sicherheitstechnisch relevanten Kühlstellen beeinträchtigen. Hierzu gehören z. B. schleichender Eintrag von Festkörpern an den Sieben des Kühlwassereinlaufs oder „Makro-Fouling“ (Verschlechterung des Wärmeübergangs) der Wärmetauscherrohre. Der Wärmeübergang der Kühlerrohre kann auch durch gelöste Stoffe, z. B. Öleintrag beeinträchtigt werden. Zur Vermeidung von Verschmutzung in den Wärmetauscherrohren werden häufig Rohrreinigungsanlagen (z. B. Schwammkugeln) eingesetzt. Bei sich anbahnenden Verstopfungen der Kühler können diese Kugeln die Verstopfung des Wärmetauschers allerdings beschleunigen.

Überflutung der Einlauf- oder Pumpenbauwerke durch anlageninterne Ereignisse

Vergleichsweise häufig sind Ereignisse zu verzeichnen, die zu Überflutungen im Bereich der Nebenkühlwasseranlagen infolge anlageninterner Ereignisse geführt haben. Ursachen waren sowohl Komponentenversagen als auch menschliche Fehlhandlungen, die Leckmengen waren teilweise erheblich. Im Falle des Komponentenversagens sind Korrosion und andere Alterungsmechanismen (z. B. Versprödung von Gummikompensatoren und Dichtungen) die dominierenden Schadensmechanismen.

Überflutung der Einlauf- oder Pumpenbauwerke durch anlagenexterne Ereignisse

Sicherheitstechnisch relevante Einrichtungen, die der Beherrschung von externen Ereignissen dienen, sind grundsätzlich gegen diese Einwirkungen zu schützen. Da die Pumpenanlagen der Primären Wärmesenke in der Regel im unmittelbaren Einwirkungsbereich der Vorfluter installiert sind, ist dem Überflutungsaspekt durch externe Überflutungsereignisse besondere Aufmerksamkeit zu widmen. Die erforderlichen Maßnahmen hängen vom Standort der Anlage (Küste- oder Binnenstandort) ab. Anlaufende Flutwellen, z. B. bei Stauwehrbrüchen, durch Erdbeben oder bei plötzlichen Unwettern, können beim Auftreffen auf die Einlaufbauwerke dynamisch erhöhte Wasserstände erreichen, die zur kurzzeitigen Überflutung der Pumpenbauwerke führen können. Es empfiehlt sich daher, die Auslegung der Kühlwasserpumpenbauwerke im Hinblick auf die Überflutungssicherheit auch unter solchen Randbedingungen zu verifizieren und ggf. die besonders exponierten Einrichtungen überflutungssicher zu gestalten. Alternativ können Pumpen eingesetzt werden, die auch unter Wasser betrieben werden können.

Fehlendes Kühlwasser bzw. Blockierung der Zu- bzw. Abläufe als Folge ereignisbedingter Einwirkungen.

Neben den bereits genannten Phänomenen gibt es eine Reihe weiterer anlagenexterner Ereignisse, die zum Verlust der Primären Wärmesenke führen können. Hierzu gehören vor allem Ereignisse, die zum Ausbleiben des Kühlwassers im Vorfluter führen. Betroffen sind davon vor allem Standorte an Flüssen. Ursache eines solchen Ereignisses kann der Bruch eines flussabwärts gelegenen Stauwehrs oder Staudamms sein. Versandungen und Ablagerungen in den Kühlwassersystemen können schleichend auftreten, schnell auftretende Verschüttungen und Blockaden eine Folge von Arbeiten in der näheren Umgebung von

Einlaufbauwerken, von Erdbebenereignissen oder anderen geologischen Ereignissen wie Erdbeben sein. Unter gewissen Randbedingungen sind auch Einwirkungen Dritter als auslösende Ursache nicht auszuschließen.

5 Die Primäre Wärmesenke in deutschen Anlagen

Als Primäre Wärmesenke dient überwiegend ein Vorfluter (Fluss oder Meer), in zwei Anlagen kommen gemäß /3/ luftgekühlte Nasskühltürme als Primäre Wärmesenke zum Einsatz. Das deutsche Regelwerk fordert keine von der Primären Wärmesenke unabhängige Diversitäre Wärmesenke. Ein wesentlicher Bestandteil der Systemtechnik, die für den Wärmetransport von den sicherheitstechnisch relevanten Kühlstellen zur Wärmesenke erforderlich ist, ist das Nebenkühlwassersystem für gesicherte Anlagen. (siehe auch 5.2)

Demzufolge gehört das Nebenkühlwassersystem für gesicherte Anlagen zu den Sicherheitssystemen und es ist dem entsprechend konzipiert. Sicherheitssysteme müssen u. a. einen Redundanzgrad von $n+2$ aufweisen und so gestaltet sein, dass ein Ausfall infolge von Common Mode Ereignissen nicht zu erwarten ist. Anforderungen für die Systeme der Nachkühlkette, zu denen das Nebenkühlwassersystem für gesicherte Anlagen zählt, enthält KTA 3301.

Das Nebenkühlwassersystem für gesicherte Anlagen (DWR) ist in der Regel 4-strängig (4 x 50% bezüglich der anfänglichen Nachwärmeabfuhr und abzuführender Speicherwärme) aufgebaut, seine Kühlkapazität wird von den Auslegungsstörfällen, im Wesentlichen von den KMV-Ereignissen und, da das Nebenkühlwassersystem für gesicherte Anlagen im deutschen Anlagenkonzept auch betriebliche Funktionen zu erfüllen hat, von betrieblichen Erfordernissen (im Wesentlichen von Abfahrgradienten) bestimmt.

Zur Beherrschung von externen Ereignissen wie Flugzeugabsturz (FLAB) oder Explosionsdruckwellen sind ebenfalls die Nachwärmeabfuhr und die Kühlung sicherheitstechnisch relevanter Komponenten erforderlich. Das Regelwerk fordert /8, 9/ für die Beherrschung solcher Ereignisse den Schutz gegen die postulierten Einwirkungen, so dass mindestens einmal 100 % zur Verfügung stehen. In einigen neueren Anlagen ist eine zweisträngige Notnachkühlkette vorhanden. Diese Notnachkühlketten besitzen jedoch in der Regel gemeinsame Komponenten mit den Nebenkühlwassersystemen der Primären Wärmesenke die der Beherrschung von Auslegungsstörfällen dienen, z. B. die Wärmetauscher für den Wärmetransport von den Zwischenkühlkreisläufen zu den Nebenkühlwassersträngen (Nukleare Zwischenkühler).

In den meisten Fällen wird auch die von der Notnachkühlkette abzuführende Wärme der Primären Wärmesenke, d. h. dem jeweiligen Vorfluter zugeführt. Die bereits erwähnten Anlagen, die als Primäre Wärmesenke Kühltürme nutzen, verfügen über eine Diversitäre Wärmesenke (Fluss), wobei die Zufuhr der Abwärme durch ein zweisträngig aufgebautes Notnebenkühlwassersystem erfolgt. Die Anlagen KRB-B/C, deren Primäre Wärmesenke ein Fluss ist, besitzen jeweils eine einsträngig aufgebaute Diversitäre Wärmesenke (Kühlturm), KKP-2 eine zweisträngig aufgebaute zusätzliche Notnebenkühlwasserversorgung aus einem Brunnen.

Während der grundsätzliche Systemaufbau der Nebenkühlwassersysteme für gesicherte Anlagen weitgehend identisch ist, gibt es auf Grund von standortspezifischen Randbedingungen und entsprechend dem fortschreitenden Stand der Technik zum Zeitpunkt der Anlagenerrichtung relevante Unterschiede im Bereich

der Kühlwasserentnahmebauwerke. Dies betrifft vor allem die räumliche Trennung der Redundanzen, die Gestaltung der Kühlwasserreinigung hierbei insbesondere die Nutzung gemeinsamer Komponenten für die Reinigung des Haupt- und Nebenkühlwassers. Insoweit sind hier keine typischen gemeinsamen Merkmale vorhanden, eine detaillierte Bewertung dieser Einrichtungen im Hinblick auf Zuverlässigkeit und mögliche systembedingte Fehlerquellen, die zu einem vollständigen Ausfall der Primären Wärmesenke führen können, muss deshalb anlagenspezifisch erfolgen.

Wesentlich für die Bewertung der Folgen eines Verlusts der Primären Wärmesenke ist auch welche Systeme vom Ausfall der Kühlung betroffen sind. In der Regel wird ein Teil des Nebenkühlwassers für gesicherte Anlagen für die Kühlung von Notstromdieseln und/oder zur Kühlung sicherheitstechnisch relevanter Kältemaschinen und Lüftungsanlagen verwendet. Daraus können sich Folgeausfälle in anderen Sicherheitseinrichtungen entwickeln, die dazu führen, dass man analog zu Fukushima die Auswirkungen von mehreren gleichzeitig auftretenden Ausfallphänomenen betrachten muss.

6 Potenzielle Folgen eines Ausfalls der Primären Wärmesenke

Das Nebenkühlwassersystem für gesicherte Anlagen ist in deutschen Anlagen als Bestandteil der Primären Wärmesenke in der Regel ein kombiniertes System, das sowohl betriebliche als auch sicherheitstechnische Aufgaben hat.

Zu den betrieblichen Aufgaben zählen:

- Komponentenkühlung von Hilfs- und Nebenanlagen,
- Kühlung der Lüftungs- und Klimaanlage im nuklearen Teil der Anlage,
- Kühlung der Kaltwasseranlagen (Kältemaschinen),
- Abfuhr der Nachzerfallsleistung in diversen Nichtleistungsbetriebszuständen und
- Kühlung der Brennelementlagerbecken.

Zu den sicherheitstechnischen Aufgaben zählen

- Nachwärmeabfuhr bei allen Auslegungsstörfällen und bei Einwirkungen von Außen (z. B. Flugzeugabsturz oder Explosionsdruckwelle),
- Kühlung aller für die Beherrschung der genannten Ereignisse relevanten Systeme und deren Komponenten einschließlich der Notstromdiesel (nicht in allen Anlagen) und
- Einhaltung der für die Funktionsfähigkeit der Sicherheitssysteme (SE 3) und der Notnachkühlkette (SE 4a) erforderlichen Umgebungsbedingungen in der Anlage

Ein Ausfall der Primären Wärmesenke hat demzufolge erhebliche Folgen für die Anlage. Befindet sich die Anlage im Leistungsbetrieb, fallen in kurzer Zeit wesentliche für den Betrieb der Anlage erforderliche Komponenten wegen Kühlungsmangel aus, so z. B. die Hauptkühlmittelpumpen bzw. Zwangsumwälzpumpen, diverse Hilfs- und Nebensysteme wie das Volumenregelsystem sowie die Wärmeabfuhr durch die Lüftungs- und Klimaanlage in weiten Bereichen der nuklearen Anlagen. Diese

Komponentenausfälle führen in der Folge zu automatischen Abschaltungen der Anlage d. h. zur Einleitung von Transienten und Störfällen selbst dann, wenn kein anderes einleitendes Ereignis z. B. ein Ausfall der Hauptwärmesenke oder ein KMV aufgetreten ist.

Befindet sich die Anlage im Nichtleistungsbetrieb, führt ein Ausfall der Primären Wärmesenke ebenfalls zum Verlust von betrieblichen und sicherheitstechnisch relevanten Funktionen z. B. der Kühlung des Brennelementlagerbeckens, bei diversen Betriebsphasen auch der Kühlung von Brennelementen im Reaktordruckbehälter sowie zu Beeinträchtigungen der Lüftungs- und Klimaanlage und der Komponentenkühlung.

Sofern die Primäre Wärmesenke auch der Kühlung von Notstromdieseln dient, führt ein derartiger Ausfall zur Unverfügbarkeit dieser Aggregate.

Das EVA Konzept sieht bei deutschen DWR Anlagen für einige Ereignisse (z. B. FLAB, Loss of Offsite Power (LOOP) mit Ausfall der D1- Diesel) keine Kühlung der Dichtungspartie der Hauptkühlmittelpumpen (HKMP) durch ein Kühlsystem vor. Der Ausfall der Kühlfunktion ist jedoch nur für eine begrenzte Zeitspanne beherrschbar. Wird diese überschritten ist mit einem Dichtungsversagen und dem daraus resultierenden Verlust von Kühlmittel zu rechnen. Informationen zum Systemverhalten für Ausfälle der Dichtungskühlung an den HKMP >> 10 h liegen der RSK ebenso wie zum Ausfallverhalten der Dichtungen von Zwangsumwälzpumpen in SWR-Anlagen derzeit nicht vor.

Im Zusammenhang mit einem Ausfall der Primären Wärmesenke ist zu berücksichtigen, dass auf Grund der gemeinsamen Einrichtungen eine hohe Wahrscheinlichkeit besteht, dass auch die Kühlwasserversorgung des konventionellen Nebenkühlwassers nicht mehr zur Verfügung steht und damit der Eigenbedarfsbezug über den Maschinentransformator ausfällt. Sofern ein luftgekühlter Eigenbedarfstransformator die Stromversorgung der Anlage übernimmt, ist die Stromversorgung der Anlage gesichert. Erst bei Ausfall des Reservenetzes bzw. des Eigenbedarfstransformators müssten die Notstromdiesel (D1-Netz) die Eigenbedarfsversorgung übernehmen, diese können jedoch wegen des Ausfalls der Primären Wärmesenke ebenfalls nicht zur Verfügung stehen. Tritt ein solches Ereignis im Leistungsbetrieb ein, führt dies bei DWR-Anlagen zum Ereignis „EVA im Leistungsbetrieb“ mit Anforderung der diversitären Notstromversorgung (D2-Netz)- und der EVA gesicherten Dampferzeugerbespeisung.

Im Nichtleistungsbetrieb (geöffneter RDB) stellt die Nachkühlkette alleinig die Nachwärmeabfuhr sicher, ein Ausfall der Primären Wärmesenke führt demzufolge zum Verlust der Brennelementkühlung.

Diese kann beim bestehenden Konzept dann nur noch mittels Notfallmaßnahmen erfolgen.

Die Bewertung von Risiken resultierend aus dem Ausfall der Primären Wärmesenke erfordert deshalb sehr differenzierte Betrachtungen, ausgehend vom jeweiligen Anlagenkonzept und dem Ausgangszustand bei Ereigniseintritt, da die abzuführende Wärmeleistung, die zur Verfügung stehenden Systeme, verfügbare Notfallmaßnahmen etc. differieren. Der Anlagenhersteller hat beispielhaft für eine deutsche DWR-Anlage Abschätzungen der Folgen und der Beherrschbarkeit eines Ausfalls von Primärer Wärmesenke, der Eigenbedarfsversorgung und der D1-Notstromversorgung vorgenommen. Mit den derzeitigen Gegebenheiten (Systemtechnik, Prozeduren) wird festgestellt, dass die Anlage ein erhebliches Potenzial hat, den Ausfall der Primären Wärmesenke bei Ereigniseintritt im Leistungsbetrieb für einen Zeitraum von ca. 24 Stunden zu

beherrschen. Ein solches Szenario kann in Nichtleistungsbetriebszuständen - insbesondere bei offenem Primärkreislauf und mit geringem Kühlmittelinventar im Reaktor - zu kürzeren Karenzzeiten führen.

Daraus wird abgeleitet, dass für die Beherrschung eines längerfristigen Ausfalls der Primären Wärmesenke im Leistungsbetrieb und zur Beherrschung eines solchen Ausfalls in einigen Nichtleistungsbetriebszuständen ergänzende Maßnahmen erforderlich sind. Mögliche Maßnahmen sind systemtechnische Erweiterungen und/oder ergänzende Prozeduren und Notfallmaßnahmen. Ergebnisrelevant sind vor allem die Bereitstellung von Hilfs- und Betriebsstoffen sowie von Kühlwasservorräten und die längerfristige Sicherstellung der Energieversorgung.

7 EU–Stresstest: Status und Überlegungen in anderen Ländern

Im Rahmen des EU-Stresstests liegen seit Anfang Januar 2012 Berichte der mitwirkenden Länder vor. Im Rahmen dieser Stellungnahme wurden die Berichte aus Deutschland /3/, Frankreich /4/, Großbritannien /5/ sowie Finnland /6/ und der Schweiz /7/ gesichtet. Damit ist die überwiegende Anzahl der Nuklearanlagen in Mitteleuropa und in unmittelbarer Nachbarschaft Deutschlands erfasst.

Einleitend hierzu ist festzustellen, dass gemäß der ENSREG Spezifikation alle genannten Länder zum Ausfall der Primären Wärmesenke Ländern berichten, allerdings mit unterschiedlicher Tiefe und Aussagekraft. Dabei wird weitestgehend auch auf die in Kapitel 3 dargestellten Ausfallursachen eingegangen, d. h., die Berichte sind nicht nur auf das in Fukushima aufgetretene Überflutungsszenario begrenzt.

In der folgenden Tabelle sind die Berichtsaussagen im Hinblick auf Auslegungsanforderungen und die aktuelle Situation in Bezug auf das Szenario „Loss of Ultimate Heat Sink“ d. h. den Verlust der Primären Wärmesenke verkürzt zusammengefasst.

Land	Diversitäre Wärmesenke (WS)	Notfallmaßnahmen	Bemerkungen
Deutschland	Keine Anforderung In Einzelfällen vorhanden	Ja für Ausfall Primäre WS	Hinweis, dass RSK noch detaillierte Stellungnahme erarbeitet
Frankreich	Keine Anforderung In Einzelfällen vorhanden	Ja für Ausfall Primäre WS	Anforderungen an ergänzende Nachweisführung /Berichte incl. Studien zur Implementierung einer div. WS
Großbritannien	Auslegungsanforderung Alle Anlagen verfügen über div. WS	Ja für Ausfall <u>beider</u> WS	
Schweiz	Vorhanden, ausgenommen Kernkraftwerk Mühleberg (KKM), dort Nachrüstung gefordert	Ja für Ausfall beider WS	Nachrüstung einer div. WS für KKM gefordert, ergänzende Untersuchungen zu Blockaden in Flüssen wg. Überflutungsaspekten gefordert
Finnland	Keine Anforderung Vorhanden für Olkiluoto 3 (im Bau)	Ja für Ausfall Primäre WS	Ergänzende Nachweisführungen gefordert bzw. in Arbeit, incl. Studien zur Implementierung einer div. WS

Tabelle 1: Aussagen zum Verlust der „Ultimate Heat Sink“ im Rahmen des EU-Stresstests

Es lassen sich aus den Berichten folgende Aussagen bzw. Trends ableiten:

- 1 In den letzten Jahren wurden auf Grund von Vorläuferereignissen bereits Ertüchtigungen in Anlagen durchgeführt. Im Fokus standen Maßnahmen zur Beherrschung hoher Schmutzfrachten im Vorfluter und zur Vermeidung von Öleintrag in die Kühlsysteme. Diese Maßnahmen dienen somit vor allem einer Erhöhung der Zuverlässigkeit der Primären Wärmesenke im bestimmungsgemäßen Betrieb (SE 1).
- 2 Diversitäre Wärmesenken für die Beherrschung von Auslegungsstörfällen und EVA Ereignissen sind derzeit nur in wenigen Ländern Auslegungsanforderung. Im Lichte des Fukushima Ereignisses wird über ein solches Erfordernis allgemein diskutiert, in der Schweiz wurde soweit in den Anlagen noch nicht vorhanden, die Nachrüstung verfügt.
- 3 In allen Ländern wird im Rahmen des Stresstests der Totalausfall der Primären Wärmesenke betrachtet, in der Regel sind zur Beherrschung Notfallmaßnahmen vorhanden bzw. in Entwicklung. In den Ländern die auslegungsgemäß über eine Diversitäre Wärmesenke verfügen bzw. bei Nichtvorhandensein eine Nachrüstung verlangt haben (Großbritannien, Schweiz) wird auch der Ausfall beider, d. h. sowohl der Primären als auch der Diversitären Wärmesenke betrachtet und dafür Notfallmaßnahmen vorgehalten.

-
- 4 Im Lichte des Fukushima Ereignisses werden die für den Ausfall der Primären Wärmesenke bestehenden Notfallmaßnahmen auf Wirksamkeit und Durchführbarkeit überprüft. Die mit dem Ausfall der Primären Wärmesenke verbundenen Folgewirkungen auf andere betriebliche und sicherheitstechnisch relevante Systeme werden berücksichtigt.
 - 5 In Ländern in denen Diversitäre Wärmesenken derzeit nicht installiert sind wurden die Betreiber aufgefordert die Machbarkeit einer Nachrüstung Diversitärer Wärmesenken mit Wirksamkeit in allen Betriebsphasen zu überprüfen. Ob und ggf. in welchem Zeitraum daraus Nachrüstforderungen resultieren ist nicht ersichtlich, es ist jedoch zu erwarten, dass in neueren Regelwerken Anforderungen für die Bereitstellung einer weiteren Diversitären Wärmesenke aufgenommen werden. In Finnland enthält der Entwurf des YVL B1 draft 2 „Safety Design of a Nuclear Power Plant“ bereits entsprechende Anforderungen.
 - 6 Im Zusammenhang mit Ausfallszenarien wird im EU-Stresstest auch eine Überlagerung des Verlusts der Primären Wärmesenke mit dem Ausfall der Stromversorgung (Station Blackout) sowie die gleichzeitige Unverfügbarkeit der anderen betrieblichen Kühlstränge die ebenfalls von der Primären Wärmesenke bzw. von der Hauptwärmesenke versorgt werden, betrachtet.

8 Bewertung

Die RSK hat sich mit den Risiken, die mit dem Ausfall der Primären Wärmesenke verbunden sind, befasst und dabei

- die Erfahrungen aus dem Ereignis in Fukushima,
- die vielfältigen nationalen und internationalen Betriebserfahrungen im Zusammenhang mit Beeinträchtigungen der Primären Wärmesenken,
- die potenziellen Folgen eines solchen Ausfalls im Hinblick auf die Einhaltung der Schutzziele und
- erste Ergebnisse aus generischen Untersuchungen zu Folgen und Möglichkeiten der Beherrschung eines gleichzeitigen Ausfalls der Primären Wärmesenke und der Energieversorgung in einer DWR-Anlage

berücksichtigt und bewertet. Ferner wurden bereits veröffentlichte Teilergebnisse des EU-Stresstests und erkennbare Trends im Hinblick auf die Fortentwicklung des internationalen Standes der Technik in die Bewertung einbezogen.

Sie kommt zu folgenden Ergebnissen

- 1 Die Betriebserfahrungen gemäß /2/ zeigen, dass ein nicht zu vernachlässigendes Potenzial im Hinblick auf den Ausfall der primären Wärmesenke besteht. Zu den wahrscheinlichsten Ursachen zählen Verstopfungen der Einlaufbauwerke durch Fremdstoffe und Eis sowie Ausfälle der Pumpenanlagen infolge von internen oder externen Überflutungen. Festzustellen ist weiterhin, dass die System- und

Anlagentechnik im Bereich der Kühlwasserentnahmen und der Kühlwasserrückführung sehr standortspezifisch ist.

- 2 In vier der noch in Betrieb befindlichen neun Anlagen bestehen neben der primären Wärmesenke zur Beherrschung von Notstandsfällen Diversitäre Wärmesenken, teilweise wurden solche in den abgeschalteten Anlagen im Zusammenhang mit Nachrüstmaßnahmen zur Beherrschung von seltenen Einwirkungen von Außen realisiert (z. B. KKB).
- 3 Diversitäre Wärmesenken, die systemtechnisch durchgängig einen Redundanzgrad von $2 \times 100 \%$ aufweisen, bestehen in drei DWR-Anlagen. Dabei erfolgt die Wärmeabfuhr jeweils an eine andere Wärmesenke, in den KONVOI-Anlagen KKE und GKN 2 anstatt über die Zellenkühler der Primären Wärmesenke (Luftkühlung) an den Vorfluter, in KKP 2 anstatt in den Vorfluter an eine Brunnenanlage. Die zugehörigen Nebenkühlwassersysteme weisen partiell diversitäre Systemkomponenten auf, gemeinsam genutzt werden jedoch die Nuklearen Zwischenkühler. Bei einem Ausfall der primären Wärmesenke im Leistungsbetrieb der Anlagen besteht bei allen DWR-Anlagen für mindestens mehrere Stunden eine Diversitäre Wärmesenke mittels Frischdampfabgabe in die Atmosphäre und Nachspeisung aus den gesicherten Notspeisewasservorräten. Die Wärmeabfuhr über die Dampferzeuger steht aber nicht in allen Betriebszuständen zur Verfügung Eine der bei längerfristigem Ausfall der Nebenkühlwasserversorgung relevanten Aspekte bei DWR- und SWR-Anlagen ist die Kühlung der Dichtungspartien der Hauptkühlmittelpumpen bzw. Zwangsumwälzpumpen, da bei nicht abgesenkten Kühlmitteltemperaturen und längerfristigem Kühlungsausfall von einem Versagen der Dichtfunktion auszugehen ist.
- 4 Die SWR-Anlage KRB II verfügt pro Block über ein einsträngiges, diversitäres zusätzliches Nachwärmeabfuhr- und Einspeisesystem (ZUNA). Mit dem ZUNA-System kann der RDB mit Wasser aus der Kondensationskammer bespeist werden; aus dem RDB läuft das Wasser über die Sicherheits- und Entlastungsventile wieder in die Kondensationskammer zurück. Über einen zugeordneten, nachgeschalteten Strang des Nebenkühlwassersystems mit Zellenkühler erfolgt die Wärmeabfuhr aus dem Kreislauf. Die Verdunstungsverluste können gemäß /3/ aus verschiedenen Quellen ersetzt werden.
- 5 Die Wirksamkeit von bestehenden Diversitären Wärmesenken, z. B. die Nutzung von Brunnen und deren Kühlkapazität, kann durch die RSK - da sehr anlagenspezifisch - nicht im Einzelnen bewertet werden. Soweit diese im Zusammenhang mit dem Konzept zur Beherrschung von seltenen äußeren Ereignissen errichtet wurden, ist jedoch davon auszugehen, dass die Kühlkapazitäten für eine längerfristige Abfuhr der Nachzerfallsleistung ausreichen. Im Hinblick auf die langfristige Kühlung sicherheitstechnisch wichtiger Einrichtungen z. B. der Hauptkühlmittelpumpendichtungen in DWR-Anlagen bzw. der Dichtungen der Zwangsumwälzpumpen von SWR-Anlagen, liegen der RSK keine detaillierten Informationen vor.
- 6 Alle Anlagen verfügen über Notfallmaßnahmen, die in der Lage sind, einige der o. g. relevanten Ausfallursachen zu beherrschen, so dass für die meisten Anlagenzustände die Schutzziele eingehalten werden können. Ein Nachweis, dass z. B. der Verlust der Primären Wärmesenke (Loss of Ultimate Heat Sink) LUHS in Verbindung mit einem Ausfall der Stromversorgung (Loss of Offsite Power) LOOP mit den bestehenden Notfallmaßnahmen über längere Zeiträume (> 10 h) beherrscht werden kann, liegt derzeit nicht vor. Verbesserungspotenzial besteht aus Sicht der RSK z. B. im Hinblick auf

Ausfälle im Nichtleistungsbetrieb und in Bezug auf die Zeiträume über die ein Ausfall der Primären Wärmesenke beherrschbar bleibt.

- 7 Mit den derzeit der RSK vorliegenden Informationen ist auch eine Aussage im Hinblick auf die Leistungsfähigkeit, die Zuverlässigkeit und die Wirksamkeit von geplanten Notfallmaßnahmen zur Beherrschung von Ausfällen der Primären Wärmesenke nicht möglich, weil abschließende Informationen zu den diesbezüglichen Analysen sowie einer daraus abgeleiteten Implementierung von zusätzlichen Notfallprozeduren für die Überbrückung von längeren Wärmesenken- und Netzausfällen derzeit noch nicht vorliegen. Die Anwendbarkeit und die Wirksamkeit der bestehenden Notfallmaßnahmen wird darüber hinaus in einer separaten Stellungnahme bewertet.
- 8 Aus den eingesehenen Unterlagen /3-7/ lässt sich eine Fortentwicklung des internationalen Standes der Technik mit dem Ziel einer Erhöhung der Zuverlässigkeit der Primären Wärmesenke erkennen.

Auf Basis dieser Bewertung leitet die RSK die in Kap. 9 formulierten Empfehlungen im Hinblick auf die Optimierung der Primären Wärmesenken in den weiter in Betrieb befindlichen Anlagen ab.

9 Empfehlungen

9.1 Maßnahmen zur Überprüfung und ggf. Verbesserung der Zuverlässigkeit der Primären Wärmesenke im Hinblick auf Blockaden des Kühlwasserzulaufs

Erfahrungsgemäß lassen sich große Verunreinigungen oder Vereisungen in einem Vorfluter nicht ausschließen. In den vergangenen Jahren ist international eher eine Zunahme solcher Ereignisse als Folge sich verändernder Umgebungsbedingungen zu beobachten. Demzufolge ist sicherzustellen, dass solche Einwirkungen nicht zu einem Redundanz übergreifenden Ausfall der Kühlwasserversorgung, bis hin zu einem völligen Verlust der Primären Wärmesenke führen.

Die RSK hält es für erforderlich, dass unter Berücksichtigung der in Fukushima und in anderen Anlagen gewonnenen Betriebserfahrungen eine Nachbewertung der Primären und soweit vorhanden der Diversitären Wärmesenke standortspezifisch erfolgt. Dabei sind mindestens die in Kapitel 2 aufgeführten Phänomene und deren Relevanz für den jeweiligen Standort sowie die folgenden Aspekte zu berücksichtigen:

- Das Potenzial im Hinblick auf eine Verstopfung der Kühlwasserzufuhr infolge hoher Schmutzfracht des Vorfluters oder schleichender Effekte wie die Versandung von wasserführenden Kanälen ist standortspezifisch zu betrachten und es sind ggf. geeignete Maßnahmen zur Vermeidung des Ausfalls der Primären Wärmesenke vorzusehen.
- Bei kleineren Kühltürmen sollte geprüft werden, ob standortspezifisch ein Potenzial besteht, dass die Kühlfähigkeit infolge des Eintrags luftgetragener Verschmutzungen (Folien) beeinträchtigt werden kann.
- Ein mögliches Versagen von Filter- bzw. Siebeinrichtungen (z. B. Siebbruch oder Öffnen von Überdruckklappen) mit der Folge eines plötzlichen und massiven Schmutzeintrags in die Kühlsysteme, insbesondere im Zusammenhang mit hohen Schmutzfrachten des Vorfluters, muss durch geeignete

Maßnahmen zuverlässig verhindert werden, z. B. mittels eines Abschaltens von Hauptkühlwasserpumpen bei hohen Differenzdrücken an den Siebeinrichtungen. Sofern auf Grund der vorhandenen Systemtechnik ein gleichzeitiger Ausfall mehrerer Kühlstränge (Redundanzen) infolge des plötzlichen Eintrags großer Schmutzfrachten nicht ausgeschlossen werden kann, sind wirksame Abhilfemaßnahmen vorzusehen.

- Maßnahmen gegen Eisbildung im Vorfluter sowie an oder in Komponenten der Kühlsysteme sind insbesondere unter den Randbedingungen von Nichtleistungsbetriebszuständen zu bewerten. Diese Nachbewertung sollte auch für die nicht mehr im Leistungsbetrieb befindlichen Anlagen erfolgen.
- Die Funktionsfähigkeit der sicherheitstechnisch relevanten Wärmetauscher muss durch eine geeignete Instrumentierung überwacht werden können. Dazu gehört auch eine rechtzeitige Erkennbarkeit von Einwirkungen, die den Wärmeübergang der Wärmetauscher unzulässig beeinflussen, z. B. infolge von Fouling, plötzlicher oder schleichender Verstopfung der Wärmetauscherrohre, Muschelbefall etc.
- Durch geeignete Vorkehrungen und Vereinbarungen ist sicherzustellen, dass Wetterereignisse wie Sturm, Hochwasser oder Sturmfluten so rechtzeitig an die Betriebsführung gemeldet werden, dass organisatorische Maßnahmen zur Beherrschung der dabei zu erwartenden Einflüsse auf die Primäre Wärmesenke getroffen werden können. Die bei entsprechender Alarmgabe zu treffenden Maßnahmen sind dem Betriebspersonal vorzugeben (z. B. Verstärkung der Bedienungsmannschaft im Einlaufbauwerk, Grenzwerte für die Fahrweise der Anlage etc.). In den Auflagen und Bedingungen für den Betrieb und den Stillstand der Anlage sind eindeutige Vorgaben aufzunehmen, bei welchen Grenzwerten Maßnahmen zu ergreifen sind und in welchen Betriebszustand die Anlage erforderlichenfalls zu überführen ist.
- Sofern standortspezifisch von Relevanz, ist ein unfallbedingter Eintrag von Öl und anderen Stoffen, die die Funktionsfähigkeit der Primären Wärmesenke beeinträchtigen können, zu betrachten. Gegebenenfalls sind Vorkehrungen zur Vermeidung eines solchen Eintrags zu treffen.
- Die Prüf-, Wartungs- und Instandhaltungsprogramme der sicherheitstechnisch relevanten Kühlsysteme sind im Hinblick auf ihre Vollständigkeit und Wirksamkeit zur Vermeidung von Schäden oder Funktionsverlusten an der Primären und sofern vorhanden der Diversitären Wärmesenke zu überprüfen. Obwohl die Komponenten der Reinigungsanlagen teilweise eher „konventioneller Maschinenbau“ sind und nicht den üblichen nuklearen Auslegungsstandards entsprechen, sind solche Maßstäbe an die Instandhaltung und Änderung der Anlagen zu setzen, dass sie die Verfügbarkeit der Nebenkühlwasserversorgung nicht bestimmen. Die Instandhaltungsprogramme müssen auch sicherstellen, dass umwelt- oder zivilisationsbedingte Versandungen oder Verschmutzungen der Kühlwassersysteme rechtzeitig erkannt und ggf. beseitigt werden können.
- Die Vorgaben für die Planung von Instandhaltungs- und Änderungstätigkeiten im Bereich der Kühlwassersysteme sollten unter Berücksichtigung der mit den Maßnahmen verbundenen Risiken eines Ausfalls der Primären Wärmesenke insbesondere bei Anlagenstillständen überprüft werden.
- Die Auflagen und Bedingungen für den Betrieb und den Stillstand der Anlagen sind dahin gehend zu überprüfen, ob geeignete Anforderungen an die Verfügbarkeit der Primären Wärmesenke unter

Berücksichtigung von potenziellen Ausfallursachen und der Beherrschbarkeit eines Ausfalls in der jeweiligen Betriebsphase festgelegt sind.

9.2 Maßnahmen zur Stärkung der Zuverlässigkeit der Primären Wärmesenke im Hinblick auf den Eintritt von seltenen Einwirkungen von Außen

Seltene Einwirkungen von Außen können zum Verlust der Kühlwasserversorgung der Anlage führen. Auch hierbei sind vor allem solche Ereignisse zu betrachten, die zu einer Verblockung der Kühlwasserzufuhr oder zur Überflutung der Kühlwasser-Entnahmeeinrichtungen führen können. Die RSK empfiehlt diesbezüglich:

- Es ist zu überprüfen, ob bei den Annahmen für Hochwasserereignisse auch die im Bereich der Kühlwasserentnahme zu erwartenden dynamischen Überhöhungen einer anlaufenden Flutwelle berücksichtigt wurden. Ggf. sollten die aktiven Komponenten in den gefährdeten Bereichen technisch so ausgeführt werden, dass diese auch bei Überflutungen funktionsfähig bleiben.

Im Zusammenhang mit der Nachbewertung des Hochwasserschutzes sowie der Auslegung gegen Erdbeben und andere sehr seltene Ereignisse wie Flugzeugabsturz sowie deren Folgewirkungen in der Umgebung der Anlage ist zu überprüfen, ob alle aus solchen Ereignissen ggf. resultierenden Ausfallursachen bei der Auslegung der Primären Wärmesenke im erforderlichen Umfang berücksichtigt wurden. Hierzu zählen

- der Verlust der Primären Wärmesenke (des Vorfluters) z. B. als Folge von Damnbrüchen/Stauwehrbrüchen
- die Verblockung der Kühlwasserzufuhr oder des Kühlwasserrücklaufs im Vorfluter selbst oder den Entnahmeeinrichtungen z. B. infolge Geröll und Schlammlawinen oder Zerstörung von Baustrukturen durch FLAB, Erdbeben etc.

und

- die Beeinträchtigung der Kühlsysteme durch Verlust der Siebfunktion der Kühlwasserreinigung und der Ansaugung ungereinigten Kühlwassers.

Das Potenzial für solche Ausfallursachen muss standortspezifisch betrachtet werden, ggf. sind wirksame Maßnahmen zur Sicherstellung einer ungehinderten Kühlwasserversorgung vorzusehen. Im Zusammenhang mit solchen Szenarien muss neben der Kühlwasserzufuhr auch die Funktionsfähigkeit der Kühlwasserableitung betrachtet werden. Potenzial für den Verlust der Kühlwasserableitung besteht vor allem bei seismischer Einwirkung und bei Flugzeugabsturz

9.3 Maßnahmen zur Beherrschung des Ausfalls der Primären Wärmesenke

Zweifelloos stellt die Installation einer Diversitären Wärmesenke die wirksamste Maßnahme zur Beherrschung eines Ausfalls der Primären Wärmesenke dar, insbesondere dann, wenn die Wärmesenke selbst diversitär (z. B. Luft statt Vorfluter) ist und diese eine entsprechend zuverlässige und vom Ausfall der Primären

Wärmesenke nicht betroffene Energieversorgung besitzt. Zwar ist bei entsprechender systemtechnischer Gestaltung das Versagen der Primären Wärmesenke sehr unwahrscheinlich, aber nicht auszuschließen.

Die RSK empfiehlt:

Die Nachwärmeabfuhr aus der Anlage und den Brennelementlagerbecken muss in allen Betriebszuständen auch bei Ausfall der Primären Wärmesenke aufgrund von Ausfallursachen im Bereich der Kühlwasserentnahmen und Kühlwasserrückführungen durch eine Diversitäre Wärmesenke sichergestellt werden können (ggf. auch verschiedene Wärmesenken in Kombination). Die hierfür benötigten Einrichtungen müssen mindestens den Anforderungen an Notfallmaßnahmen genügen und deren Wirksamkeit ist nachzuweisen.

Der Nachweis sollte unter folgenden Bedingungen erfolgen. Es ist zu zeigen,

- dass ein Ausfall der Primären Wärmesenke und der davon gekühlten Notstromdiesel in Verbindung mit dem gleichzeitigen Verlust der Netzversorgung beherrscht wird. Dabei sind alle relevanten Betriebszustände sowie die Kühlung der Brennelementlagerbecken zu betrachten.
- dass für mindestens 72 Stunden, die erforderlichen technischen Einrichtungen sowie Hilfs- und Betriebsstoffe auf der Anlage vorhanden und wirksam einsetzbar sind. Die Durchführbarkeit der Maßnahmen ist unter den ereignisbedingten Gegebenheiten nachzuweisen.
- dass die Schutzziele bis zur Wiederherstellung der Netzeinspeisung (auch Drittnetzeinspeisung), mindestens für 7 Tage eingehalten werden können. Nach Ablauf von 72 Stunden können vorbereitete und zuverlässig verfügbare externe Hilfsmaßnahmen bei der Nachweisführung kreditiert werden.
- dass Maßnahmen generell nur dann kreditiert werden, wenn die notwendige Energieversorgung und die Versorgung mit den erforderlichen Hilfs- und Betriebsstoffen nachweislich sichergestellt ist. Ferner sind die beim Ausfall der Primären Wärmesenke herrschenden Randbedingungen (z. B. der Ausfall von Raum- und Komponentenkühlung, insbesondere die Kühlung der Hauptkühlmittelpumpendichtungen in DWR-Anlagen bzw. der Dichtungen der Zwangsumwälzpumpen von SWR-Anlagen) zu berücksichtigen.

Die RSK empfiehlt –sofern nicht bereits vorhanden - die Nachrüstung einer Notfallmaßnahme mit der Kühlwasser in das Nukleare Zwischenkühlwassersystem eingespeist und wieder abgeführt werden kann. Die Versorgung kann durch mobile Einrichtungen erfolgen. Die Einspeisemengen müssen ausreichen für die Abfuhr der Nachzerfallsleistung aus Reaktor und Brennelementlagerbecken sowie der Verlustwärme der für einen solchen Kühlbetrieb erforderlichen Komponenten.

Die RSK empfiehlt, dass bei den Anlagen, die aufgrund der redundanzübergreifenden Zusammenführung der Kühlwasserrückläufe ein entsprechendes GVA-Potential aufweisen, entsprechende Notfallmaßnahmen zur Sicherstellung des Kühlwasserrücklaufes vorgesehen werden.

10 Literatur

- /1/ RSK-Stellungnahme „Anlagenspezifische Sicherheitsüberprüfung (RSK-SÜ) deutscher Kernkraftwerke unter Berücksichtigung der Ereignisse in Fukushima- I (Japan)“
437. RSK-Sitzung vom 11. -14. Mai 2011

- /2/ GRS Bericht Betriebserfahrungen NKW

- /3/ EU Stresstest
National Report of Germany
Implementation of the EU Stress Tests in Germany

- /4/ ASN Complementary Safety Assessments of the French Nuclear Power Plants (“European Stress Tests” Report by the French Nuclear Safety Authority

- /5/ National Final Report on European Council “Stress Tests” for UK Nuclear Power Plants
European Council “Stress Tests” for UK nuclear power plants
National Final Report
December 2011 Office for Nuclear Regulation
An agency of HSE

- /6/ European Stress Tests for Nuclear Power Plants
National Report
FINLAND
3/0600/2011
December 30, 2011

- /7/ Swiss National report on ENSI review on the Operators` Reports

- /8/ Interpretationen zu den Sicherheitskriterien für Kernkraftwerke
Einzelfehlerkonzept - Grundsätze für die Anwendung des Einzelfehlerkriteriums

- /9/ KTA 3301 Nachwärmeabfuhrsysteme von Leichtwasserreaktoren

