



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössische Kommission für nukleare Sicherheit
Commission fédérale de sécurité nucléaire
Commissione federale per la sicurezza nucleare
Swiss Federal Nuclear Safety Commission

März 2012

Reaktorkatastrophe von Fukushima

Folgemassnahmen in der Schweiz

KNS-AN-2435

Zusammenfassung

Als Folge des starken Seebebens vom 11. März 2011 hat sich im japanischen Kernkraftwerk Fukushima Daiichi ein schwerwiegender Unfall ereignet, in dessen Verlauf vier Reaktoranlagen schwer beschädigt wurden. Vor allem durch ungefilterte Druckentlastungen, Wasserstoffexplosionen und ausfliessendes Wasser kam es zu grossen Freisetzungen von radioaktiven Substanzen in die Umwelt. Der Unfall wird der Stufe 7, der höchsten gemäss Ereignisskala der Internationalen Atomenergie-Organisation (IAEA), zugeordnet.

Aus dem Blickwinkel der nuklearen Sicherheit gilt es, den Unfall in seinen Ursachen, Abläufen und Wirkungen zu analysieren, um aus den Erkenntnissen die möglichen Lehren abzuleiten und entsprechende Massnahmen umzusetzen. In den ersten Monaten nach dem Unfall von Fukushima konnte zunehmend Klarheit über die wesentlichen Abläufe und Hintergründe gewonnen werden. Der Unfall wurde weltweit analysiert und Lehren wurden daraus abgeleitet, sodass verschiedene Schlüsse zur Verbesserung der Vorsorge gegen Störfälle gezogen werden können. Aufgrund von Erfahrungen mit früheren schwerwiegenden Ereignissen ist davon auszugehen, dass die vertiefte Analyse und die Umsetzung von Massnahmen einen Zeithorizont in der Grössenordnung einer Dekade beanspruchen werden.

Nach schweizerischer gesetzlicher Vorgabe haben die Bewilligungsinhaber die Auslegung ihrer Kernkraftwerke unverzüglich zu überprüfen, wenn in einem anderen in- oder ausländischen Kernkraftwerk ein Ereignis der Stufe 2 (Zwischenfall) oder höher eingetreten ist. Ausserdem kann das Eidgenössische Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI) jederzeit eine derartige Überprüfung anordnen.

Das ENSI hat als zuständige Aufsichtsbehörde in der Schweiz schnell und zielgerichtet auf die Ereignisse von Fukushima reagiert. Auf Basis der laufenden Analysen hat das ENSI bisher insgesamt 45 Punkte zur Überprüfung der schweizerischen Kernkraftwerke und der Aufsicht identifiziert. Diese sollen in einem mehrjährigen Programm bearbeitet werden. In je fünf Verfügungen wurden die Betreiber der schweizerischen Kernkraftwerke verpflichtet, die Anlagensicherheit insbesondere hinsichtlich Überflutung und Erdbeben zu überprüfen. Auch verschiedene Massnahmen zur weiteren Verbesserung der Sicherheit wurden angeordnet und sind zum Teil schon umgesetzt. Weitere Massnahmen können sich aufgrund der Ergebnisse der laufenden Überprüfungen ergeben.

Mit dem vorliegenden Bericht gibt die Eidgenössische Kommission für nukleare Sicherheit (KNS) einen Überblick über die Ereignisse von Fukushima und die daraufhin erlassenen Verfügungen des ENSI in der Schweiz. Sodann stellt sie den Unfall in Bezug zum grundlegenden Sicherheitskonzept für Kernkraftwerke. Schliesslich legt die KNS dar, welche Folgerungen sie aufgrund der Reaktorkatastrophe von Fukushima für die Sicherheit der Kernkraftwerke in der Schweiz zieht. Sie beschränkt sich dabei auf ausgewählte Themen. Fallweise nimmt die KNS damit auch Stellung zu den bisherigen Überprüfungen und Massnahmen in der Schweiz. Die KNS bezieht sich im vorliegenden Bericht auf den ihr bekannten Wissensstand um die Jahreswende 2011/2012.

Die KNS begrüsst die entschlossene und sachorientierte Handlungsweise des ENSI. Nach Ansicht der KNS stellt der vom ENSI festgelegte Zeitplan für Überprüfungen und Massnahmen sehr hohe Anforderungen an die Betreiber und an das ENSI selbst. Die KNS ist der Auffassung, dass die Aktionsliste des ENSI mit bisher insgesamt 45 Punkten zur Überprüfung der schweizerischen Kernkraftwerke und der Aufsicht geeignet ist, die möglichen Lehren für die Kernkraftwerke in der Schweiz in umfassender Weise zu ziehen. Unter den bereits eingeleiteten konkreten Massnahmen für alle schweizerischen Kernkraftwerke begrüsst die KNS

insbesondere die Bereitstellung von zusätzlichen mobilen Einsatzmitteln zur Bewältigung von schweren Unfällen, die Überprüfung der Notfallinstrumentierung und die Absicht, eine ganzheitliche Strategie zur langfristigen Stromversorgung von ausgewählten Verbrauchern auch bei einem totalen Wechselstromausfall zu entwickeln. Sodann begrüsst die KNS insbesondere auch die Schaffung einer diversitären äusseren Wärmesenke im Kernkraftwerk Mühleberg.

Formelle Empfehlungen der KNS betreffen die folgenden Punkte:

- Periodische Überprüfung der internen Notfallschutzmassnahmen unter besonderer Berücksichtigung von Ereigniskombinationen und Folgeereignissen (Empfehlung 4.3);
- Zeitnahe Abschluss der Untersuchungen zur Bestimmung der Erdbebengefährdung an den Standorten der schweizerischen Kernkraftwerke und Festlegung der massgebenden neuen Erdbebengefährdung (Empfehlung 5.1.1);
- Periodische Berücksichtigung neuer Erkenntnisse zur Gefährdung durch Überflutung (Empfehlung 5.1.2);
- Management der Verbraucherlasten zur Erstreckung der Batteriestandzeiten (Empfehlung 5.1.3);
- Optimierung der gefilterten Druckentlastung als Strategie zur Beherrschung der Wasserstoffproduktion bei schweren Unfällen (Empfehlung 5.2.1);
- Validierung und Optimierung des Konzepts des externen Lagers für Einsatzmittel (Empfehlung 5.2.2);
- Dauerhafte Sicherstellung der Fähigkeit des ENSI, bei einem Zwischenfall oder Unfall die Vorgehensweise des Betreibers zu bewerten (Empfehlung 5.4).

Anregungen der KNS betreffen die juristische Prüfung der Zuordnung von Ereignissen zu den Störfallkategorien an den Kategoriengrenzen, die Beachtung von möglichen Hangrutschungen im Zusammenhang mit Überflutungsszenarien, die vertiefte Abklärung der Vorgehensweise bei extremer Trockenheit sowie die Berücksichtigung von gleichzeitigen Ereignissen in mehr als einem Block im Kernkraftwerk Beznau.

Den menschlichen und organisatorischen Aspekten kommt speziell auch im Zusammenhang mit dem Unfall von Fukushima eine fundamentale Bedeutung zu. Beurteilungen in diesem Bereich setzen aber detaillierte Einblicke und Analysen zum Einzelfall voraus. Die KNS geht deshalb nicht vertieft auf diesen Themenkreis ein. Sie begrüsst jedoch die Überprüfungen des ENSI in diesem Bereich, insbesondere in den Handlungsfeldern Erfahrungsrückfluss, Aufsicht und Sicherheitskultur.

Als beratende Gremien des Bundes für Fragen des externen Notfallschutzes und des Strahlenschutzes sind in erster Linie die Eidgenössische Kommission für ABC-Schutz (KomABC) bzw. die Eidgenössische Kommission für Strahlenschutz und Überwachung der Radioaktivität (KSR) zuständig. Die KNS geht deshalb nicht auf Aspekte des Strahlenschutzes ein. Auf Aspekte des externen Notfallschutzes geht sie nur am Rande ein; sie wartet die Ergebnisse der „Interdepartementalen Arbeitsgruppe zur Überprüfung der Notfallschutzmassnahmen bei Extremereignissen in der Schweiz“ (IDA NOMEX) ab und wird allenfalls dazu Stellung nehmen.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Reaktorkatastrophe von Fukushima	2
2.1	Auslösendes Ereignis	2
2.2	Auswirkungen auf Kernkraftwerke im Katastrophengebiet	2
2.3	Einige Eckpunkte des Unfalls im KKW Fukushima Daiichi	3
2.4	Externer Notfallschutz	4
3	Reaktion des ENSI	4
3.1	Verfügung 1 vom 18. März 2011	5
3.2	Verfügung 2 vom 1. April 2011	5
3.3	Verfügungen 3 vom 5. Mai 2011	6
3.4	Verfügung 4 vom 1. Juni 2011: EU-Stresstests	7
3.5	Verfügungen 5 vom 10. Januar 2012	7
3.6	Vorgehensplan des ENSI	8
4	Bezug zum grundlegenden Sicherheitskonzept	11
4.1	Sicherheitskonzept	11
4.1.1	Gestaffelte Sicherheitsvorsorge in fünf Sicherheitsebenen	11
4.1.2	Auslegungsstörfälle	12
4.1.3	Auslegungsüberschreitende Störfälle	13
4.2	Das Sicherheitskonzept und der Unfall in Fukushima Daiichi	14
4.2.1	Auslegung gegen Erdbeben	14
4.2.2	Auslegung gegen Tsunami	14
4.2.3	Notfallmassnahmen	14
4.2.4	Notfallschutzmassnahmen ausserhalb der Anlage	16
4.3	Überprüfung der schweizerischen Kernkraftwerke	17
5	Lehren	18
5.1	Vorsorge / Auslegung	18
5.1.1	Auslegung gegen Erdbeben	18
5.1.2	Auslegung gegen Überflutung	21
5.1.3	Stromversorgung	24
5.1.4	Robuste Gestaltung der Kühlung von Reaktor, Primärcontainment und Brennelementbecken	25
5.1.5	Standorte mit mehr als einer Reaktoranlage	26
5.2	Massnahmen gegen schwere Störfälle / Interner Notfallschutz	27
5.2.1	Wasserstoffproblem	27
5.2.2	Verbesserung der Vorbereitung auf schwere Unfälle	30
5.2.3	Notfallinstrumentierung	32
5.3	Externer Notfallschutz	33
5.4	Sicherheits-Infrastruktur (Behörden, Personal)	34
6	Gesamtbeurteilung	35
6.1	Reaktorkatastrophe von Fukushima	35
6.2	Folgemaassnahmen in der Schweiz	36
6.3	Formelle Empfehlungen der KNS	38
	Überprüfung von internen Notfallschutzmassnahmen (Sicherheitsebene 4)	38
	Festlegung der massgebenden Erdbebengefährdung	38
	Periodische Überprüfung der Überflutungsgefährdung	39
	Management der Verbraucherlasten zur Erstreckung d. Batteriestandzeiten	39
	Wasserstoffproblem und gefilterte Druckentlastung	39
	Vorbereitung auf schwere Unfälle	40
	Behördliche Begleitung von Störfällen	40

Referenzen	43
Abkürzungen	47
Anhang 1 Störfallverlauf in den betroffenen Anlagen	49
A1.1 KKW Fukushima Daiichi	49
A1.1.1 Fukushima Daiichi Block 1	49
A1.1.2 Fukushima Daiichi Block 2	50
A1.1.3 Fukushima Daiichi Block 3	52
A1.1.4 Fukushima Daiichi Block 4	53
A1.1.5 Fukushima Daiichi Blöcke 5 und 6	53
A1.2 Die übrigen KKW im Katastrophengebiet	53
A1.2.1 KKW Tokai Daini	53
A1.2.2 KKW Fukushima Daini	54
A1.2.3 KKW Onagawa	54
A1.2.4 KKW Higashidori	55

1 Einleitung

Als Folge des starken Seebebens vom 11. März 2011 hat sich im japanischen Kernkraftwerk Fukushima Daiichi ein schwerwiegender Unfall der höchsten Stufe (INES 7)¹ gemäss Ereignisskala der Internationalen Atomenergie-Organisation (IAEA)² ereignet. Vier Reaktoranlagen (so genannte Blöcke) wurden schwer beschädigt. Der Unfall hatte grosse Freisetzungen an radioaktiven Substanzen zur Folge. Abgesehen von den einschneidenden Konsequenzen im betroffenen Gebiet hat der Unfall international bedeutende Reaktionen ausgelöst.

Aus dem Blickwinkel der nuklearen Sicherheit gilt es, den Unfall in seinen Ursachen, Abläufen und Wirkungen zu analysieren, um aus den Erkenntnissen die möglichen Lehren abzuleiten und entsprechende Massnahmen umzusetzen. Die systematische Aufarbeitung von Unregelmässigkeiten ist ein wesentlicher Pfeiler der Sicherheit und hat zum Ziel, eine Wiederholung ähnlicher Fehlermuster zu vermeiden oder möglicherweise doch auftretende ähnliche Vorfälle in ihren Auswirkungen zu mildern. Dabei ist die systematische Aufarbeitung von schwerwiegenden Ereignissen eine komplexe Aufgabe. Erfahrungen aus der Vergangenheit (z.B. Lucens, Schweiz, 1969; Three Mile Island, USA, 1979; Tschernobyl, Ukraine, 1986) zeigen, dass die vertiefte Analyse und die Umsetzung von Massnahmen einen Zeithorizont in der Grössenordnung einer Dekade erfordern. Wesentliche Gründe dafür sind die Komplexität der involvierten Systeme (Mensch, Anlagentechnik und Umfeld im zeitlichen Ablauf) und die technische Schwierigkeit, in einer radiologisch stark belasteten Umgebung den Unfall unter Kontrolle zu bekommen und den Schaden aufzuklären.

Das Eidgenössische Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI) hat als zuständige Aufsichtsbehörde in der Schweiz schnell und zielgerichtet auf die Ereignisse von Fukushima reagiert. Auf Basis der laufenden Analysen hat das ENSI 45 Punkte zur Überprüfung der schweizerischen Kernkraftwerke (KKW) und der Aufsicht identifiziert. Diese sollen in einem mehrjährigen Programm bearbeitet werden. In je fünf Verfügungen wurden die Betreiber der schweizerischen KKW verpflichtet, die Anlagensicherheit insbesondere hinsichtlich Überflutung und Erdbeben zu überprüfen. Auch verschiedene Massnahmen zur weiteren Verbesserung der Sicherheit wurden angeordnet und sind zum Teil schon umgesetzt. Weitere Massnahmen können sich aufgrund der Ergebnisse der laufenden Überprüfungen ergeben.

Auf Bundesebene wurde ausserdem die „Interdepartementale Arbeitsgruppe zur Überprüfung der Notfallschutzmassnahmen bei Extremereignissen in der Schweiz“ (IDA NOMEX) eingesetzt. Sie hat den Auftrag, im Licht der Ereignisse in Japan zu untersuchen, inwiefern in der Schweiz gesetzliche und organisatorische Massnahmen ergriffen werden müssen, um den Notfallschutz weiter zu entwickeln.

Ein Jahr nach dem Unfall wird in Fukushima Daiichi immer noch um die Kontrolle der radiologischen Situation gerungen. Wie oben erwähnt werden detailliertere Analysen und darauf basierende, sicherheitstechnisch wertvolle Erkenntnisse zum Verhalten der Anlagen in der Akutphase des Unfalls sowie zu menschlichen und organisatorischen Faktoren noch längere Zeit in Anspruch nehmen. Jedoch scheinen die technischen Abläufe und Hintergründe des Unfalls genügend geklärt und analysiert, um Schlüsse für die weiteren Verbesserungen der Vorsorge gegen Störfälle zu ziehen. Mit dem vorliegenden Bericht legt die Eidgenössische Kommission für nukleare Sicherheit (KNS) dar, welche Folgerungen sie aufgrund der Reaktorkatastrophe von Fukushima für die Sicherheit der Kernkraftwerke in der Schweiz zieht. Sie beschränkt sich dabei auf ausgewählte Themen. Fallweise nimmt die KNS damit auch Stellung zu den bisherigen Überprüfungen und Massnahmen in der Schweiz.

¹ INES International Nuclear and Radiological Event Scale

² IAEA International Atomic Energy Agency

IAEO Internationale Atomenergie-Organisation

Die KNS bezieht sich im vorliegenden Bericht auf den ihr bekannten Wissensstand um die Jahreswende 2011/2012.

2 Reaktorkatastrophe von Fukushima

Im Folgenden werden das auslösende Naturereignis und die Situation skizziert, die sich daraus insbesondere im KKW Fukushima Daiichi und seiner Umgebung entwickelt hat. Die KNS stützt sich dabei vor allem auf die Berichte der japanischen Regierung [JGR 2011] und der INPO³ [INPO 2011]. Für detailliertere Darlegungen verweist sie auf diese Berichte sowie die Berichte der IAEA Fact Finding Mission [IAEA FFM 2011] und des ENSI [ENSI Ablauf 2011]. Weitere, hier nicht genannte Quellen lassen sich im Internet finden.

2.1 Auslösendes Ereignis

Am Nachmittag des 11. März 2011 ereignete sich vor der Nordostküste Japans ein schweres Erdbeben, hier verkürzt als Tohoku-Erdbeben bezeichnet. Dessen Momenten-Magnitude wird mit 9.0 angegeben; dies ist die grösste seit Beginn der Aufzeichnungen in Japan gemessene Magnitude. Dem Hauptbeben folgten innerhalb von vierzig Minuten drei schwere Nachbeben mit Magnituden 7.4, 7.7 und 7.5.

Das Hauptbeben verursachte einen Tsunami, dessen Wellen die Ostküste von Japans Hauptinsel Honshu verwüsteten. Die Überflutungshöhe der verheerendsten Welle wird für weite Küstengebiete in der Grössenordnung von 10 m angegeben, maximal mit 38.9 m für die Örtlichkeit Aneyoshi.

2.2 Auswirkungen auf Kernkraftwerke im Katastrophengebiet

Das sehr starke Erdbeben wirkte sich in weiten Teilen von Ost-Japan mit hohen lokalen Intensitäten aus (d.h. Spitzenbeschleunigungen im Bereich von 1 m/s^2 und höher), zeigte typischerweise zwei Beschleunigungsmaxima und dauerte etwa $2\frac{1}{2}$ Minuten. Die gemessenen Maximalbeschleunigungen in den am stärksten betroffenen KKW lagen in grober Näherung im Bereich der Auslegung bzw. der Requalifikation⁴, an einigen Messstellen und in Teilen des Frequenzspektrums auch darüber. Dennoch hatten die Erschütterungen nach vorliegenden Angaben keine folgenreichen Schäden an den Kernanlagen zur Folge. Bei allen in Betrieb stehenden Reaktoren im betroffenen Gebiet löste das Erdbeben eine automatische Schnellabschaltung aus.

Gravierende Folgen hatte der dem Hauptbeben folgende Tsunami. An den schwer getroffenen nordöstlichen Küsten befinden sich fünf KKW mit insgesamt fünfzehn Reaktoranlagen (so genannten Blöcken), alle vom Typ Siedewasserreaktor. Im KKW Fukushima Daiichi löste der Tsunami in 4 von insgesamt 6 Blöcken eine verhängnisvolle Unfallsequenz aus. Im KKW Fukushima Daini konnten – nach gravierenden Funktionsverlusten in 3 Blöcken – schliesslich alle 4 Reaktoren in den sicheren Zustand „kalt abgeschaltet“ gebracht werden. In zwei weiteren KKW gelang dies trotz fallweise gegebenen Erschwernissen ebenfalls. Der Reaktor des fünften KKW war bereits zur Zeit des Erdbebens im Revisionsstillstand und somit „kalt abgeschaltet“.

³ INPO Institute of Nuclear Power Operations

⁴ Requalifikation: Nachweis, dass die Auslegungsbasis veränderte, höhere Anforderungen erfüllt.

Auf die Unfallsequenz im KKW Fukushima Daiichi wird im folgenden Abschnitt und in Anhang A1.1 eingegangen. Ein Überblick über die Akutphase des Ereignisablaufs in den anderen KKW im betroffenen Gebiet wird in Anhang A1.2 gegeben.

2.3 Einige Eckpunkte des Unfalls im KKW Fukushima Daiichi

Das KKW Fukushima Daiichi umfasst 6 Kraftwerksblöcke. Vor dem Erdbeben vom 11. März 2011 befanden sich die Blöcke 1 bis 3 im Leistungsbetrieb und die Blöcke 4 bis 6 waren wegen Unterhaltsarbeiten im Stillstand.

Die Erschütterungen des Erdbebens lösten bei den drei in Betrieb stehenden Blöcken über die Erdbeben-Instrumentierung eine Reaktor-Schnellabschaltung aus. Durch das Erdbeben fielen alle sechs Anschlussleitungen des KKW zum Stromnetz aus. Die sechs Blöcke verfügen über insgesamt dreizehn Notstromdieselgeneratoren; davon war einer wegen Unterhaltsarbeiten nicht verfügbar. Die zwölf verfügbaren Notstromdieselgeneratoren wurden erfolgreich automatisch gestartet.

Dreiviertel Stunden nach dem Erdbeben traf die grösste Tsunami-Welle ein. Sie erreichte am Standort Fukushima Daiichi eine Überflutungshöhe von etwa 15 m und zerstörte die gesamten oberirdischen, etwa 5 m über Meeresniveau als Freiluftanlagen aufgestellten Teile der Meerwasser-Pumpeinrichtungen. Anschliessend überflutete die Welle die 10 m über Meeresniveau errichtete Hauptplattform der Blöcke 1 bis 4 und der nochmals 3 m höher platzierten Blöcke 5 und 6. Dabei drang Wasser in die Untergeschosse der Maschinenhäuser ein, wo die meisten Dieselgeneratoren, aber auch gewisse Batterieanlagen und zugehörige Stromverteilungen untergebracht waren. Die Betreiberin meldete den vollständigen Ausfall der Wechselstromversorgung in den Blöcken 1 bis 5 umgehend an die Behörden.

Nach dem Doppelschlag von Erdbeben und Tsunami war folgende prekäre Lage eingetreten:

- Gesamte Wechselstromversorgung ausgefallen (ausser in Block 6, wo ein luftgekühlter Dieselgenerator verfügbar blieb) und teilweise auch die Gleichstromversorgung;
- Äussere Hauptwärmesenke (Meer) für alle Blöcke nicht mehr verfügbar;
- Schwerwiegende Einschränkungen in der Handlungsfähigkeit aufgrund der Situation in der Anlage und der Umgebungsbedingungen sowie der daraus resultierenden Belastung für die Belegschaft und die Einsatzkräfte.

Der bis in die batteriegestützten Systeme reichende Stromausfall hatte weitestgehende Funktionsverluste zur Folge, inklusive Verlust von wesentlichen Informationen zum Anlagenzustand und von Steuerfunktionen (z.B. Antriebe von Armaturen). Trümmer und Überschwemmungen behinderten Zugänge. Zu den Gefährdungen durch Nachbeben und möglicherweise weitere Tsunami kamen schon bald die massiven Einschränkungen durch Radioaktivität. Die Schadensbekämpfung innerhalb des Areals musste aus diesen Gründen wiederholt unterbrochen werden. Generell ist zu beachten, dass die Notfallmassnahmen im KKW Fukushima Daiichi im Kontext einer Naturkatastrophe nationalen Ausmasses unter schwierigsten lokalen und regionalen Bedingungen durchgeführt werden mussten.

Ein Überblick über die Akutphase in den sechs Blöcken von Fukushima Daiichi wird in Anhang A1.1 aus anlagentechnischer Sicht skizziert. Auf organisatorische Aspekte wird an dieser Stelle in der Regel nicht eingegangen. Auch auf Strahlenschutzaspekte geht die KNS nur am Rande ein, weil diese nicht zu ihrem Aufgabenkreis gehören.

Im Ergebnis wurden die Reaktorkerne der Blöcke 1 bis 3 schwer beschädigt. In der Folge kam es in den Blöcken 1 bis 4 zu je einer Wasserstoffexplosion, davon drei grosse, welche die Dachgeschosse der Reaktorgebäude der Blöcke 1, 3 und 4 komplett zerstörten. Wegen

des anhaltenden Ausfalls der Strom- und Kühlwasserversorgung ergaben sich auch Schwierigkeiten, die Kühlung der Brennelementbecken aufrechtzuerhalten. Ausserdem standen die Brennelementbecken 1 bis 4 nach den explosionsbedingten Schäden an den Reaktorgebäuden in direkter Verbindung zur Umgebungsatmosphäre (Verlust des Einschlusses). Vor allem durch die ungefilterten Druckentlastungen der Primärcontainments und die Wasserstoffexplosionen sowie ausfliessendes Wasser kam es zu grossen Freisetzungen von radioaktiven Substanzen in die Umwelt. Auch Ende 2011 waren noch nicht alle Freisetzungspfade unter vollständiger Kontrolle.

2.4 Externer Notfallschutz

Aufgrund der Notstandserklärung ordneten die Behörden schon am Abend des 11. März 2011 präventiv die Evakuierung der Bevölkerung im Umkreis von 2 km, später 3 km um das KKW an. Deren Vollzug wurde kurz nach Mitternacht bestätigt. Zuvor wurden in der Anlage und später im Areal deutlich erhöhte Strahlenpegel gemessen. In den frühen Morgenstunden des 12. März 2011 wurde der Evakuierungsradius auf 10 km erhöht, am Abend – nach der Wasserstoffexplosion in Block 1 am Nachmittag – dann auf 20 km. Dank diszipliniertem Verhalten der Bevölkerung scheinen diese Massnahmen schnell und wirkungsvoll umgesetzt worden zu sein. Später wurden situativ aufgrund der lokalen Belastung weitere Evakuierungen oder der Aufenthalt im Haus angeordnet.

Weitere Massnahmen betrafen unter anderem die Nahrungsmittelkontrolle, Kontrolluntersuchungen von Personen, Fixation oder Abwaschen von Oberflächenkontaminationen usw. Der Massnahmenkatalog ist sachbedingt langfristiger Natur.

Nach Abschluss der Akutphase ist die Strahlenbelastung vor allem in einem ca. 20 km breiten, vom KKW aus ca. 50 km in nordwestlicher Richtung abgehenden Landstreifen erhöht. Die Ortsdosisleistung liegt hier in den Randbereichen typischerweise zwanzigmal, in der Kernzone bis einige hundertmal höher als die typische Untergrundstrahlung in der Schweiz (1 mSv pro Jahr).

In der Schweiz sind als beratende Gremien des Bundes für Fragen des externen Notfallschutzes und des Strahlenschutzes in erster Linie die Eidgenössische Kommission für ABC-Schutz (KomABC) bzw. die Eidgenössische Kommission für Strahlenschutz und Überwachung der Radioaktivität (KSR) zuständig. Die KNS geht deshalb an dieser Stelle nicht weiter auf Massnahmen des externen Notfallschutzes und Aspekte des Strahlenschutzes ein.

3 Reaktion des ENSI

Nach schweizerischer gesetzlicher Vorgabe haben die Bewilligungsinhaber die Auslegung ihrer Kernkraftwerke unverzüglich zu überprüfen, wenn in einem anderen in- oder ausländischen Kernkraftwerk Ereignisse eingetreten sind, die nach der internationalen Störfall-Bewertungsskala INES der Stufe 2 oder höher zugeordnet sind.⁵ Ausserdem kann das ENSI jederzeit eine derartige Überprüfung anordnen.⁶

⁵ Art. 2 Abs. 1 Bst. c Verordnung des UVEK über die Methodik und die Randbedingungen zur Überprüfung der Kriterien für die vorläufige Ausserbetriebnahme von Kernkraftwerken (SR 732.114.5)

⁶ Art. 2 Abs. 1 Bst. d Verordnung des UVEK über die Methodik und die Randbedingungen zur Überprüfung der Kriterien für die vorläufige Ausserbetriebnahme von Kernkraftwerken (SR 732.114.5)

Aufgrund des Unfalles von Fukushima Daiichi hat das ENSI von den schweizerischen Kernkraftwerken mit bisher je fünf Verfügungen die Überprüfung der Auslegung ihrer Anlagen verlangt und auch verschiedene Massnahmen angeordnet.

Das ENSI hat die Ereignisse von Fukushima systematisch analysiert. Die Ergebnisse wurden in vier Berichten zuhanden der Öffentlichkeit zusammengefasst [ENSI Ablauf 2011] [ENSI Analyse 2011] [ENSI Lessons 2011] [ENSI Auswirkung 2011]. Für die Folgemaßnahmen in der Schweiz ist der Bericht mit den Lehren [ENSI Lessons 2011] von besonderem Interesse.

Das ENSI hat darin die Erkenntnisse aus seinen Analysen des Unfalls in 39 Lehren („Lessons Learned“) zusammengefasst. Diese basieren zum einen auf gesicherten Fakten, zum anderen auch auf Hypothesen, die das ENSI aus den verfügbaren Informationen abgeleitet hat. Nach Angaben des ENSI wurden diese Lehren im Austausch mit externen Experten aus Deutschland, Frankreich und den USA geprüft und mit den Erkenntnissen und Massnahmen von Organisationen und Aufsichtsbehörden anderer Länder verglichen. Nach Evaluation der entsprechenden Verhältnisse in der Schweiz hat das ENSI aus diesen Lehren 37 Prüfpunkte für die schweizerischen Kernkraftwerke abgeleitet. Aufgrund der Ergebnisse der EU-Stresstests [ENSI Stresstests 2011] hat das ENSI noch 8 weitere „offene Punkte“ identifiziert, die überprüft werden sollen.

3.1 Verfügung 1 vom 18. März 2011

Bereits eine Woche nach Ereigniseintritt verfügte das ENSI die unverzügliche Überprüfung der Auslegung der schweizerischen KKW bezüglich Überflutung und Erdbeben [ENSI Vf1 2011]. Genauere Vorgaben dazu folgten mit Verfügung 2.

Kurzfristig bis 31. März 2011 war zu beantworten, ob die Kühlmittelversorgung für die Sicherheits- und Hilfssysteme aus einer diversitären, erdbeben-, hochwasser- und verunreinigungs-sicheren Quelle gesichert ist. Weitere kurzfristig terminierte Fragen betrafen den Schutz der Brennelementlagerbecken gegen externe und interne Einwirkungen⁷ und deren sichere Kühlung. Falls die Analyse zur Beantwortung dieser Punkte Defizite aufzeigen sollte, war bis zum 31. August 2011 darzulegen, wie diese Defizite behoben werden.

Bis zum 1. Juni 2011 waren in einem externen Lager zusätzliche Einsatzmittel zur Bekämpfung von schweren (auslegungsüberschreitenden) Unfällen erdbeben- und überflutungssicher bereitzustellen. Bis zum 31. Dezember 2012 sind die extern zugänglichen Anschlüsse für die mobilen Einsatzmittel zu realisieren. Wo nicht vorhanden, sind bis zu diesem Datum auch zwei räumlich getrennte Zuführungen zur externen Bespeisung der Brennelementlagerbecken nachzurüsten.

3.2 Verfügung 2 vom 1. April 2011

Mit Verfügung 2 präzisierte das ENSI, mit welchen Vorgaben die Auslegung bezüglich Überflutung und Erdbeben zu überprüfen und die Einhaltung der Dosislimiten nachzuweisen ist. [ENSI Vf2 2011]

- Überflutung: Der deterministische Nachweis zur Beherrschung des 10 000-jährlichen Hochwassers war bis zum 30. Juni 2011 zu erbringen, basierend auf den Hochwassergefährdungen, die für die Rahmenbewilligungsgesuche für neue KKW neu bestimmt worden waren.

⁷ „externe und interne Einwirkungen“: Schädigende Vorgänge (mechanisch, elektrisch, thermisch, chemisch usw.), die von aussen auf die Anlage einwirken (extern) oder ihren Ursprung in der Anlage selber haben (intern).

- Erdbeben: Der deterministische Nachweis zur Beherrschung des 10 000-jährlichen Erdbebens ist bis zum 31. März 2012 zu erbringen, basierend auf seismischen Gefährdungsannahmen, die auf der Grundlage des neuen Erdbebenkatalogs des schweizerischen Erdbebendienstes (SED) und der im Rahmen des PRP⁸ erhobenen Standortdaten neu zu ermitteln sind. Vorgängig waren bis zum 30. November 2011 die Erdbebenfestigkeitsnachweise (Fragilities) für die relevanten Strukturen und Ausrüstungen einzureichen.
- Kombination von Erdbeben und Hochwasser: Die Beherrschung der Kombination von Erdbeben und erdbebenbedingtem Versagen der Stauanlagen, welche die KKW potenziell gefährden können, ist bis am 31. März 2012 nachzuweisen.

Entweder kann nachgewiesen werden, dass ein unkontrollierter Wasserabfluss aus den Stauanlagen bei Unterstellung der neuen seismischen Gefährdungsannahmen ausgeschlossen werden kann. Oder falls dieser Nachweis nicht erbracht werden kann, ist das vollständige, instantane Versagen der Stauanlagen und der Ausfall der von der Flutwelle betroffenen Kühlwasserfassungen zu unterstellen.

Für alle Nachweise sind strenge Nebenbedingungen zu beachten, insbesondere die folgenden:

- Der Ausfall der externen Stromversorgung ist zu unterstellen.
- Nur qualifizierte Ausrüstungen und Strukturen dürfen berücksichtigt werden.
- Die Anlage muss in einen sicheren Zustand überführt und ohne Zuhilfenahme externer Notfallschutzmittel während mindestens drei Tagen stabil gehalten werden können.
- Interne Notfallschutzmassnahmen können nur kreditiert werden, wenn sie vorbereitet sind, genügend grosse Zeitfenster zur Durchführung vorhanden sind und die erforderlichen Hilfsmittel auch nach dem unterstellten Ereignis zur Verfügung stehen.

3.3 Verfügungen 3 vom 5. Mai 2011

Diese Verfügungen resultierten aus der Beurteilung der Angaben, welche die KKW bis zum 31. März 2011 einzureichen hatten. Die Verfügungen 3 sind deshalb werkspezifisch. [ENSI Vf3 2011]

Von allen schweizerischen KKW ist bis zum 31. März 2012 die Erdbebenauslegung der Brennelementlagerbecken sowie der zugehörigen Gebäude und Systeme zu überprüfen. Ausserdem ist der Schutz vor Wasserstoffdeflagrationen und -explosionen im Bereich von Brennelementlagerbecken zu bewerten.

Weitere Forderungen betreffen werkspezifisch die Ertüchtigung der Brennelement-Lagerbeckenkühlung im weiteren Sinn (notfallsichere Kühlung, Nachspeisung, Überwachung, Steuerung, Erdbeben- und Überflutungssicherheit usw.).

Das KKW Mühleberg wurde verpflichtet, bis zum 31. August 2011 Massnahmen zur Nachrüstung einer erdbeben-, überflutungs- und verstopfungssicheren Kühlmittelversorgung für das Notstandssystem vorzuschlagen. Bis zum gleichen Termin hatte das KKW Beznau Vorschläge zur Verbesserung des Erdbebenverhaltens des Nebengebäudes B einzureichen.

⁸ PRP PEGASOS Refinement Project
PEGASOS Probabilistische Erdbebengefährdungsanalyse für die KKW-Standorte in der Schweiz

3.4 Verfügung 4 vom 1. Juni 2011: EU-Stresstests

Mit Verfügung 4 ordnete das ENSI die Neubewertung der Sicherheitsmargen der schweizerischen KKW im Rahmen der so genannten EU-Stresstests an [ENSI Vf4 2011]. Damit wurde die Beteiligung der Schweiz an dieser europaweiten Sicherheitsbewertung sichergestellt. Bis am 31. Oktober 2011 hatten die KKW ihren Schlussbericht einzureichen. Das ENSI hatte seinerseits den nationalen Schlussbericht bis zum 31. Dezember 2011 einzureichen. Die EU-Kommission wird im Juni 2012 dem EU-Rat einen Gesamtbericht präsentieren.

Die EU-Stresstests sind als gezielte Neubewertung der Sicherheitsmargen von KKW im Licht der Ereignisse von Fukushima definiert. Diese Neubewertung folgt der Logik der gestaffelten Sicherheitsvorsorge. Zunächst ist die Einwirkung von extremen Erdbeben oder Hochwassern oder deren Kombination zu analysieren (auslösende Ereignisse). Sodann sind die Folgen des Ausfalls von Sicherheitsfunktionen zu überprüfen, wobei ein Ausfall der Stromversorgung, der Kühlwasserversorgung und deren Kombination zu unterstellen sind. Schliesslich soll die Wirksamkeit der Notfallschutzmassnahmen überprüft werden. Generell ist das Anlagenverhalten unter den skizzierten extremen Bedingungen zu ermitteln und die Wirksamkeit der gestaffelten Massnahmen zu überprüfen. Dabei ist zu unterstellen, dass die vorhandenen Mittel und Massnahmen Zug um Zug versagen. Auf dieser Basis soll über das Anlagenverhalten und die Wirksamkeit der Massnahmen sowie über allfällige Schwächen oder Schwellenwerte berichtet werden.

3.5 Verfügungen 5 vom 10. Januar 2012

Diese Verfügungen resultierten aus der Beurteilung der Berichte, welche die KKW zu den EU-Stresstests (Verfügung 4) eingereicht hatten. Die Verfügungen 5 sind deshalb werk-spezifisch. [ENSI Vf5 2012]

Alle schweizerischen KKW müssen die seismische Robustheit der Absperrung für den Primärkreislauf und das Primärcontainment bei einem auslegungsüberschreitenden Erdbeben neu überprüfen und die Ergebnisse bis am 30. September 2012 dem ENSI einreichen.

Für die KKW Gösgen und Leibstadt müssen bis zum 30. September 2012 die Erdbebenfestigkeit der Systeme für die Containment-Druckentlastung überprüft werden und bis zum 31. Dezember 2012 sind Verbesserungsmassnahmen vorzuschlagen.

Die KKW Gösgen und Mühleberg haben eine weitere Forderung zu erfüllen, welche die mögliche Verklausung (Verstopfung durch Treibgut) der Fliesswege von Flüssen bei Engnissen oder Hindernissen, insbesondere bei Brücken oder Wehranlagen betrifft. Bis zum 30. September 2012 sind die Engstellen zu identifizieren, die bei einer vollständigen Verklausung möglicherweise einen relevanten Einfluss auf die Überflutungssituation ihrer Anlagen haben können. Die entsprechenden Verklausungsszenarien müssen im Hinblick auf die Auswirkungen auf die Anlagensicherheit bewertet werden.

Das KKW Mühleberg muss zwei weiteren Forderungen bereits bis zum 31. Januar 2012 nachkommen: Die Erdbebenfestigkeit des Steuerstabantriebssystems ist hinsichtlich Abschaltfunktion zu überprüfen. Zudem ist der Standsicherheitsnachweis, insbesondere der Nachweis der lokalen und globalen Stabilität für das Wasserkraftwerk Mühleberg einzureichen, wobei die seismischen Gefährdungen gemäss Verfügung 2 zu unterstellen sind.

3.6 Vorgehensplan des ENSI

Angaben des ENSI

Im Zwischenbericht vom 5. Mai 2011 zuhanden des Bundesrats [ENSI Status 2011] hat das ENSI den Terminplan für die vorzeitigen Sicherheitsüberprüfungen der schweizerischen KKW aufgrund des Unfalls von Fukushima bekannt gegeben. Die Termine für die Eingaben der KKW-Betreiber ergeben sich aus den Verfügungen. Zudem gab das ENSI auch die Termine für seine eigenen Stellungnahmen zu diesen Eingaben bekannt. Die entsprechende Information ist in Tabelle 1 enthalten und auf den Stand anfangs 2012 nachgeführt.

Tabelle 1: Abfolge von Überprüfungen und Massnahmen in der Schweiz aufgrund des Unfalls von Fukushima
KKB: KKW Beznau; KKG: KKW Gösgen; KKL: KKW Leibstadt; KKM: KKW Mühleberg

Datum	Wer? Was?	Thema	Termin
18.03.2011	ENSI Verfügung 1	Anordnung von Überprüfungen: – Auslegung bezüglich Erdbeben und Überflutung (hinsichtlich Ausserbetriebnahmekriterien) Termine → Verfügung 2 – gesicherte Kühlwasserversorgung ggf. Verbesserungsvorschläge – Auslegung der Brennelementbeckensysteme ggf. Verbesserungsvorschläge	 31.03.2011 31.08.2011 31.03.2011 31.08.2011
		Anordnung von Sofortmassnahmen im Bereich Notfallmanagement (Errichtung eines externen Lagers mit zusätzlichen Einsatzmitteln zur Bekämpfung von schweren Störfällen) Ggf. externe Anschlüsse für mobile Einsatzmittel sowie zwei räumlich getrennte Zuführungen für die externe Bespeisung der Brennelementlagerbecken.	01.06.2011 31.12.2012
31.03.2011	Betreiber Bericht	Angaben zur Kühlwasserversorgung und Auslegung der Brennelementbeckensysteme	
01.04.2011	ENSI Verfügung 2	Festlegung der Vorgehensweise bei der Überprüfung der Auslegung bezüglich Erdbeben und Überflutung (Ausserbetriebnahmekriterien) Termine: Überflutung Erdbebenfestigkeit Erdbebensicherheit Kombination Erdbeben und Überflutung	30.06.2011 30.11.2011 31.03.2012 31.03.2012
05.05.2011	ENSI Verfügungen 3	Ergebnisse der Überprüfung der am 31.03.2011 von den Betreibern eingereichten Berichte und daraus abgeleitete Anordnungen: – Überprüfung der Erdbebenauslegung der Brennelementbecken (inkl. Gebäude und zugehörige Systeme) – Bewertung des Schutzes vor Wasserstoffexplosionen im Bereich von Brennelementbecken	 31.03.2012 31.03.2012

Datum	Wer? Was?	Thema	Termin
05.05.2011	ENSI Verfügungen 3	Fortsetzung von vorangehender Seite: <ul style="list-style-type: none"> – Massnahmenvorschläge für die Ertüchtigung der Brennelementbeckensysteme (werkspezifisch) und ggf. der werksinternen Notfallmassnahmen nach Ausfall der Beckenkühlsysteme (werkspezifisch) – KKB und KKM: Vorlage von Notfallmassnahmen nach Ausfall der Beckenkühlsysteme – KKB: Vorschläge für Verbesserung des Erdbebenverhaltens des Nebengebäudes B – KKM: Vorschlag für Nachrüstung einer gesicherten Kühlwasserversorgung für das Notstandsystem 	31.08.2011 31.08.2011 31.08.2011 31.08.2011
01.06.2011	Betreiber Umsetzung	Errichtung eines externen Lagers mit zusätzlichen Einsatzmitteln zur Bekämpfung von schweren Störfällen	
01.06.2011	ENSI Verfügung 4	Anordnung der Durchführung der EU-Stresstests für die schweizerischen Kernkraftwerke Termine:	Fortschrittsbericht 15.08.2011 Schlussbericht 31.10.2011
30.06.2011	Betreiber Nachweis	überarbeitete Hochwassersicherheitsnachweise	
15.08.2011	Betreiber Bericht	EU-Stresstests Fortschrittsberichte	
31.08.2011	ENSI Stellungnahme	zu den Hochwassersicherheitsnachweisen vom 30.06.2011	
31.08.2011	Betreiber Bericht	Vorschläge für Verbesserungsmassnahmen in den Bereichen Brennelementbeckensysteme (alle KKW), Erdbebenverhalten der Nebengebäude B (KKB) und Kühlwasserversorgung (KKM)	
15.09.2011	ENSI Stellungnahme	zu den EU-Stresstests Zwischenberichten vom 15.08.2011	
31.10.2011	Betreiber Bericht	EU-Stresstests Schlussberichte	
15.11.2011	ENSI Stellungnahme	zu den Vorschlägen vom 31.08.2011 für Verbesserungsmassnahmen	
30.11.2011	Betreiber Nachweis	Erdbebenfestigkeitsnachweise (Fragilities) für relevante Ausrüstungen und Strukturen	
31.12.2011	ENSI Stellungnahme	zu den EU-Stresstests Schlussberichten vom 31.10.2011 (Landesbericht zuhanden EU-Kommission)	

Datum	Wer? Was?	Thema	Termin
10.01.2012	ENSI Verfügungen 5	Anordnung von Überprüfungen:	
		– seismische Robustheit der Absperrung des Primärcontainments und des Primärkreislaufs (alle KKW)	30.09.2012
		– Erdbebenfestigkeit der Containment-Druckentlastung (KKG, KKL)	Überprüfung 30.09.2012
			Massnahmenvorschläge 31.12.2012
		– Verklausung wasserbaulicher Einrichtungen (KKG, KKM)	30.09.2012
		– seismische Robustheit der Abschaltfunktion (KKM)	31.01.2012
		– Erdbebenfestigkeit des Wasserkraftwerks Mühleberg (KKM)	31.01.2012
31.01.2012	KKM Bericht	Erdbebenfestigkeit des Wasserkraftwerks Mühleberg und seismische Robustheit der Abschaltfunktion KKM	
31.03.2012	Betreiber Nachweis	Erdbebensicherheitsnachweis sowie Nachweise für die Beherrschung der Kombination von Erdbeben und erdbebeninduziertem Stauanlagenversagen	
31.03.2012	Betreiber Bericht	Schutz vor Wasserstoffexplosionen im Bereich der Brennelementbecken	
27.04.2012	EU-Stresstests Peer Review Board	Abschluss Expertenüberprüfung EU-Stresstests	
30.06.2012	EU Kommiss.	Ergebnisse EU-Stresstests	
30.06.2012	ENSI Stellungnahme	zu den Erdbebensicherheitsnachweisen vom 31.03.2012	
30.06.2012	ENSI Stellungnahme	zu den Berichten vom 31.03.2012 zum Schutz vor Wasserstoffexplosionen im Bereich der Brennelementbecken	
30.09.2012	Betreiber Bericht	Berichte:	
		– seismische Robustheit der Absperrung des Containments und des Primärkreislaufs (alle KKW)	
		– Erdbebenfestigkeit der Systeme für die Containment-Druckentlastung (KKG, KKL)	
		– Verklausung (KKG, KKM)	
31.12.2012	KKG, KKL Bericht	Massnahmenvorschläge zur Erhöhung der Erdbebenfestigkeit des Containment-Druckentlastungssystems	
31.12.2012	Betreiber Umsetzung	Nachrüstung von Anschlüssen für mobile externe Einsatzmittel	

Im Abschnitt 7 „Weiteres Vorgehen“ des Zwischenberichts [ENSI Status 2011] empfiehlt das ENSI, zur Stützung des Vertrauens der Öffentlichkeit die Schlussfolgerungen und Forderungen des ENSI einer unabhängigen Überprüfung zu unterziehen. In diesem Zusammenhang erachtet es das ENSI unter anderem als sinnvoll, wichtige Entscheide des ENSI durch die Zweitmeinung der KNS abzustützen.

Kommentar der KNS

Die KNS begrüsst die entschlossene und sachorientierte Handlungsweise des ENSI. Nach Ansicht der KNS stellt der Zeitplan für Überprüfungen und Massnahmen (vgl. Tabelle 1) sehr hohe Anforderungen an die Betreiber und an das ENSI selbst.

In Abschnitt 5 des vorliegenden Berichts nimmt die KNS zu ausgewählten Themen Stellung.

4 Bezug zum grundlegenden Sicherheitskonzept

Die nachfolgenden Ausführungen zum grundlegenden Sicherheitskonzept sind im Licht des Unfalls von Fukushima auf die Behandlung von schweren externen Ereignissen ausgerichtet.

Die KNS schickt voraus, dass Kernkraftwerke so ausgerüstet sein und betrieben werden müssen, dass schwere Kernschäden nach menschlichem Ermessen ausgeschlossen werden können. Entsprechend muss die Vorsorge darauf ausgerichtet sein, auch seltene Ereignisse, insbesondere schwere externe Ereignisse im Rahmen der Auslegung zu bewältigen, d.h. innerhalb der Sicherheitsebenen 1 bis 3 des nachfolgend skizzierten Sicherheitskonzepts. Ungeachtet der in erster Linie notwendigen, robusten Auslegung sind – in zweiter Linie – zusätzliche Notfallmassnahmen vorzusehen, um die Folgen von allenfalls doch eintretenden Kernschäden mit grossen Freisetzungen nach Möglichkeit zu begrenzen.

4.1 Sicherheitskonzept

4.1.1 Gestaffelte Sicherheitsvorsorge in fünf Sicherheitsebenen

Im international anerkannten ganzheitlichen Ansatz zur Gewährleistung der Sicherheit von Kernkraftwerken [INSAG-12] stellt das Konzept der gestaffelten Sicherheitsvorsorge (englisch: defence-in-depth concept) ein grundlegendes Element dar. Gemäss diesem Konzept wird eine Abweichung oder Fehlfunktion durch Vorkehrungen aufgefangen, die im weiteren Verlauf eines Prozesses oder Ereignisses wirksam werden. Damit werden Abweichungen und Fehlfunktionen in ihren Konsequenzen zumindest begrenzt und im Idealfall beherrscht oder kompensiert. [INSAG-12, Artikel 44]

Die Vorkehrungen werden verschiedenen Sicherheitsebenen zugeordnet. In der Regel werden fünf Ebenen unterschieden, siehe Tabelle 2.

Die ersten drei Ebenen umfassen die Auslegung der Anlage. Die Sicherheitsebene 1 kann dem Normalbetrieb zugeordnet werden, Sicherheitsebene 2 den Betriebsstörungen und Sicherheitsebene 3 den Auslegungsstörfällen. Als Betriebsstörungen werden in der Regel jene Abweichungen vom Normalbetrieb betrachtet, deren auslösendes Ereignis häufiger als

ein Mal in zehn Jahren zu erwarten ist. Unter die Auslegungsstörfälle fallen nach schweizerischem Regelwerk naturbedingte Ereignisse mit einer Häufigkeit grösser gleich 10^{-4} pro Jahr und andere, nicht naturbedingte Ereignisse mit einer Häufigkeit grösser 10^{-6} pro Jahr.⁹

Tabelle 2: Gestaffelte Sicherheitsvorsorge in fünf Sicherheitsebenen

Sicherheitsebene	Ziel	Mittel	
1 Normalbetrieb	Betriebsstörungen und Störfälle vermeiden	Betriebliche Komponenten und Systeme Betriebsführung	im Rahmen der Auslegung
2 Betriebsstörungen	Betriebsstörungen beherrschen	<i>zusätzlich:</i> Regelungs-, Begrenzungs- und Schutzeinrichtungen	
3 Auslegungsstörfälle	Anlage in sicheren Zustand überführen Störfall auf möglichst geringem Niveau beherrschen, jedenfalls keine bedeutenden Kernschäden erleiden	<i>zusätzlich:</i> Sicherheitssysteme	
4 auslegungs- — überschreitende	Auswirkungen begrenzen auf die Anlage (Einschluss der Radioaktivität)	interner Notfallschutz	schwerer Unfall
5 Störfälle	Radiologische Auswirkungen in der Umgebung lindern	externer Notfallschutz	

Die Sicherheitsebenen 4 und 5 umfassen die so genannten auslegungsüberschreitenden Ereignisse.¹⁰ In Sicherheitsebene 4 wird mit den Massnahmen des internen Notfallschutzes das Ziel verfolgt, die Auswirkungen eines schweren Störfalles zu begrenzen und den Einschluss der Radioaktivität zu erhalten. In Sicherheitsebene 5 werden Massnahmen des externen Notfallschutzes eingesetzt, um die radiologischen Auswirkungen in der Umgebung zu lindern.

4.1.2 Auslegungsstörfälle

Das übergeordnete sicherheitstechnische Mindestziel für Kernanlagen besteht darin, Auswirkungen von Störfällen auf die Umgebung möglichst ausschliessen zu können. Diese Zielsetzung ist erfüllt, wenn Störfälle den Rahmen der Auslegung, d.h. Sicherheitsebene 3 nicht überschreiten. Angesichts dieser Zielsetzung kommt der Sicherheitsebene 3 eine zentrale Bedeutung zu.

⁹ Art. 5 Abs. 4 bzw. Art. 1 Bst. a Verordnung des UVEK über die Gefährdungsannahmen und die Bewertung des Schutzes gegen Störfälle in Kernanlagen (SR 732.112.2)

¹⁰ Für die „auslegungsüberschreitenden Ereignisse“ wird häufig auch der Ausdruck „schwere Unfälle“ (Englisch: severe accidents) verwendet.

Sicherheitsebene 3 umfasst die Vorkehrungen zur Beherrschung postulierter Störfälle. Daran werden hohe Anforderungen gestellt, u.a. die folgenden:

- Die Beherrschung der Störfälle ist nachzuweisen. Dazu gehört auch der Nachweis, dass die radiologischen Belastungen ausserhalb der Anlage unterhalb vorgegebener Grenzwerte bleiben.
- Die Nachweise sind konservativ zu führen, d.h. es sind jeweils ungünstige Bedingungen anzunehmen, Sicherheitszuschläge anzuwenden, usw.
- Für den Nachweis der Beherrschung werden nur Einrichtungen berücksichtigt, deren Eignung hierfür nachgewiesen ist.
- Die erforderlichen Funktionen müssen mit sehr hoher Verfügbarkeit erfüllt werden, z.B. werden technische Sicherheitssysteme regelmässig geprüft; aktive Systeme sind redundant vorhanden, usw.
- Kurzfristig erforderliche Massnahmen müssen automatisch aufgrund mehrerer unabhängiger Signale erfolgen.
- Das Personal wird in der Anwendung der Massnahmen regelmässig geschult und handelt nach vorbereiteten Anweisungen.
- Ein Ereignis darf keine oder nur sehr begrenzte Kernschäden zur Folge haben.

Die Vorkehrungen für die Störfallbeherrschung in Sicherheitsebene 3 sind die wichtigste Garantie für die Sicherheit von Mensch und Umwelt.

4.1.3 Auslegungsüberschreitende Störfälle

Obwohl die Vorkehrungen der Sicherheitsebene 3 auch seltene Ereignisse abdecken, kann nicht ausgeschlossen werden, dass Ereignisse auftreten, die über die Auslegung hinausgehen. Beispielsweise könnte ein stärkeres als für die Auslegung postuliertes Erdbeben auftreten. Solche Ereignisse sind sehr unwahrscheinlich, wenn die Gefährdungsannahmen sachgemäss, d.h. entsprechend den Zielvorgaben für die Häufigkeit von Auslegungsstörfällen festgelegt werden. Der Rahmen der Auslegung kann überschritten werden, wenn das auslösende Ereignis oder Art und Anzahl zusätzlicher Fehler den Rahmen der Auslegung durchbrechen.

Es wird erwartet, dass bei Ereignissen, deren Häufigkeit mindestens um eine Grössenordnung unter der Auslegung (vgl. Abschnitt 4.1.1) liegt, gravierende Freisetzungen von Radioaktivität vermieden werden. Für die Beherrschung oder die Begrenzung der Auswirkungen derartiger Ereignisse werden so genannte anlageninterne Notfallmassnahmen vorgesehen; diese werden der Sicherheitsebene 4 zugeordnet.

Wegen der geringen Eintrittswahrscheinlichkeit solcher Ereignisse werden an die Massnahmen der Sicherheitsebene 4 geringere Nachweisanforderungen als für Auslegungsstörfälle gestellt, u.a. die folgenden:

- Die in der allgemeinen Technik übliche Konservativität wird angewendet.
- Redundanz ist in der Regel nicht erforderlich.
- Die Massnahmen werden in der Regel von Hand eingeleitet.
- Falls Kernschäden nicht vermieden werden können, sollen die Auswirkungen nach aussen begrenzt werden. Dies soll so wirksam wie möglich erfolgen, Grenzwerte werden nicht vorgegeben.

Für diese Notfallmassnahmen ist selbstverständlich vorausgesetzt, dass sie bei den (erschwer-ten) Bedingungen wirksam sind, die im Notfall auch tatsächlich vorherrschen. Für den Fall, dass dennoch Freisetzungen nach aussen auftreten, sind in Sicherheitsebene 5 Notfallschutzmassnahmen in der Umgebung der Anlage vorgesehen.

4.2 Das Sicherheitskonzept und der Unfall in Fukushima Daiichi

4.2.1 Auslegung gegen Erdbeben

Am 11. März 2011 wurde der Nordosten Japans vom stärksten bisher in Japan gemessenen Erdbeben erschüttert. Die gemessenen Maximalbeschleunigungen in den am stärksten betroffenen KKW lagen im Bereich der Auslegung bzw. der Requalifikation, an einigen Messstellen auch darüber. Das Erdbeben lag somit im oberen Grenzbereich der Auslegung (Sicherheitsebene 3).

Nach vorliegenden Angaben hatten die Erschütterungen keine folgenreichen Schäden an den Kernanlagen zur Folge. Insbesondere waren die Notstromgeneratoren noch verfügbar. Nach vorliegenden Informationen haben die Systeme, die nach dem Erdbeben und vor dem Eintreffen des Tsunami angefordert wurden, funktioniert. Vorbehältlich anderslautender Ergebnisse von detaillierteren Untersuchungen kann davon ausgegangen werden, dass die Vorkehrungen in Sicherheitsebene 3 für das schwere Erdbeben ausreichend waren.

4.2.2 Auslegung gegen Tsunami

Durch das Erdbeben wurde ein grosser Tsunami ausgelöst. Die der Auslegung zugrunde gelegte Tsunami-Höhe wurde am Standort Fukushima Daiichi etwa um das Doppelte übertroffen.

Durch die Flutwelle wurden die Meerwasser-Pumpanlagen zerstört sowie die Untergeschosse der Maschinenhäuser mit den Notstromgeneratoren und Teilen der Gleichstromanlagen überflutet. Damit waren die äussere Hauptwärmesenke, die Wechselstromversorgung und teilweise auch die Gleichstromversorgung ausgefallen. Mit diesem Schadensbild war die Auslegungsbasis überschritten.

Wie berichtet wird [ExpBerBW 2011] [Nöggerath et al. 2011], sind laut einer früheren japanischen Publikation [Minoura 2001] Tsunamis der im März 2011 beobachteten Stärke mit einer Wiederkehrperiode von 800 bis 1100 Jahren zu erwarten. Nach üblichen Auslegungsgrundsätzen sind Gefährdungen dieser Häufigkeit durch die Auslegung abzudecken. Dies war aber nicht der Fall; somit war die Auslegung gegen Tsunami gravierend mangelhaft und die Vorkehrungen der Sicherheitsebene 3 gegen Tsunami waren entsprechend ungenügend.

Diese ungenügende Auslegung gegen Tsunami ist die Hauptursache für den Unfall.

4.2.3 Notfallmassnahmen

Wie oben dargelegt war mit dem Tsunami die Auslegungsbasis überschritten. Nach erfolgreicher Abschaltung der in Betrieb stehenden Reaktoren verblieb als sicherheitstechnisch wichtigste Aufgabe, mit Notfallmassnahmen (Sicherheitsebene 4) in erster Linie die Kühlung der Reaktorkerne sicherzustellen, mittelfristig auch die Kühlung der Brennelementlagerbecken. Einen Einblick in Anstrengungen, die in Fukushima dafür unternommen wurden, und in Gründe für deren Scheitern vermitteln die Schilderungen im Anhang zum Störfallverlauf in den Blöcken 1 bis 3 (Abschnitte A1.1.1 bis A1.1.3).

Wie im Ergebnis bekannt ist, konnte der Ereignisverlauf in den Blöcken 1 bis 3 des KKW Fukushima Daiichi auch im Rahmen von Sicherheitsebene 4 nicht unter Kontrolle gebracht werden und es kam zu Kernschmelzen. Dass für die Kühlung als wichtigste Funktion im Prinzip noch Möglichkeiten vorhanden waren, wenn auch in sehr eingeschränktem Mass, kann aufgrund des Verlaufs in Block 3 erkannt werden: Hier blieb die Notkühlung während immerhin fast drei Tagen genügend, ohne dass eine äussere Wärmesenke verfügbar gewesen wäre.

Verschiedene allgemeine Gründe sind erkennbar, weshalb die Kontrolle im Rahmen von Sicherheitsebene 4 nicht wiedererlangt werden konnte und schliesslich grosse Mengen an radioaktiven Substanzen freigesetzt wurden. Beispiele:

- Der Ausfall der Stromversorgung hat sehr weitreichende Folgen. Ohne Wechselstromversorgung fehlt insbesondere die Antriebsenergie für die meisten Pumpen und Armaturen. Ohne Gleichstromversorgung fallen Messwertanzeigen, Steuerungen, gleichspannungsversorgte Armaturen, die Notbeleuchtung in allen Räumen und speziell auch in der Betriebswarte aus.
- Erdbeben und Tsunami hatten eine nationale Katastrophe verursacht. Die Möglichkeiten externer Hilfe waren beschränkt. U.a. gab es auch Probleme mit dem Kommunikations- und dem Verkehrsnetz.
- Alle sechs Blöcke am Standort waren betroffen, insbesondere die drei Blöcke, die vor dem Ereignis in Betrieb waren. Für die Betriebsorganisation ergab sich damit eine extrem anspruchsvolle Situation.
- Die Organisationsstrukturen mit Zuordnung von Entscheidungskompetenzen bei der Betreiberin im KKW und bei der Muttergesellschaft sowie beim Staat auf nationaler und regionaler Ebene wirkten sich erschwerend aus und verzögerten zum Teil wichtige Notfallmassnahmen.
- Verschiedene Vorkehrungen konnten nicht wirkungsvoll umgesetzt werden. Folgende Beispiele seien erwähnt:
 - Mobile Stromversorgungseinheiten wurden eingesetzt. Dabei ergaben sich zunächst Verzögerungen wegen der nationalen Katastrophenlage und nachfolgend Schwierigkeiten mit dem Anschluss. Zerstörungen durch die Wasserstoffexplosionen machten erzielte Fortschritte teilweise wieder zunichte.
 - Für die Abfuhr der Nachwärme waren im Prinzip technische Einrichtungen vorhanden: Block 1 verfügte mit dem Isolation Condenser (siehe Anhang, Abschnitt A1.1.1) über ein passives Wärmeabfuhrsystem. In Block 2 und 3 waren dampfgetriebene Hochdruckeinspeisesysteme vorhanden (RCIC, siehe Anhang, Abschnitt A1.1.2, und HPCI, siehe Anhang, Abschnitt A1.1.3) und die Energie hätte mit Abblasen von Dampf aus dem Primärcontainment abgeführt werden können. Damit hätten Kernschäden verhindert werden können, solange Wasser für die Nachspeisung zur Verfügung stand („feed and bleed“). Aber die für diese Verfahren erforderliche Steuer- und Regeltechnik funktionierte mangels Stromversorgung nicht.
 - Anschlüsse für notfallmässige Wassereinspeisungen in die Reaktordruckgefässe mit behelfsmässigen Pumpen (z.B. Feuerwehr) waren offenbar vorhanden. Aber fest installierte Feuerlöschpumpen mit Dieselmotor versagten aus verschiedenen, unklaren Gründen. Von zunächst drei Feuerlöschfahrzeugen auf Platz fiel eines dem Tsunami zum Opfer und die verbleibenden konnten wegen tsunamibedingten Hindernissen im Areal nicht mehr frei verschoben werden. Ausserdem war das Löschwassernetz beschädigt, sodass die Feuerlöschfahrzeuge direkt ab Vorratstank Wasser fördern mussten, bis schliesslich auch dieser Vorrat erschöpft war. Nicht zuletzt konnte der Druck in den Reaktordruckgefässen der Blöcke 2 und 3 wegen der Störungen im Steuersystem längere Zeit nicht abgesenkt werden, so dass wegen des hohen Gegendrucks nicht rechtzeitig eingespeist werden konnte.

- Vorrichtungen zur Druckentlastung der Primärcontainments waren zwar vorhanden, aber offensichtlich nicht für eine Bedienung von Hand und unter radiologisch erschwerten Bedingungen ausgelegt. Insbesondere wegen des Ausfalls der Stromversorgung und damit der Steuerung mussten die notwendigen Schalthandlungen bei den Ventilen vor Ort improvisiert werden. Daraus ergaben sich z.B. beim Block 1 aus anlagentechnischen und radiologischen Gründen grosse Verzögerungen. Beim Block 2 scheint die Freischaltung nicht gelungen zu sein, wobei der genaue Grund offen bleibt.
- Lange Entscheidungswege und nicht störfallfeste Armaturen trugen dazu bei, dass die Primärcontainments nicht rechtzeitig druckentlastet werden konnten und der Containmentdruck bis etwa auf den doppelten Auslegungsdruck anstieg. Wie auch die erhöhten Strahlenpegel im Areal nahelegen, führte dies zu Leckagen. Derartige Leckagen dürften auch eine wesentliche Voraussetzung für die Wasserstoffexplosionen gewesen sein.
- Ein Filtersystem für die Rückhaltung von radioaktiven Substanzen bei der Containment-Druckentlastung ist nicht vorhanden. Das Filtersystem für die Abluft bei normalen Betriebszuständen ist dafür nicht geeignet und wird bei einer Druckentlastung umgangen.

Insgesamt ergibt sich, dass die Vorkehrungen für Notfallmassnahmen in verschiedener Hinsicht lückenhaft waren. Die Notfallmassnahmen – soweit sie vorhanden waren – entsprachen nicht der Anforderung, dass sie unter den im Notfall gegebenen Bedingungen funktionieren. Ein entscheidender beitragender Faktor war im vorliegenden Störfallverlauf der Verlust der Notstromversorgung und von grossen Teilen der Gleichstromversorgung. Aus diesem Grund fielen die möglichen und in den verschiedenen Blöcken über unterschiedlich lange Zeiten auch funktionierenden Massnahmen zur Kernkühlung sowie mögliche Massnahmen zur Brennelement-Beckenkühlung aus.

Zusammenfassend sei nochmals auf die Bedeutung der ungenügenden Auslegung gegen Tsunami hingewiesen. Dies führte zur Überflutung; deswegen fielen zunächst die für die Störfallbeherrschung gemäss Auslegung vorgesehenen Massnahmen (Sicherheitsebene 3) und darüber hinaus mögliche Notfallmassnahmen (Sicherheitsebene 4) durch ein und dasselbe Ereignis aus.

4.2.4 Notfallschutzmassnahmen ausserhalb der Anlage

Mit Massnahmen des externen Notfallschutzes (Sicherheitsebene 5) werden die radiologischen Konsequenzen von Störfällen gelindert.

Aufgrund der Notstandserklärung nach dem Tsunami ordneten die Behörden schon am Abend des 11. März 2011 präventiv die Evakuierung der Bevölkerung im Umkreis von 2 km, später 3 km um das KKW an. Nachdem die Strahlungspegel im Areal des KKW Fukushima Daiichi angestiegen waren und absehbar war, dass Druckentlastungen der Primärcontainments mit Freisetzung von Radioaktivität notwendig wurden, wurde der Evakuierungsradius ausgeweitet. Dank diszipliniertem Verhalten der Bevölkerung scheinen diese Massnahmen schnell und wirkungsvoll umgesetzt worden zu sein. Nach den Freisetzungen wurde situativ für weitere Gebiete der Aufenthalt im Haus oder die Evakuierung angeordnet.

Weitere Massnahmen betrafen unter anderem die Nahrungsmittelkontrolle, radiologische Personenkontrollen, Fixation oder Abwaschen von Oberflächenkontaminationen. Der Massnahmenkatalog ist sachbedingt langfristiger Natur. Die KNS geht an dieser Stelle nicht weiter darauf ein.¹¹

¹¹ Als beratende Gremien des Bundes für Fragen des externen Notfallschutzes und des Strahlenschutzes sind in erster Linie die Eidgenössische Kommission für ABC-Schutz (KomABC) bzw. die Eidgenössische Kommission für Strahlenschutz und Überwachung der Radioaktivität (KSR) zuständig.

4.3 Überprüfung der schweizerischen Kernkraftwerke

Wie in Abschnitt 4.2 aufgezeigt wird, kann der Unfall von Fukushima darauf zurückgeführt werden, dass das international übliche Sicherheitskonzept in unzureichender Weise umgesetzt worden ist. Insbesondere war der Auslegung (Sicherheitsebene 3) für das Naturereignis Tsunami eine deutlich zu geringe Intensität dieser Einwirkung zugrunde gelegt. Sodann waren für die eingetretene Intensität keine wirksamen Notfallmassnahmen vorhanden (Sicherheitsebene 4).

Mit der Sicherheitsüberprüfung der schweizerischen KKW ist sicherzustellen, dass die in den einzelnen Sicherheitsebenen vorgesehenen Massnahmen ausreichend robust sind. Im Licht des Unfalles von Fukushima sind vor allem die folgenden Fragen zu beantworten:

- Sind die Kernkraftwerke ausreichend gegen die Gefährdungen aus Naturereignissen ausgelegt? (Sicherheitsebene 3)

Das beinhaltet die Überprüfung, ob gegen schwere Ereignisse, wie sie im Auslegungsrahmen zu unterstellen sind, ausreichend konservative Vorkehrungen vorhanden sind. Nach schweizerischer Gesetzgebung sind die Gefährdungsannahmen bezüglich Naturereignissen so festzulegen, dass die Häufigkeit einer Überschreitung kleiner als 10^{-4} pro Jahr ist.¹² Folgeereignisse und sachlich naheliegende Ereigniskombinationen sind zu berücksichtigen. Die Zuverlässigkeit und die Konservativität der Vorkehrungen zu ihrer Beherrschung sollen vergleichbar mit jenen der Sicherheitsmassnahmen gegen interne Störfälle sein.

Das ENSI hat mit den Verfügungen 1 und 2 entsprechende Überprüfungen bezüglich Überflutung und Erdbeben eingefordert. Die KNS äussert sich dazu in den Abschnitten 5.1.1 und 5.1.2.

- Sind für auslegungsüberschreitende Naturereignisse in angemessener Tiefe Massnahmen vorhanden, die unter Notfallbedingungen anwendbar sind? (Sicherheitsebene 4)

Zu prüfen ist, welche Bedingungen sich einstellen, wenn schwerere Ereignisse auftreten, als in der Auslegung unterstellt. Dafür sollen auch die Gefährdungen aufgrund von auslösenden Ereignissen betrachtet werden, die um eine Grössenordnung weniger häufig sind als die Auslegungsereignisse. Angesichts der Ereignisse von Fukushima sollen Ereigniskombinationen und mögliche Folgeereignisse vermehrt in die Analyse einbezogen werden. Auch für derartige Situationen sollen Notfallmassnahmen vorhanden sein, die unter den dann zu erwartenden Bedingungen wirksam sind. Wenn also eine Ereigniskombination eingetreten ist, welche die auslegungsgemäss vorgesehenen Funktionen unwirksam werden lässt, so dürfen durch diese Ereigniskombination nicht auch gleichzeitig die Notfallmassnahmen unbrauchbar werden, die an die Stelle der ausgefallenen Funktionen treten sollen. Die Notfallmassnahmen sollen geeignet sein, zumindest gravierende Auswirkungen eines Ereignisses oder einer Ereigniskombination zu vermeiden.

Auf die Identifizierung von Sicherheitsreserven zielen die so genannten EU-Stresstests. Im Licht von Fukushima stehen die naturbedingten Ereignisse Erdbeben und Überflutung im Vordergrund. Das ENSI hat die Betreiber mit Verfügung 4 (siehe Abschnitt 3.4) verpflichtet, die EU-Stresstests auch für die schweizerischen Kernkraftwerke durchzuführen. Die termingerecht eingereichten Unterlagen wurden vom ENSI zuhanden der EU überprüft und ausgewertet. Das ENSI hat die Ergebnisse im Landesbericht [ENSI Stresstests 2011] zusammengefasst und der europäischen Leitinstanz ENSREG¹³ zugestellt.

¹² Art. 5 Abs. 4 Verordnung des UVEK über die Gefährdungsannahmen und die Bewertung des Schutzes gegen Störfälle in Kernanlagen (SR 732.112.2)

¹³ European Nuclear Safety Regulators Group

Empfehlung 4.3

Die Wirksamkeit der internen Notfallmassnahmen (Sicherheitsebene 4) soll periodisch überprüft werden. Dabei sollen Ereigniskombinationen und mögliche Folgeereignisse vermehrt berücksichtigt werden.

5 Lehren

Die KNS geht im Folgenden auf ausgewählte Themenkreise ein:

- Vorsorge / Auslegung (Abschnitt 5.1)
- Massnahmen gegen schwere Störfälle / Interner Notfallschutz (Abschnitt 5.2)
- Externer Notfallschutz (Abschnitt 5.3)
- Sicherheitsinfrastruktur (Abschnitt 5.4)

Die aufgegriffenen Themen werden wie folgt behandelt: Fallweise wird in einem Unterabschnitt auf relevante Gegebenheiten in Japan bzw. in Fukushima Daiichi Bezug genommen (*Angaben zu Japan* bzw. *Fukushima Daiichi*). Sodann werden in einem Unterabschnitt für das Thema relevante Aspekte der Situation in der Schweiz dargelegt (*Zum Sachstand in der Schweiz*). Dazu können auch Aktionen und Prüfpunkte des ENSI im Zug der Aufarbeitung des Unfalles von Fukushima und gegebenenfalls bereits vorliegende Ergebnisse gehören. Schliesslich folgt in einem letzten Unterabschnitt die *Beurteilung durch die KNS*, gegebenenfalls mit Anregungen oder formellen Empfehlungen.

5.1 Vorsorge / Auslegung

5.1.1 Auslegung gegen Erdbeben

Angaben zu Japan

Aufgrund von neueren Erkenntnissen der Erdbebenforschung wurden die Anforderungen an die Erdbebenfestigkeit in Japan in den vergangenen Dekaden erhöht und die KKW für diese höheren Werte requalifiziert.¹⁴

Am Nachmittag des 11. März 2011 ereignete sich vor der Nordostküste Japans ein schweres Erdbeben. Dessen Momenten-Magnitude wird mit 9.0 angegeben; dies ist die grösste seit Beginn der Aufzeichnungen in Japan gemessene Magnitude.

Die gemessenen Maximalbeschleunigungen in den am stärksten betroffenen KKW lagen im Bereich der Auslegung bzw. der Requalifikation, an einigen Messstellen auch darüber. Angesichts der vereinzelt bzw. in Teilen des Frequenzspektrums gemessenen Überschreitungen bleibt offen, wie weit die zuletzt gültige Auslegungsbasis in Fukushima Daiichi den üblichen Auslegungsgrundsätzen für Naturereignisse entspricht.

¹⁴ Requalifikation: Nachweis, dass die Auslegungsbasis veränderte, höhere Anforderungen erfüllt.

Es gibt keine Hinweise, dass wichtige Sicherheitssysteme aufgrund der Erdbeben nicht verfügbar gewesen wären. Trotz punktuellen Überschreitungen der Auslegungsbasis hatten die Erschütterungen nach vorliegenden Angaben keine folgenreichen Schäden an den Kernanlagen zur Folge. Daraus darf geschlossen werden, dass die Nachweismethoden der Requalifikation belastbar sind. Allerdings ist die KNS der Ansicht, dass das Ausbleiben von folgenreichen Erdbebenschäden durch vertiefte Überprüfungen der betroffenen Anlagen noch im Detail bestätigt werden müsste. Ob und wann solche Untersuchungen in Fukushima Daiichi möglich sein werden, ist wegen der radiologischen Situation und der Folgen der Wasserstoffexplosionen ungewiss.

Zum Sachstand in der Schweiz

Vorbemerkung: Die Erdbebengefährdung in der Schweiz ist mit der Situation in Japan nicht vergleichbar. Japan liegt im Randbereich von mehreren kontinentalen Platten und der pazifischen Platte. Die teilweise grossen gegenseitigen Bewegungen der Platten verursachen starke Erdbeben. Das Gebiet der Schweiz ist in der aktuellen geologischen Gesamtsituation deutlich weniger exponiert. Generell ist die Erdbebengefährdung in Japan deshalb wesentlich höher als in der Schweiz.

Nach Einführung der probabilistischen Sicherheitsanalysen und damit verbundenen Erkenntnissen der Erdbebenforschung wurde gegen Ende des letzten Jahrhunderts erkannt, dass die im Rahmen der Auslegung zu berücksichtigenden Erdbeben deutlich stärker ausfallen können, als zur Bauzeit der KKW der Generation II aufgrund von historisch bekannten Erdbebenaten angenommen worden war.

Die schweizerische Aufsichtsbehörde hat 1999 von den KKW-Betreibern verlangt, die Erdbebengefährdung nach den neuesten Methoden zu bestimmen. Im Projekt PEGASOS¹⁵ liessen die schweizerischen KKW-Betreiber die Erdbebengefährdung an den KKW-Standorten in der Schweiz nach neuestem Stand der Technik ermitteln. Die Studie wurde 2004 abgeschlossen [HSK 2007]. Eine Herausforderung stellt die grosse Bandbreite der Ergebnisse dar, welche nicht zuletzt darauf zurückzuführen ist, dass für starke Erdbeben in den hiesigen Regionen kaum Erfahrungswerte vorliegen [HSK 2007, pp. II, 11, 13]. In einem Folgeprojekt (PEGASOS Refinement Project, PRP) werden die PEGASOS-Resultate verfeinert und die Standorteigenschaften der KKW detaillierter untersucht. Diese Resultate werden voraussichtlich 2012 vorliegen [ENSI Vf2 2011]. Zwischenzeitlich haben die Betreiber der schweizerischen KKW umfangreiche Erdbebenertüchtigungsmassnahmen in ihren Anlagen realisiert und sind von der Aufsichtsbehörde aufgefordert, die Möglichkeiten und den Nutzen von weiteren risikomindernden seismischen Ertüchtigungen komponentenspezifisch zu untersuchen. Basierend auf den Erkenntnissen aus PEGASOS hat die Aufsichtsbehörde im Jahr 2005 verschärfte Erdbebengefährdungsannahmen für die probabilistischen Sicherheitsanalysen (PSA) festgelegt. Die neu vorgegebenen Erdbebengefährdungskurven entsprechen den PEGASOS-Gefährdungskurven mit um 20 % reduzierten Bodenbeschleunigungen. Sie führten in Kombination mit den damals vorliegenden Erdbebenmodellen dazu, dass der seismische Anteil am Risiko der schweizerischen KKW zunahm. [HSK 2007, S. 12]

Das ENSI verfolgt die Frage der Gefährdungsannahmen für Erdbeben im Rahmen der Fukushima Folgemaassnahmen unter Prüfpunkt 1 [ENSI Lessons 2011]. Mit Verfügung 1 vom 18. März 2011 hat das ENSI die Überprüfung der Auswirkung von Erdbeben angeordnet und in Verfügung 2 vom 1. April 2011 die Vorgehensweise vorgegeben. Da die endgültigen PRP-Resultate noch nicht vorliegen, muss sich die Auslegungsüberprüfung auf aktuelle Zwischenergebnisse zur Erdbebengefährdung abstützen. Bis zum 30. November 2011 waren die Erdbebenfestigkeitsnachweise (Fragilities) für die zur Beherrschung des 10 000-jährlichen Erdbebens

¹⁵ PEGASOS Probabilistische Erdbebengefährdungsanalyse für die KKW-Standorte in der Schweiz

relevanten Ausrüstungen einzureichen. Der deterministische Nachweis der Beherrschung des 10 000-jährlichen Erdbebens ist mit Hilfe der obgenannten, neu bestimmten Erdbebenfestigkeitsnachweise bis zum 31. März 2012 zu erbringen.

Gemäss Verfügung 2 vom 1. April 2011 sind ausserdem bis zum 31. März 2012 die deterministischen Erdbebennachweise für die Stauanlagen, deren Versagen Auswirkungen auf schweizerische KKW haben könnte, auf der Grundlage des neuen Erdbebenkatalogs¹⁶ des Schweizerischen Erdbebendienstes zu überarbeiten. Damit wird den besonders grossen Anforderungen aus der Kombination von Erdbeben und Hochwasser Rechnung getragen.

Weitere Untersuchungen, insbesondere im auslegungsüberschreitenden Bereich, waren im Rahmen der EU-Stresstests gemäss ENSI-Verfügung 4 vom 1. Juni 2011 durchzuführen. Diesen Untersuchungen waren die Erdbebengefährdungen zu Grunde zu legen, die der aktuellen Auslegungsbasis entsprechen. Die veröffentlichten Ergebnisse [ENSI Stresstests 2011, Tab. 2-3 bis 2-5] zeigen, dass je nach Kernkraftwerk bei einzelnen Sicherheitsfunktionen nur geringe oder keine Sicherheitsmargen bestehen. Entsprechend hat das ENSI in den Verfügungen 5 vom 10. Januar 2012 werkspezifisch Überprüfungen der seismischen Robustheit der Absperrfunktion und der Druckentlastung des Primärcontainments sowie der Abschaltfunktion angeordnet. Bereits aufgrund der Ergebnisse der Überprüfungen gemäss Verfügung 1 vom 18. März 2011 hatte das ENSI mit den Verfügungen 3 vom 5. Mai 2011 verlangt, dass die Erdbebenauslegung der Brennelementbecken zu überprüfen ist und werkspezifisch Massnahmen zur Ertüchtigung der Brennelementbeckenkühlung vorzuschlagen sind.

Laut Angaben im Landesbericht [ENSI Stresstests 2011] überprüft das ENSI die Frage, ob die Signale der Erdbebeninstrumentierung verwendet werden sollen, um eine frühzeitige Schnellabschaltung von Kernreaktoren auszulösen.

Für den Nachweis des ausreichenden Schutzes gegen Störfälle, die durch Naturereignisse ausgelöst werden, sind nach geltendem schweizerischem Recht Gefährdungen mit einer Häufigkeit grösser gleich 10^{-4} pro Jahr zu berücksichtigen¹⁷; massgebend ist somit das 10 000-jährliche Ereignis. Der so festgelegte Auslegungsstörfall wird gemäss UVEK-Verordnung¹⁸ der Störfallkategorie 3 zugeordnet und unterliegt somit einer Dosislimite von 100 mSv¹⁹.

Beurteilung durch die KNS

Mit den Nachweisforderungen des ENSI gemäss Verfügungen 1 und 2 sowie den EU-Stresstests (Verfügung 4) wird die Vorsorge gegen Erdbeben in den Sicherheitsebenen 3 und 4 überprüft. Die KNS weist darauf hin, dass die Untersuchungen im Rahmen der EU-Stresstests auf Basis der Erdbebengefährdungen durchgeführt wurden, welche aus den späten Siebzigerjahren stammen und die gegenwärtige Auslegungsbasis der schweizerischen Kernkraftwerke darstellen. Die Ergebnisse belegen für die unterstellte Gefährdung mehrheitlich eine genügende Vorsorge; allerdings werden werkspezifisch und punktuell für einige Strukturen und Funktionen geringe oder keine Sicherheitsmargen ausgewiesen. Das ENSI hat entsprechende weitere Massnahmen angeordnet.

¹⁶ Aktuelle Version: Earthquake Catalog of Switzerland 2009 (ECOS-09), www.seismo.ethz.ch

¹⁷ Art. 5 Abs. 4 Verordnung des UVEK über die Gefährdungsannahmen und die Bewertung des Schutzes gegen Störfälle in Kernanlagen; SR 732.112.2 (hier: UVEK-Verordnung)

¹⁸ Art. 1 Bst. a Ziff. 3 Verordnung des UVEK über die Gefährdungsannahmen und die Bewertung des Schutzes gegen Störfälle in Kernanlagen (SR 732.112.2)

¹⁹ Art. 94 Abs. 5 Strahlenschutzverordnung (StSV, SR 814.501)

Die Resultate der Überprüfungen aufgrund der neueren Erdbebengefährdungen, die auf vorläufigen Ergebnissen des PEGASOS Refinement Projects basieren und höhere Anforderungen stellen, werden erst per 31. März 2012 eingereicht und liegen somit noch nicht vor. Die KNS wird die Thematik weiterverfolgen.

Über die Fukushima-Folgemaassnahmen hinaus stellt die KNS fest, dass die Fragen der massgebenden Erdbebengefährdung mittlerweile seit mehr als zehn Jahren hängig sind. Die KNS empfiehlt deshalb:

Empfehlung 5.1.1

Die Untersuchungen zur Bestimmung der Erdbebengefährdung der schweizerischen Kernkraftwerke (PEGASOS Refinement Project) sind zeitnah zu einem Abschluss zu bringen und die massgebenden Erdbebengefährdungen durch das ENSI festzulegen.

Die KNS begrüsst die Prüfung der Frage, ob eine Schnellabschaltung auch über die Erdbeneninstrumentierung ausgelöst werden soll.

Die Zuordnung des Sicherheitserdbebens als 10 000-jährliches Ereignis zur Störfallkategorie 3 entspricht den Vorgaben der Verordnung des UVEK über die Gefährdungsannahmen und die Bewertung des Schutzes gegen Störfälle in Kernanlagen (SR 732.112.2). In allgemeiner Betrachtung zur Systematik der Nachweisführung ist dazu anzumerken, dass das 10 000-jährliche Ereignis (Häufigkeit 10^{-4} pro Jahr) die Grenze zwischen Störfallkategorie 2 und 3 bildet: Die Kategorie 2 umfasst Störfälle der Häufigkeit 10^{-2} pro Jahr bis 10^{-4} pro Jahr, die Kategorie 3 Störfälle der Häufigkeit 10^{-4} pro Jahr bis 10^{-6} pro Jahr. Da die Anforderungen mit abnehmender Häufigkeit steigen, ist das 10 000-jährliche Ereignis hinsichtlich sicherheitstechnischer Anforderungen abdeckend für Störfälle der Kategorie 2 (Dosislimite 1 mSv)²⁰ und müsste nach üblichen Regeln der konservativen Nachweisführung der Störfallkategorie 2 zugewiesen werden. Die Zuordnung des 10 000-jährlichen Ereignisses zu Kategorie 3 (Dosislimite 100 mSv) kommt in der aktuellen gesetzlichen Regelung durch die Grenzwertzuordnung („Häufigkeit grösser gleich 10^{-4} pro Jahr“) in Abs. 1 Bst. a Ziff. 3 der UVEK-Verordnung zustande. Diese Zuordnung entspricht bezüglich Sicherheitserdbeben auch der historisch gewachsenen Usanz. Aufgrund der obigen systematischen Überlegungen regt die KNS an, die Grenzwertzuordnung gemäss UVEK-Verordnung im Kontext des geltenden Regelwerks juristisch zu überprüfen. In der Sache ist die KNS im Fall der Erdbebengefährdung der Ansicht, dass die Bestimmung der Gefährdungsannahmen auf Basis von PEGASOS sowie die Vorgaben für den deterministischen Sicherheitsnachweis (inklusive anwendbare Dosislimite) im internationalen Vergleich anspruchsvoll sind und somit ein gutes Sicherheitsniveau gewährleisten.

5.1.2 Auslegung gegen Überflutung

Angaben zu Japan

Auf das Erdbeben vom 11. März 2011 folgte ein Tsunami, dessen höchste Welle im KKW Fukushima Daiichi eine Überflutungshöhe von 14 m bis 15 m über Meeresniveau erreichte. Dadurch wurden die gesamten Meerwasser-Pumpenanlagen zerstört und die 10 m bis 13 m über dem Meer gelegenen Hauptplattformen überflutet, auf denen die Hauptgebäude der Reaktoranlagen stehen. Sodann wurden Räume überflutet, in denen Notstromdieselgeneratoren und Gleichstrom-Verteilungsanlagen installiert sind.

²⁰ Art. 94 Abs. 4 Strahlenschutzverordnung (SR 814.501)

Das KKW Fukushima Daiichi war ursprünglich für eine Tsunami-Höhe von 3.1 m ausgelegt worden. In einer Neu beurteilung im Jahr 2002 wurde von einem maximalen Überflutungs-niveau von 5.7 m ausgegangen; entsprechende Schutzmassnahmen wurden nachgerüstet. Die Betreiber-gesellschaft TEPCO führte im Jahr 2006 eine probabilistische Studie zur Tsunami-Gefährdung durch. Darin wird die Häufigkeit für einen Tsunami mit mehr als 6 m Wellen-höhe für die Küste von Fukushima mit weniger als 2×10^{-4} pro Jahr angegeben (durchschnittliche Wiederholungsperiode 5 000 Jahre) [INPO 2011, p.47].

In verschiedenen Dokumenten [ExpBerBW 2011] [Nöggerath et al. 2011] wird auf eine frühere japanische Publikation hingewiesen [Minoura 2001]. Derzufolge sind Tsunamis der im März 2011 beobachteten Höhe mit einer durchschnittlichen Wiederholungsperiode von 800 bis 1 100 Jahren zu erwarten. Nach üblichen Auslegungsgrundsätzen (vgl. Abschnitt 4), müsste ein Naturereignis dieser Häufigkeit durch die Auslegung beherrscht werden, was aber offensichtlich nicht der Fall war.

Im KKW Fukushima Daiichi waren des Weiteren die Meerwasserpumpenanlagen als Freiluft-anlagen konzipiert sowie die Notstromdiesel und Teile der Gleichstromversorgung in nicht überflutungssicher abgedichteten Untergeschossen installiert. Ohne wasserfeste Gebäude-hüllen für Pumpenanlagen, Notstromdiesel und Gleichstromversorgung fehlt eine weitere Schutzebene für wichtige Sicherheitseinrichtungen im eingetretenen Fall eines auslegungs-überschreitenden Tsunami.

Zum Sachstand in der Schweiz

Das ENSI verfolgt die Frage der Gefährdungsannahmen für externe Überflutung im Rahmen der Fukushima-Folgemaassnahmen unter Prüfpunkt 1 [ENSI Lessons 2011]. Mit Verfügung 1 vom 18. März 2011 hat das ENSI die Überprüfung der Auswirkung von Überflutungen ange-ordnet und in Verfügung 2 vom 1. April 2011 die Vorgehensweise vorgegeben. Bis zum 30. Juni 2011 hatten die schweizerischen KKW den deterministischen Nachweis zur Be-herrschung des 10 000-jährlichen Hochwassers zu erbringen. Zu unterstellen waren die Hochwassergefährdungen, wie sie für die im Jahr 2008 eingereichten Rahmenbewilligungs-gesuche für neue Kernkraftwerke an den Standorten Beznau, Mühleberg und Niederaam (Gösgen) neu bestimmt worden waren.

Die von den KKW termingerecht eingereichten Nachweise wurden vom ENSI insgesamt wie folgt gutgeheissen: Alle schweizerischen KKW beherrschen auch ein extremes Hochwasser, wie es durchschnittlich alle 10 000 Jahre vorkommen kann. Auch wenn gleichzeitig die externe Stromversorgung ausfällt, können die Anlagen in einen sicheren Zustand überführt werden. Die geltende Dosislimite von 100 mSv wird von allen Anlagen deutlich eingehalten.

Nach Angaben der Betreiber sind die Gebäude mit sicherheitsrelevanten Ausrüstungen gegen eindringendes Wasser bis zu einer Höhe gedichtet, die deutlich über dem Niveau eines Hochwassers liegt.

Für das KKB und das KKM forderte das ENSI verschiedene Verbesserungen im Zusammen-hang mit einer Überflutung [ENSI Vf3 2011]. Insbesondere stellte das ENSI fest, dass im KKM für das Notstandsystem eine Alternative zur Kühlwasserentnahme aus der Aare fehlt [ENSI Vf3-KKM 2011]. Im Rahmen der verlängerten Jahreshauptrevision 2011 hat das KKM verschiedene Massnahmen zur Sicherstellung der Hilfskühlwasserversorgung aus der Aare ergriffen (zusätzliche Saugstutzen, Einspeisestelle für mobile Pumpen, montierbare Hoch-wasserschutzwände im Pumpenhaus). Als diversitäre Kühlwasserquelle plant das KKM, eine durchgängig zweisträngige Kühlturmanlage für das Notstand-Kühlwassersystem zu errichten. Das ENSI ist mit diesem Vorschlag und der Realisierungszeit von 36 Monaten ab Konzept-freigabe einverstanden [ENSI Stn-Vf3-KKM 2011, S. 5].

Sollten die in Abschnitt 5.1.1 erwähnten Nachweise ergeben, dass das erdbebenbedingte Versagen von Stauanlagen, in deren Einflussbereich sich schweizerische KKW befinden, ausgeschlossen werden kann, so gilt die Kombination von Erdbeben und Hochwasser als auslegungsüberschreitend. Kann hingegen ein unkontrollierter Wasserabfluss bei einem 10 000-jährlichen Erdbeben nicht ausgeschlossen werden, so ist bis zum 31. März 2012 der deterministische Nachweis für die Beherrschung der Kombination von Erdbeben und Versagen der Stauanlagen zu führen. Dabei ist das instantane, vollständige Versagen der Stauanlagen und der Ausfall aller von der Flutwelle betroffenen Kühlwasserversorgungen zu unterstellen.

Weitere Untersuchungen, insbesondere im auslegungsüberschreitenden Bereich, waren im Rahmen der EU-Stresstests gemäss ENSI-Verfügung 4 vom 1. Juni 2011 durchzuführen. Im Landesbericht sind die verschiedenen Gefährdungsannahmen für das 10 000-jährliche Hochwasser für die schweizerischen KKW aufgeführt. Das ENSI bestätigt, dass die schweizerischen KKW über einen angemessenen Schutz gegen diese Gefährdungen verfügen. Im Zusammenhang mit den vorhandenen Margen wird darauf hingewiesen, dass für das KKM im Fall eines Bruchs der Wohlensee-Staumauer ein totaler Ausfall der Kühlwasserversorgung nicht ausgeschlossen werden kann; bis zur Realisierung der bereits erwähnten Kühlturmanlage verbliebe in diesem Fall als einzige Kühlmöglichkeit das Abblasen von Dampf („feed and bleed“). Aufgrund der EU-Stresstests wird das ENSI als neuen offenen Punkt die Auswirkungen einer vollständigen Verklauung wasserbaulicher Einrichtungen bei den KKW Beznau, Gösgen und Mühleberg weiterverfolgen, siehe auch Verfügungen 5 (Abschnitt 3.5). [ENSI Stresstests 2011]

Wie bereits im Abschnitt 5.1.1 *Auslegung gegen Erdbeben* erwähnt wird, sind für den Nachweis des ausreichenden Schutzes gegen Störfälle, die durch Naturereignisse ausgelöst werden, nach geltendem schweizerischem Recht Gefährdungen mit einer Häufigkeit grösser gleich 10^{-4} pro Jahr zu berücksichtigen²¹; massgebend ist somit das 10 000-jährliche Ereignis. Der so festgelegte Auslegungsstörfall wird gemäss UVEK-Verordnung²² der Störfallkategorie 3 zugeordnet und unterliegt somit einer Dosislimite von 100 mSv²³.

Beurteilung durch die KNS

Nach Ansicht der KNS sind die im Zusammenhang mit Überflutungen gebotenen Abklärungen und Massnahmen mit den Fragestellungen und Forderungen des ENSI eingeleitet bzw. durchgeführt, soweit dies seit dem Unfall von Fukushima möglich war. Die Hochwassergefährdungen gemäss Rahmenbewilligungsgesuchen aus dem Jahr 2008 stellen nach Ansicht der KNS eine aktuelle Basis für die Gefährdung durch Überflutung dar. Insbesondere historische Untersuchungen (z.B. [Wetter-Pfister 2011]) können neue Erkenntnisse liefern und sollen periodisch berücksichtigt werden. Die KNS empfiehlt deshalb:

Empfehlung 5.1.2

Neue Erkenntnisse zur Gefährdung durch Überflutung, wie zum Beispiel Studien zur historischen Hydrologie, sind im Rahmen der periodischen Sicherheitsüberprüfungen zu berücksichtigen.

²¹ Art. 5 Abs. 4 Verordnung des UVEK über die Gefährdungsannahmen und die Bewertung des Schutzes gegen Störfälle in Kernanlagen; SR 732.112.2 (hier: UVEK-Verordnung)

²² Art. 1 Bst. a Ziff. 3 Verordnung des UVEK über die Gefährdungsannahmen und die Bewertung des Schutzes gegen Störfälle in Kernanlagen (SR 732.112.2)

²³ Art. 94 Abs. 5 Strahlenschutzverordnung (StSV, SR 814.501)

Die KNS begrüsst insbesondere die Schaffung einer diversitären äusseren Wärmesenke im KKM.

Die Nachweise für die Beherrschung der Kombination von Erdbeben und Überflutung sind Ende März 2012 von den Betreibern beim ENSI einzureichen und können deshalb noch nicht beurteilt werden.

Nachdem Überflutungsszenarien hauptsächlich mit Starkniederschlägen in Verbindung stehen, regt die KNS an, der Frage von gleichzeitig auftretenden Hangrutschungen Beachtung zu schenken. Im Sinn von ergänzenden Fragestellungen regt die KNS auch an, die Vorgehensweise bei anhaltender Trockenheit von den Betreibern vertieft abklären zu lassen. Diesbezüglich hat das ENSI aufgrund der Ergebnisse der EU-Stresstests festgehalten, detailliertere Nachweise zur Beherrschung extremer Wetterbedingungen einschliesslich deren Kombinationen weiterzuverfolgen. [ENSI Stresstests 2011]

Die Zuordnung des 10 000-jährlichen Hochwassers (Häufigkeit 10^{-4} pro Jahr) zur Störfallkategorie 3 entspricht den Vorgaben der Verordnung des UVEK über die Gefährdungsannahmen und die Bewertung des Schutzes gegen Störfälle in Kernanlagen (SR 732.112.2). Die Häufigkeit 10^{-4} pro Jahr bildet die Grenze zwischen den Störfallkategorien 2 und 3, wie in Abschnitt 5.1.1 erläutert. Die dort ausgeführten Überlegungen zur Systematik der Zuordnung zu den Störfallkategorien sind allgemeiner Natur und treffen deshalb auch für den vorliegenden Fall der Überflutungsereignisse zu. Wie in Abschnitt 5.1.1 regt die KNS an, die Grenzwertzuordnung gemäss UVEK-Verordnung im Kontext des geltenden Regelwerks juristisch zu überprüfen.

5.1.3 Stromversorgung

Angaben zu Fukushima Daiichi

Nach dem Tsunami fiel im KKW Fukushima Daiichi die gesamte Wechselstromversorgung aus (ausser in Block 6) und teilweise auch die Gleichstromversorgung; vgl. Abschnitt 2.3 und Anhang A1.1. Der bis in die batteriegestützten Systeme reichende Stromausfall hatte weitestgehende Funktionsverluste zur Folge, inklusive Verlust von wesentlichen Informationen zum Anlagenzustand und von Steuerfunktionen (z.B. Antriebe von Armaturen).

Zum Sachstand in der Schweiz

Im Rahmen der EU-Stresstests wurde auch die Stromversorgung untersucht. Die Wechselstromversorgung der schweizerischen KKW wird im Landesbericht sieben gestaffelten Versorgungsebenen zugeordnet:

- Ebene 1: Höchstspannungsnetz (Hauptanbindung)
- Ebene 2: Eigenbedarfsversorgung im Inselbetrieb
- Ebene 3: Sekundärnetz (Hilfseinspeisung)
- Ebene 4: Notstrom (Dieselgeneratoren und/oder Wasserkraftwerk)
- Ebene 5: Notstandsystem (speziell geschützte Notstromdiesel)
- Ebene 6: örtliche Notfallausrüstungen
(mobile Generatoren, Handschaltungen zu zugeordneten Kraftwerken)
- Ebene 7: externe Notfallausrüstungen (mobile Generatoren)

Des Weiteren wird zwischen drei zu untersuchenden Situationen unterschieden: Notstromfall (Ausfall der Ebenen 1 bis 3), Notstand (Ausfall der Ebenen 1 bis 4) und totaler Wechselstromausfall (Ausfall der Ebenen 1 bis 5), wobei letzterer auslegungsüberschreitend ist.

Das ENSI kommt im Landesbericht zum Schluss, dass die Stromversorgung für sicherheitstechnisch wichtige Verbraucher im Notstromfall und im Notstand sichergestellt ist. Darüber hinaus können ausgewählte wichtige Verbraucher auch bei totalem Wechselstromausfall für eine angemessene Zeit versorgt werden. Das ENSI begrüßt, dass alle schweizerischen KKW zusätzliche mobile Wechselstromgeneratoren für Notfallmaßnahmen bereithalten oder planen, dies zu tun. Als offenen Punkt will das ENSI die Entwicklung einer ganzheitlichen Strategie für den zielgerichteten Einsatz von mobilen Generatoren weiterverfolgen (offener Punkt 5-1 aus EU-Stresstests). Damit soll sichergestellt werden, dass ausgewählte Verbraucher auch bei totalem Wechselstromausfall langfristig versorgt werden können.

Beurteilung durch die KNS

Das dargelegte siebenstufige Konzept bezieht sich auf Wechselstromquellen. Die im Landesbericht diskutierten Szenarien beschränken sich denn auch auf den Ausfall von Wechselstromsystemen; die Verfügbarkeit von batteriegestützten Systemen bleibt vorausgesetzt. Nach Ansicht der KNS waren aber just die Ausfälle in den batteriegestützten Systemen ein massgebendes Element für den katastrophalen Unfallverlauf in Fukushima Daiichi. Nach Aussage des ENSI sind die Gleichstromversorgungen in die Systemüberprüfungen einbezogen, indem Standzeiten und die grundsätzlichen Sicherheitskonzepte von räumlicher Trennung, Redundanz und Diversität beachtet würden [KNS Pr45 2012]. Im Landesbericht werden beispielhaft einige Betriebsdauern von batteriegestützten Systemen bei alleiniger Batterieversorgung angegeben. Die KNS begrüßt, dass die Standzeiten von Speichersystemen nach Aussage des ENSI [KNS Pr45 2012] nochmals überprüft werden.

Wegen der grossen Bedeutung der Stromversorgung soll nach Ansicht der KNS als auslegungsüberschreitendes Szenario ein lang andauernder Ausfall der externen Stromversorgung betrachtet werden. In diesem Sinn begrüßt die KNS die Absicht, mit zusätzlichen mobilen Ausrüstungen und einer durchdachten Einsatzplanung dieser Mittel die Stromversorgung essenzieller Verbraucher im auslegungsüberschreitenden Bereich zu stärken [ENSI Stresstests 2011, offener Punkt 5-1]. Aufgrund der Situation in Fukushima Daiichi, wo Batterien schliesslich für längere Zeit die einzig verfügbare Stromquelle blieben, empfiehlt die KNS:

Empfehlung 5.1.3

Zur weiteren Stärkung der Vorsorge für den Fall eines lang andauernden Ausfalls der Wechselstromversorgung soll das Optimierungspotenzial zur Erstreckung der Batteriestandzeiten überprüft werden, das sich aus einem gezielten Management der Verbraucherlasten im Rahmen von Notfallmaßnahmen ergibt.

5.1.4 Robuste Gestaltung der Kühlung von Reaktor, Primärcontainment und Brennelementbecken

Zum Sachstand in der Schweiz

Mit Verfügung 1 vom 18. März 2011 forderte das ENSI alle Betreiber von KKW auf darzulegen, ob die Kühlmittelversorgung für die Sicherheits- und Hilfssysteme aus einer diversitären, erdbeben-, hochwasser- und verunreinigungssicheren Quelle gesichert ist. Alle schweizerischen KKW ausser KKM verfügen für die Notkühlung der Primärsysteme über eine diversitäre Kühlwasserquelle in Form von Grundwasserbrunnen, die genügend ergiebig sind. Für das KKM hat das ENSI mit der Verfügung 3 vom 5. Mai 2011 [ENSI Vf3-KKM 2011, Forderung 1] eine diversitäre Kühlwasserquelle gefordert. Dem Vorschlag von KKM, eine durchgehend zweisträngige Kühlturmanlage zum Notstand-Kühlwassersystem nachzurüsten, hat das ENSI in seiner Stellungnahme vom 15. November 2011 zugestimmt [ENSI Stn-Vf3-KKM 2011, S. 5].

Zudem forderte das ENSI mit den Verfügung 1 vom 18. März 2011 alle Betreiber von KKW auf, bis zum 31. März 2011 darzulegen, ob die Brennelementbeckenkühlung eine besonders geschützte Sicherheitsfunktion ist, die über das gebunkerte Notstandsystem versorgt und gesteuert werden kann. Zudem verfügte das ENSI, bis zum 31. Dezember 2012 zwei räumlich getrennte Zuführungen zur externen Bespeisung der Brennelementlagerbecken nachzurüsten, falls solche nicht vorhanden sind.

Mit den Verfügungen 3 vom 5. Mai 2011 forderte das ENSI in den folgenden Punkten Verbesserungen der Brennelementbeckensysteme, soweit entsprechende Lücken bestehen:

- Temperatur- und Füllstandskontrolle sowie Steuerung der Nachspeisung, insbesondere auch ab Notleitstelle;
- Überprüfung des Erdbebenverhaltens der gesamten Brennelementbeckensysteme;
- Erweiterung der Notfallmassnahmen zur Nachspeisung und Überwachung nach Ausfall der Beckenkühlsysteme.

Die Notfallmassnahmen zur Wärmeabfuhr bei einem kompletten Ausfall der Kühlwasserversorgung bei gestörter Infrastruktur und Stromversorgung werden unter Prüfpunkt 12 überprüft und verifiziert. Im Sinn dieser Zielsetzung erwähnt das ENSI die zusätzlichen Einsatzmittel, welche im bereits betriebsbereiten externen Lager für die Aufrechterhaltung der Kühlfunktion bereitgestellt werden. Zusätzliche Untersuchungen erfolgten auch in den EU-Stresstests. Für Notfallmassnahmen wichtige alternative Einspeisungen von Kühlwasser wurden bereits mit der Einführung von SAMG (Severe Accident Management Guidance) geschaffen. Deren Funktionalität unter erschwerten Bedingungen wird unter Prüfpunkt 13 weiterverfolgt.

Beurteilung durch die KNS

Nach Realisierung der Kühlturmanlage für das Notstand-Kühlwassersystem im KKM werden alle schweizerischen KKW neben der äusseren Hauptwärmesenke über eine diversitäre Kühlwasserquelle für die Sicherheitsfunktionen verfügen. Nach Ansicht der KNS sind auf dieser Grundlage und mit verifizierten Notfallmassnahmen für alternative Kühlwassereinspeisungen die Voraussetzungen für die Gewährleistung der sicherheitsrelevanten Kühlfunktionen mit der erforderlichen Verlässlichkeit erfüllt. Die KNS weist darauf hin, dass die Notfallmassnahmen zu beüben sind, um ihre Wirksamkeit zunächst zu verifizieren und dann dauerhaft sicherzustellen.

5.1.5 Standorte mit mehr als einer Reaktoranlage

Zum Sachstand in der Schweiz

Drei der vier KKW in der Schweiz verfügen über nur je eine Reaktoranlage. Einzig am Standort Beznau werden zwei Blöcke betrieben. Diese sind anlagentechnisch getrennte Einheiten. Auch für den Betrieb sind zwei unabhängige Schichtmannschaften in separaten Kommandoräumen im Einsatz. Jedoch ist im Normalbetrieb nur ein Pikettingenieur im Dienst.

Beurteilung durch die KNS

Die KNS geht davon aus, dass von der Konfiguration und Betriebsweise des KKW Beznau als Zweiblock-Anlage keine relevanten zusätzlichen Gefährdungen ausgehen. Sie empfiehlt dem ENSI jedoch, die Notfallvorsorge im Licht der Ereignisse von Fukushima zu überprüfen und entsprechende Übungen anzuordnen.

5.2 Massnahmen gegen schwere Störfälle / Interner Notfallschutz

5.2.1 Wasserstoffproblem

Der Themenkomplex um die Bildung von Wasserstoff bei schweren Reaktorunfällen und die Massnahmen zu dessen Beherrschung werden hier als Wasserstoffproblem bezeichnet.

Bei schweren Störfällen entsteht Wasserstoff beim Kontakt von Wasser bzw. Wasserdampf mit überhitzten Brennelementen. Dabei oxidiert das Metall der Brennstabhüllrohre (hauptsächlich Zirkon) mit dem Sauerstoff des Wassers, wobei Wasserstoff freigesetzt wird. Wasserstoff und Sauerstoff (als Bestandteil von vorhandener Luft) können ein explosives Gemisch (Knallgas) bilden.

Ausserdem wird in einer Reaktoranlage abhängig von der Strahlungsintensität, aber mit vergleichsweise geringer Rate, stets auch Wasserstoff durch Radiolyse (Aufspaltung von Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff durch ionisierende Strahlung) freigesetzt.

Wasserstoff-Luft-Gemische haben ihre untere Zündgrenze bei einer Wasserstoffkonzentration von 4 % und einer Sauerstoffkonzentration von 6.5 %. Diese Zündgrenzen sind unabhängig vom Druck und der weiteren Zusammensetzung der Gasatmosphäre [PSI 1993]. Um eine Zündung auszuschliessen, muss mindestens eine dieser Konzentrationen unterschritten werden.

Angaben zu Fukushima Daiichi

In den Blöcken 1 bis 4 des KKW Fukushima Daiichi kam es zu Wasserstoffexplosionen.

Für die Blöcke 1 und 3 wird vermutet, dass der Wasserstoff über Dampfableitungen vom Reaktordruckgefäß ins Primärcontainment und von dort über Leckagen ins Reaktorgebäude (Sekundärcontainment) ausgetreten ist. Dort konnte sich mit dem Sauerstoff der Luft ein zündfähiges Gasgemisch bilden. Insbesondere Leckagen am Deckelflansch des Primärcontainments lassen sich mit den zuvor gemessenen Drücken (etwa doppelter Auslegungsdruck) im Primärcontainment erklären.

Vor den Explosionen in den Blöcken 1 und 3 war das entsprechende Primärcontainment über den Kamin in die Atmosphäre druckentlastet worden. Diese Massnahmen zum Schutz vor einer Überlastung waren durch technische Schwierigkeiten stark verzögert worden. Beim Abblasen ist gemäss vorliegenden Schemata [JGR 2011] eine Umgehung der betrieblichen Filteranlagen vorgesehen; spezielle Druckentlastungsfilter sind nicht vorhanden. Leckagen aus den Leitungen der Abgassysteme sind als Ursache für die Ansammlung von zündfähigen Gasgemischen im Reaktorgebäude ebenfalls denkbar.

Beim Block 2 wurde eine Wasserstoffexplosion im Bereich der Toruskammer im Untergeschoss des Reaktorgebäudes geortet. Die genaue Situation konnte jedoch nicht erkundet werden. Als Grund für die Bildung von zündfähigem Gemisch steht die These eines Lecks am Primärcontainment bzw. am Torus im Vordergrund; denkbar sind aber auch Leckagen aus den Leitungen der Abgassysteme. Beim Block 2 war ebenfalls versucht worden, den Druck im Primärcontainment durch Abblasen über den Kamin zu reduzieren. Nach vorliegenden Angaben ist davon auszugehen, dass dies nicht gelang.

Block 4 stand vor dem Unfall nicht in Betrieb. Der Reaktorkern war in das Brennelement-lagerbecken ausgelagert. Ein Kernschaden als Wasserstofflieferant fällt deshalb ausser Betracht. Aufgrund des Schadensbildes ist davon auszugehen, dass in den oberen Teilen des Reaktorgebäudes ein zündfähiges Gasgemisch entstanden war. Quellen und Fliesspfade für den Wasserstoff sind nicht in verlässlicher Art bekannt.

Zum Sachstand in der Schweiz

Das Wasserstoffproblem wurde in der Schweiz wie weltweit im Nachgang zum Unfall im KKW Three Mile Island (TMI), USA (1979), behandelt.²⁴

Der Auslegungsdruck von Primärcontainments ist hauptsächlich darauf ausgerichtet, den Druck zu beherrschen, der bei einer schnellen Druckentlastung des Primärkreislaufs hauptsächlich durch Wasserdampf im Containment aufgebaut wird. Im Fall einer Zirkon-Wasser-Reaktion wird der Druck im Containment durch die zusätzlich entstehende Gasmenge und die durch die Zirkon-Wasser-Reaktion freigesetzte Reaktionswärme erhöht. Sollte es zu einer schnellen Verbrennung dieses Wasserstoffs kommen, so kann der Druck im Containment kurzzeitig auf den doppelten bis dreifachen Wert steigen. Die Summe aller dieser Druckerhöhungen wurde der Auslegung der in der Schweiz vorhandenen Reaktoranlagen nicht zugrunde gelegt, weshalb bei einem Störfall mit Kernschaden der Auslegungsdruck des Primärcontainments überschritten werden kann, insbesondere wenn die Wärmeabfuhr aus dem Containment ausfällt. Um ein Bersten des Containments vermeiden zu können, wurden deshalb in den 90er Jahren in allen schweizerischen Kernkraftwerken gefilterte Druckentlastungen eingebaut. Diese können ferngesteuert oder manuell geöffnet werden oder öffnen nach Überschreiten einer Druckschwelle selbsttätig (Berstscheibe). In den Filtern werden radioaktive Substanzen mit sehr hohem Abscheidegrad zurückgehalten: Jod-Gase zu mindestens 99 %, Aerosole zu mindestens 99.9 %.

Um schnelle Wasserstoffverbrennungen zu vermeiden, sind in den schweizerischen Kernkraftwerken Systeme zur Überwachung der Wasserstoffkonzentration vorhanden. Zur Wasserstoffbeherrschung sind verschiedene Massnahmen umgesetzt worden:

- KKW Beznau: Im Containment sind passive autokatalytische Rekombinatoren (PAR) installiert. Mit den PAR soll die Konzentration von Wasserstoff (und Kohlenmonoxid) genügend tief gehalten werden, sodass ein Containmentversagen durch einen Druckanstieg auf Grund von schnellen Verbrennungsvorgängen verhindert werden kann.
- KKW Gösgen: Zwei elektrisch beheizte Wasserstoffrekombinatoren und ein Luftumwälzsystem sind vorhanden, womit die bei einem Auslegungsstörfall entstehenden Radiolysegase beherrscht werden können. Schnelle grosse Wasserstofffreisetzungen bei auslegungsüberschreitenden Störfällen würden zu höheren Konzentrationen führen, die nach Angaben des Betreibers mit Zündungen abgebaut werden müssten. Der Betreiber verweist in diesem Zusammenhang auf die relativ hohe Druckfestigkeit des Containments. Um bei Wasserstoffverbrennungen ein Fehlansprechen der Berstscheibe im Containment-Druckentlastungssystem zu vermeiden, ist diese mit einem geschlossenen Ventil abgesichert (im Gegensatz zu allen anderen schweizerischen Kernkraftwerken).
- KKW Leibstadt: Um zündfähige Gemische zu beherrschen, die bei einem Auslegungsstörfall längerfristig durch Radiolyse entstehen können, ist ein thermisches Rekombinatorensystem vorhanden. Bei auslegungsüberschreitenden Störfällen freigesetzter Wasserstoff (Zirkon-Wasser-Reaktion) wird mit einem Zündsystem kontrolliert abgebrannt. Das Zündsystem ist batteriegestützt und verfügt über fünfzig im Containment angeordnete Zünder.
- KKW Mühleberg: Das Primärcontainment ist mit Stickstoff inertisiert und der Sauerstoffgehalt auf maximal 4 % begrenzt. Um gegebenenfalls längerfristig aufgrund von Radiolyse entstehende zündfähige Gemische zu beherrschen, ist ein thermisches Rekombinatorensystem vorhanden.

²⁴ Im Verlauf der Unfallsequenz im KKW TMI-2 kam es zu einer Wasserstoffexplosion; das Containment hielt allerdings Stand.

Aufgrund der Ergebnisse der EU-Stresstests wird das ENSI gemäß „Offenem Punkt 6-1“ im Sinn einer Risikominimierung weiterverfolgen, ob die Einsatzstrategie für die Containment-Druckentlastung beibehalten werden soll.

Beurteilung durch die KNS

Für die Beherrschung des Wasserstoffproblems sind nach Ansicht der KNS die folgenden Ziele massgebend: Erstens ist zu verhindern, dass in einem grösseren Teil des Containments ein zündfähiges Gemisch entsteht. Sollte es, zweitens, dennoch zu einer Zündung von Wasserstoffgas kommen, so muss die Druckspitze beherrschbar bleiben.

Nach Ansicht der KNS können diese Ziele mit den vorgesehenen Vorkehrungen nicht hinreichend sicher erreicht werden, wobei je nach Lösungsansatz andere Schwierigkeiten im Vordergrund stehen: die Reaktionsraten für die Rekombination genügen nicht (Rekombinatoren nur für Radiolysegase), die Reaktionsraten für die Rekombination sind nicht kontrollierbar (PAR, Zünder), Zündungen erfolgen unkontrolliert (Selbstzündung bei PAR), Probleme mit der Systemumgebung (Energieversorgung, Dichtheit) usw. Aufgrund dieser Schwierigkeiten kann der Auslegungsdruck des Primärcontainments überschritten und dadurch die Funktion des Containments gefährdet werden.

Um dies zu verhindern, muss nach Ansicht der KNS die kontrollierte Druckentlastung („filtered venting“) unter Umständen auch deutlich vor Erreichen des Berstdrucks der Berstscheibe im Druckentlastungssystem eingesetzt werden. Denn eine Knallgasreaktion auf diesem Druckniveau würde mit hoher Wahrscheinlichkeit zu einer Überlastung oder sogar einer Zerstörung des Containments führen. Auf Basis von Konzentrationsmessungen für beide Knallgaskomponenten, Sauerstoff und Wasserstoff, kann der resultierende Druck nach einer Deflagration (schnelle Verbrennung) berechnet werden. Wenn dieser berechnete Druck den Auslegungsdruck deutlich übersteigt, soll vorsorglich abgelassen werden. Damit wird zunächst vermieden, dass das Containment leckt und somit unkontrolliert zu einem Quellterm führt. Ausserdem sinkt mit dem Abblasen das Sauerstoffinventar und mit der nachfolgenden Druckerhöhung durch Wasserdampf aus Nachzerfallswärme kann schliesslich die Zündgrenze unterschritten werden. Vor allem aber kann durch vorsorgliche Druckentlastung ein katastrophales Containment-Versagen ausgeschlossen werden.

Wie die Ereignisse von Fukushima zeigen, muss auch verhindert werden, dass sich Wasserstoff in Anlagenteile ausserhalb des Containments ausbreitet und dort zündfähige Gasgemische bilden kann. Um Leckagen aus dem Primärcontainment möglichst zu vermeiden, ist nach Ansicht der KNS vorab sicherzustellen, dass der Auslegungsdruck nicht überschritten wird. Darüber hinaus ist zu prüfen, in welchen Situationen Wasserstoff in benachbarte Räume austreten kann, welche Gefährdung daraus erwächst und mit welchen Massnahmen diese gegebenenfalls beherrscht werden kann.

Das Containment ist die letzte Barriere; seine Beschädigung muss unter allen Umständen verhindert werden. Durch gefilterte Druckentlastung kann und soll einerseits der Druck unterhalb des Auslegungsdrucks gehalten werden. Andererseits kann und soll verhindert werden, dass ein zündfähiges Gasgemisch in einem Ausmass entsteht, das bei einer Deflagration zu einer Schädigung des Containments führt. Nach Ansicht der KNS ist die gefilterte Druckentlastung aufgrund dieser Doppelfunktion und der guten Steuerbarkeit als das bevorzugte Mittel zur Beherrschung des Wasserstoffproblems einzusetzen. Entsprechend empfiehlt die KNS, die Verfügbarkeit von Entscheidungsgrundlagen, technischen Ausrüstungen und prozeduralen Festlegungen für einen wirkungsvollen Einsatz dieser Notfallmassnahme zu überprüfen und nach Bedarf zu ergänzen.

Empfehlung 5.2.1

Die Beherrschung einer voll entwickelten, schnellen Wasserstoffproduktion in den schweizerischen Kernkraftwerken ist zu überprüfen. Die gefilterte Druckentlastung als mögliche Strategie soll mit folgenden Massnahmen optimiert werden:

- Für die Messung von Wasserstoff- und Sauerstoffkonzentration sind störfallfeste Einrichtungen in hinreichender Anzahl an massgebenden Stellen im Primärcontainment zu installieren. Beide Messgrössen sollen als Kriterium herangezogen werden, um die Bildung von zündfähigen Gasgemischen in potenziell schädigendem Umfang durch frühzeitige gefilterte Druckentlastungen zu vermeiden.
- Im Licht der Ereignisse von Fukushima ist zu überprüfen und sicherzustellen, dass die gefilterte Druckentlastung unter erschwerten Bedingungen fehlersicher fernbedient und nötigenfalls manuell vor Ort bedient werden kann, auch unter radiologisch erschwerten Bedingungen.
- Die Prozeduren für eine gefilterte Druckentlastung sind im Voraus festzulegen. Dabei müssen die Entscheidungswege so festgelegt sein, dass eine Autorisierung auch unter erschwerten Bedingungen zeitgerecht vorliegt.

Darüber hinaus empfiehlt die KNS zu prüfen, in welchen Situationen Wasserstoff in benachbarte Räume austreten kann, welche Gefährdung daraus erwächst und mit welchen Massnahmen diese gegebenenfalls beherrscht werden kann.

Teile der obigen Empfehlung sind bereits in den Folgemaassnahmen des ENSI enthalten, so insbesondere in den Prüfpunkten 5 (Instrumentierung), 7 (Wasserstoff in weiteren Anlagenbereichen) und 8 (Auslegung und Betrieb der Systeme zur gefilterten Druckentlastung) [ENSI Lessons 2011]. Weitere Prüfpunkte in diesem Bereich (Strategie der Containment-Druckentlastung und Erdbebenfestigkeit der Einrichtungen) resultierten aus den EU-Stresstests [ENSI Stresstests 2011]. Nach Ansicht der KNS muss aber der Beherrschung einer schnellen Wasserstoffproduktion mehr Beachtung geschenkt werden.

Schliesslich ist der Frage der Bildung von zündfähigen Wasserstoff-Gasgemischen im Bereich von Brennelementlagerbecken nachzugehen. Das ENSI hat in den Verfügungen 3 vom 5. Mai 2011 eine entsprechende Forderung gestellt und die Thematik auch in Prüfpunkt 7 [ENSI Lessons 2011] angesprochen.

5.2.2 Verbesserung der Vorbereitung auf schwere Unfälle

Angaben zu Fukushima Daiichi

Laut vorliegenden Berichten sind Notfallmassnahmen für schwere Unfälle (Severe Accident Management Guidance, SAMG)²⁵ in Japan als freiwillige Massnahmen von den Betreibern umgesetzt worden. Wie sich nun herausstellte waren sie offenbar nicht hinreichend ausgearbeitet und dokumentiert. Fallweise waren deshalb zeitraubende Improvisationen notwendig und verschiedene Massnahmen konnten nicht umgesetzt werden. Darüber hinaus verhinderten die Schäden von Erdbeben und Tsunami im Umfeld und in der Anlage verschiedene Massnahmen, beispielsweise die zeitgerechte Aufschaltung von mobilen Generatoren.

²⁵ SAMG im engeren Sinn sind Entscheidungshilfen für das Notfallmanagement von schweren Unfällen. Im Zug der Erarbeitung und betrieblichen Einführung dieser Strategien wurden auch punktuelle Anpassungen an den Anlagen identifiziert und vorgenommen, um möglichst wirksam eingreifen zu können (z.B. Einbau von Anschlussstutzen für die Einspeisung von Wasser durch die Feuerwehr). Im vorliegenden Bericht wird der Begriff SAMG im weiteren Sinn verwendet und beinhaltet die Entscheidungshilfen und die mit der betrieblichen Einführung verbundenen Massnahmen.

Mit fortschreitendem Unfallverlauf ergaben sich u.a. Probleme mit der Benutzbarkeit der Betriebswarten, die hauptsächlich auf die fehlende Stromversorgung zurückzuführen sind (Instrumentierung, Licht, Lüftung, Kommunikationsmittel), aber auch auf die steigenden Strahlenpegel [JGR 2011, LL11]. Auch das als lokale Notfall-Kommandostelle vorgesehene so genannte Off-site Center konnte aus entsprechenden Gründen nicht wie vorgesehen genutzt werden [JGR 2011, S.V-43]. Gute Dienste leistete ein erdbebensicheres Gebäude, das nach dem schweren Niigata-Chuetsu-Erdbeben im Juli 2007 errichtet worden war [IAEA FFM 2011, S. 53 und A2-07]. Ad hoc wurde 20 km südlich ein Einsatzzentrum eingerichtet („J Village“), wo die täglich bis zu 2000 Personen der Einsatzkräfte ausgerüstet und radiologisch überwacht wurden.

In der Anfangsphase herrschte grosser Mangel an Strahlenschutzmitteln (Dosimeter usw.). Diese waren offenbar zu grossen Teilen der Überflutung des Areals zum Opfer gefallen. Wegen Zerstörungen der Messeinrichtungen und/oder Stromausfalls funktionierte auch die Umgebungsüberwachung nicht wie vorgesehen.

Zum Sachstand in der Schweiz

Die schweizerischen KKW verfügen über ein umfassendes System von Stör- und Notfallvorschriften, ergänzt mit SAMG. Letzteres ist in den schweizerischen KKW vor rund zehn Jahren formell eingeführt worden. SAMG ist Stand der Technik und in der Schweiz behördlich gefordert und überwacht. Gemäss ENSI-Bericht soll SAMG im Rahmen von Prüfpunkt 16 überprüft werden [ENSI Lessons 2011].

Als kurzfristig zu realisierende Massnahme hat das ENSI mit Verfügung 1 vom 18. März 2011 gefordert, dass jedes KKW Zugang zu einem externen Lager mit zusätzlichen Einsatzmitteln hat. Darin sind erdbeben- und überflutungssicher Notstromaggregate, mobile Kühlmittelpumpen, Kabel und Schläuche, Treibstoff, Borierungsmittel und Werkzeuge für die Installation dieser Einsatzmittel in Einheiten bereitzuhalten, die mit Helikopter transportiert werden können. Die schweizerischen KKW haben fristgerecht per 1. Juni 2011 ein gemeinsames Aussenlager in Betrieb genommen.

Als Einsatzzentrale für die Notfallorganisation verfügen die schweizerischen KKW über einen Notfallraum und einen Ersatznotfallraum. Ob diese Einrichtungen im Lichte der Erfahrungen aus dem Fukushima-Unfall noch den Anforderungen genügen, wird laut ENSI-Bericht als Prüfpunkt 10 im Rahmen der IDA NOMEX untersucht [ENSI Lessons 2011].

Gemäss Prüfpunkten 18 und 36 ist sicherzustellen, dass jederzeit ausreichend Personal für die Bewältigung aller notwendigen Notfallmanagementtätigkeiten und genügend Strahlenschutzpersonal vor Ort zur Verfügung steht. In Prüfpunkt 31 verlangt das ENSI, dass zusätzliche Einsatzmittel für den Strahlenschutz bei schweren Unfällen vorzuhalten sind. Gemäss Prüfpunkt 32 ist zu prüfen, ob die auf dem Kraftwerksareal vorhandenen Emissions- und Immissionsmessungen zur Bestimmung der Aktivitätsabgaben auch im Notstromfall oder im Notstandfall gesichert sind. [ENSI Lessons 2011]

Beurteilung durch die KNS

Bezüglich Notfallmassnahmen im auslegungsüberschreitenden Bereich (Sicherheitsebene 4; SAMG) geht die KNS davon aus, dass diese in der Schweiz solide umgesetzt sind. Dazu gehören insbesondere auch die Prüfung der Funktionalität der einzelnen Massnahmen, deren periodische Überprüfung und Weiterentwicklung sowie die Beübung im Rahmen von Ausbildung, Wiederholungsschulung und Notfallübungen.

Grosse Mehrblockanlagen existieren in der Schweiz zwar nicht; insofern ist die Situation in Fukushima nicht direkt übertragbar. Dennoch weist die KNS aufgrund der Berichterstattungen

aus Japan darauf hin, dass im Ernstfall sehr umfangreiche Ressourcen (Fachpersonal, Ausrüstung, Verbrauchsmaterial) über längere Zeiträume erforderlich sein können. Geeignete geschützte Räumlichkeiten müssen in genügendem Umfang bereitstehen.

Die Verfügbarkeit von genügend ausgebildetem Personal für die Bewältigung einer Notfallsituation ist nach Ansicht der KNS eine grosse Herausforderung. Dies gilt umso mehr, als die schweizerischen KKW nicht typengleich sind.

Die KNS begrüsst die Bereitstellung von zusätzlichen Einsatzmitteln in einem externen Lager. Nach Ansicht der KNS bleibt aber offen, ob mit der vorliegenden Lösung eine optimale Wirkung erzielt wird. Beispielsweise birgt der Transport über mittlere Distanz erhebliches Störpotenzial, insbesondere im Umfeld einer Unfallsituation nach bedeutenden Naturereignissen. Auch ist das in Fukushima anfänglich fehlende und in grossem Umfang benötigte Strahlenschutzmaterial im weiteren Sinn im Materialumfang gemäss Verfügung 1 nicht erwähnt.

Empfehlung 5.2.2

Die KNS empfiehlt, das Konzept des externen Lagers für Einsatzmittel hinsichtlich zeitgerechter Verfügbarkeit von benötigtem Material in Übungen zu validieren und gegebenenfalls zu optimieren.

Im Übrigen begrüsst die KNS die erwähnten, vom ENSI festgelegten Prüfpunkte betreffend Vorsorge für schwere Unfälle in KKW in der Schweiz.²⁶

5.2.3 Notfallinstrumentierung

Angaben zu Fukushima Daiichi

Mit dem Ausfall der Gleichstromversorgung in den Blöcken 1, 2 und 4 fielen auch die Messinstrumente und Anzeigen aus.

Zum Sachstand in der Schweiz

Gemäss Prüfpunkt 5 wird das ENSI auf Basis der Ereignisse von Fukushima nochmals überprüfen, ob die Verfügbarkeit der notwendigen Instrumentierung zur Beurteilung des Anlagenzustandes auch in Extremsituationen hinreichend gewährleistet ist. Mit den Verfügungen 3 hat das ENSI die Überprüfung der Instrumentierung für die Brennelementbecken angeordnet. Weitere Anforderungen an die Störfallinstrumentierung sind in der Richtlinie ENSI-B12 geregelt. [ENSI Lessons 2011]

Beurteilung durch die KNS

Die möglichst ausfallsichere Konzeption der Mess-, Steuer- und Regeltechnik inklusive zugehöriger Anzeigen ist eine sicherheitstechnische Grundanforderung. Die KNS geht davon aus, dass diese Anforderung in den schweizerischen Anlagen erfüllt ist, unter anderem durch die Bildung von redundanten, unabhängigen Teilbereichen (Divisionen) und die Absicherung mit redundanten, unterbrechungsfreien, batteriegepufferten Stromversorgungen. Die nochmalige Überprüfung auf Basis der Ereignisse von Fukushima wird von der KNS als sicherheitsgerichtet betrachtet und begrüsst.

²⁶ Beratendes Organ des Bundes für Fragen des Strahlenschutzes ist die Eidgenössische Kommission für Strahlenschutz und Überwachung der Radioaktivität (KSR). Die KNS geht deshalb nicht weiter auf Strahlenschutzaspekte ein.

5.3 Externer Notfallschutz

Angaben zu Japan

Mit dem Tohoku-Erdbeben vom 11. März 2011, dem nachfolgenden Tsunami und der daraus folgenden Reaktorkatastrophe von Fukushima traten gleichzeitig drei Ereignisse von nationaler Bedeutung ein. Deren Bewältigung forderte die verfügbaren Einsatzkräfte aller Stufen. Die japanische Regierung formulierte in ihrem Bericht zuhanden der IAEA Ministerialkonferenz unter anderem verschiedene Lehren für die Bewältigung derartiger Grossereignisse, insbesondere auch im Einflussbereich der staatlichen Einsatzorganisation (Lessons Learned 16 bis 22). [JGR 2011]

Im Hinblick auf die beabsichtigten Containment-Druckentlastungen in den havarierten Blöcken von Fukushima Daiichi war frühzeitig mit der Evakuierung der Bevölkerung im Nahbereich des KKW begonnen worden. Die Evakuierungszone war noch am späteren Abend nach dem Tsunami zunächst auf 2 km festgelegt, kurz darauf auf 3 km und am frühen Morgen des Folgetages auf 10 km erweitert worden. Beim Abblasen von Block 1 am Nachmittag des 12. März 2011 scheint die Evakuierung der 10-km-Zone umgesetzt gewesen zu sein. Etwa eine Stunde später folgte die Wasserstoffexplosion in Block 1, worauf am Abend die Evakuierung im Umkreis von 20 km angeordnet wurde.

Zum Sachstand in der Schweiz

Das ENSI hat zahlreiche Prüfpunkte formuliert, welche den externen Notfallschutz betreffen und auch die von der japanischen Regierung formulierten Lessons Learned abdecken, soweit sie für die Schweiz massgebend sind. Insbesondere Prüfpunkte, die den externen Notfallschutz betreffen, sollen laut ENSI im Rahmen der „Interdepartementalen Arbeitsgruppe zur Überprüfung der Notfallschutzmassnahmen bei Extremereignissen in der Schweiz“ (IDA NOMEX) behandelt werden. Beispiele für solche Prüfpunkte sind die Erdbeben- und Überflutungsauslegung der Dosisleistungsüberwachung in der Umgebung der Kernkraftwerke (Prüfpunkt 9), die Überprüfung der Kommunikationseinrichtungen (Prüfpunkt 17), die Verfügbarkeit von genügend Personal (Prüfpunkt 18), alternative und unabhängige Datenübertragung für die Anlagenparameter (Prüfpunkt 20), die Überprüfung der Evakuierungskonzepte (Prüfpunkt 21), die internationale Notfallunterstützung (Prüfpunkt 22), die Verfügbarkeit der Daten für die Prognosen von Freisetzung und Strahlenexposition (Prüfpunkte 23 und 33) und die Information der Öffentlichkeit (Prüfpunkt 24). [ENSI Lessons 2011]

Die IDA NOMEX wurde vom Bundesrat am 4. Mai 2011 aufgrund der Ereignisse von Fukushima zur Klärung des Handlungsbedarfs im Bereich des Notfallschutzes bei Extremereignissen eingesetzt. Im Licht der Erfahrungen von Fukushima soll insbesondere untersucht werden, ob und welche neuen gesetzlichen und organisatorischen Notfallschutzmassnahmen ergriffen werden müssen. Überprüft werden unter anderem die Notfallschutzverordnung²⁷ und die ABCN-Einsatzverordnung²⁸.

In der Notfallschutzverordnung wird der Notfallschutz für Ereignisse in schweizerischen Kernanlagen geregelt, bei denen eine erhebliche Freisetzung von Radioaktivität nicht ausgeschlossen werden kann. Unter anderem sind in Art. 3 und Anhang 3 Gebiete festgelegt, für die Massnahmen vorzubereiten sind. Diese so genannten Zonen 1 und 2 umfassen Gebiete um eine Kernanlage, in denen bei einem schweren Störfall eine Gefahr für die Bevölkerung

²⁷ Verordnung über den Notfallschutz in der Umgebung von Kernanlagen (Notfallschutzverordnung, NFSV) vom 20. Oktober 2010 (SR 732.33)

²⁸ Verordnung über die Organisation von Einsätzen bei ABC- und Naturereignissen (ABCN-Einsatzverordnung) vom 20. Oktober 2010 (SR 520.17)

entstehen kann, die Schutzmassnahmen erforderlich macht (Zone 2) bzw. sofort erforderlich macht (Zone 1). Konkret umfasst die Zone 1 Gemeinden in einem Umkreis von etwa 3 km um ein Kernkraftwerk. Die daran anschliessende Zone 2 umfasst die Gemeinden in einem Umkreis von etwa 20 km. Darauf Bezug nehmend wird unter anderem in Art. 11 das Bundesamt für Bevölkerungsschutz (BABS) beauftragt, Vorgaben für die vorsorgliche Evakuierung der Bevölkerung in der Zone 1 zu erarbeiten, und in Art. 12 werden die Kantone beauftragt, ein entsprechendes Konzept zu erstellen.

Beurteilung durch die KNS

Die KNS begrüsst die beabsichtigten Überprüfungen von Fragen des externen Notfallschutzes durch die IDA NOMEX. Insbesondere ist aufgrund der Ereignisse in Fukushima das Zonenkonzept zu überprüfen.

Im Übrigen weist die KNS darauf hin, dass die Eidgenössische Kommission für ABC-Schutz (KomABC) beratendes Organ des Bundes für Fragen des externen Notfallschutzes ist. Die KNS geht deshalb an dieser Stelle nicht weiter auf Aspekte des externen Notfallschutzes ein. Sie wartet die Ergebnisse der IDA NOMEX ab und wird dann allenfalls dazu Stellung nehmen.

5.4 Sicherheits-Infrastruktur (Behörden, Personal)

Verfügbarkeit von genügend und bedarfsgerecht qualifiziertem Personal für die Bewältigung von Unfällen: siehe Abschnitt 5.2.2, zu den ENSI-Prüfpunkten 18 und 36.

Verfügbarkeit von adäquaten Notfallräumlichkeiten: siehe Abschnitt 5.2.2, zum ENSI-Prüfpunkt 10.

Zum Sachstand in der Schweiz

Die Aufsichtsbehörde für Kernanlagen in der Schweiz ist per 1.1.2009 als Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI) verselbständigt worden. Vom 20.11. bis 2.12.2011 wurde das ENSI im Rahmen des Integrated Regulatory Review Service (IRRS) der Internationalen Atomenergie-Organisation (IAEO bzw. IAEA) durch eine Expertengruppe überprüft. Im Rahmen dieser Überprüfung wurde auch das regulatorische Umfeld (Gesetze, Abgrenzungen gegenüber Zuständigkeit von anderen Behörden, Zusammenarbeit mit beratenden Gremien usw.) ausgeleuchtet. Aus aktuellem Anlass ging die IRRS-Mission auch speziell auf die Reaktion des ENSI auf die Ereignisse von Fukushima ein. Mit Abschluss der IRRS-Mission legte die Expertengruppe ihren Schlussbericht im Entwurf vor. Insgesamt wird darin die Aufsichtstätigkeit des ENSI vorteilhaft beurteilt. Die Reaktion auf die Ereignisse von Fukushima wird als sehr gut beurteilt. [IAEA IRRS 2011]

Die aufgrund der Ereignisse von Fukushima vorgenommenen Überprüfungen haben in der Schweiz keine eklatanten Fehleinschätzungen bei den Vorgaben für die Auslegung der KKW gegen die Naturereignisse Erdbeben und Überflutung aufgezeigt. Die Gefährdungsannahmen für Erdbeben bedürfen jedoch bekanntermassen einer Anpassung an den neueren Stand der Technik; vgl. Empfehlung 5.1.1. Zudem lenkte die in Fukushima massgebende Ereignisabfolge (Erdbeben → Tsunami → Stromausfall → Kontrollverlust) vermehrte Aufmerksamkeit auf kombinierte Ereignisse. Wie insbesondere aus den Berichten und Verfügungen des ENSI hervorgeht, haben die Überprüfungen auch in der Schweiz in verschiedenen Punkten Verbesserungsbedarf aufgezeigt und Massnahmen ausgelöst; weitere Überprüfungen sind im Gang.

Zentrale Bedeutung für die Sicherheit hat der Mensch als Wissens- und Handlungsträger. Nachdem die ältesten KKW in der Schweiz rund vierzig Jahre alt sind, sind um die Jahr-

tausendwende die letzten Angehörigen der Gründergeneration aus dem Berufsleben ausgeschieden. In der gesamten Kernenergiewirtschaft der Schweiz fand ein Generationenwechsel statt. Auch bei sorgfältig gestalteten Übergangsregelungen ist damit unvermeidbar ein Verlust an Kenntnissen und Erfahrungen verbunden.

Beurteilung durch die KNS

Die Unabhängigkeit der Aufsichtsbehörde wird allgemein als Voraussetzung für eine Aufsichtstätigkeit betrachtet, die dem Primat der Sicherheit verpflichtet ist. Mit der Verselbständigung ist die Unabhängigkeit der Aufsichtsbehörde auf institutioneller Ebene in sachlicher und formeller Hinsicht gewährleistet.

Mit Hinweis auf den Generationenwechsel und angesichts der Tatsache, dass die Überprüfungen nach den Ereignissen von Fukushima auch in der Schweiz in verschiedenen Punkten Verbesserungsbedarf aufgezeigt und Massnahmen ausgelöst haben, weist die KNS auf die Bedeutung unabhängiger und kompetenter Kontrollstrukturen hin.

Auch wenn primär die Betreiber für die Sicherheit verantwortlich sind, so muss die Aufsichtsbehörde in der Lage sein zu überprüfen, ob die Vorschriften durch die Betreiber korrekt umgesetzt werden. Insbesondere muss die Aufsichtsbehörde in einem Notfall die Entscheide der Betreiber beurteilen und begleiten können.

Empfehlung 5.4

Dem ENSI fällt bei einem Zwischenfall oder Unfall die Aufgabe zu, die Vorgehensweise des Betreibers zu bewerten. Zu diesem Zweck müssen die Notfall-Situation und die Zweckmässigkeit von Massnahmen unabhängig vom Betreiber laufend beurteilt werden. Mit geeigneten Mitteln sollen diese Fähigkeiten dauerhaft sichergestellt werden.

6 Gesamtbeurteilung

6.1 Reaktorkatastrophe von Fukushima

Im japanischen Kernkraftwerk Fukushima Daiichi kam es nach dem Tohoku-Erdbeben vom 11. März 2011 zu einem schwerwiegenden Unfall (Kategorie INES 7). Dem Erdbeben folgte ein grosser Tsunami, der das gesamte Kraftwerksareal überflutete. Dadurch fielen fast im gesamten Kraftwerk mit sechs Blöcken zentrale Funktionen aus, insbesondere die Wechselstromversorgung, wesentliche Teile der Instrumentierung und Steuerung sowie die äussere Wärmesenke (Meer). In den drei Blöcken, die vor dem Ereignis in Betrieb waren, wurden die Reaktorkerne stark beschädigt. Durch ungefilterte Druckentlastungen und nach schweren Wasserstoffexplosionen in vier Blöcken wurden grosse Mengen von radioaktiven Substanzen in die Luft freigesetzt. Die Bevölkerung musste grossräumig evakuiert werden. Vor allem ein ca. 20 km breiter, vom Kraftwerk aus ca. 50 km in nordwestlicher Richtung abgehender Landstreifen ist kontaminiert. Erhebliche Mengen an radioaktiven Substanzen gelangten ins Meer.

Die Bewältigung des Unfalls gestaltete und gestaltet sich äusserst schwierig: Mehrere Blöcke waren gleichzeitig schwer betroffen. Erschwerend wirkte anfänglich auch das Umfeld einer Naturkatastrophe nationalen Ausmasses. Schon innerhalb der ersten vierundzwanzig Stunden eskalierte die radiologische Situation. Die Aufräumarbeiten werden mehrere Jahre dauern.

In Kurzform und stark vereinfacht kann der Unfall auf folgende Begebenheiten zurückgeführt werden: Das Tohoku-Erdbeben hatte einen grossen Tsunami zur Folge. Der Tsunami (*auslösendes Ereignis*) überflutete und zerstörte vitale Einrichtungen des Kraftwerks: Die Stromversorgung, Teile der Instrumentierung und Steuerung sowie die äussere Wärmesenke fielen aus (*direkte Folgeschäden*). Diese prekäre Situation ergab sich daraus, dass die Schutzmassnahmen gegen Tsunami im vorliegenden Fall nicht genügten. Wie nachträglich gezeigt wurde, lag der Tsunami vom 11. März 2011 in einem Bereich, der durch die Auslegung hätte abgedeckt werden müssen. Die Schutzmassnahmen gegen Tsunami entsprachen somit nicht den üblichen Regeln der Auslegung gegen Naturereignisse (*Hauptursache*). Verschiedene weitere Unzulänglichkeiten und Schwächen im Bereich der Anlagentechnik und der Organisation trugen dazu bei (*beitragende Faktoren*), dass das Ereignis im weiteren Verlauf nicht in günstigere Bahnen gelenkt werden konnte. Dass die mangelhafte Vorsorge gegen Tsunami über die lange Betriebszeit des Kernkraftwerks Fukushima Daiichi nicht behoben worden war, hat komplexe Hintergründe im Bereich der menschlichen und organisatorischen Faktoren, insbesondere der gesellschaftlichen Strukturen, und kann als mangelnde Sicherheitskultur bezeichnet werden (*Grundursache*). Als massgebende Faktoren für die Reaktorkatastrophe von Fukushima können demnach vereinfachend angegeben werden:

Auslösendes Ereignis:	Erdbebenbedingter, auslegungsüberschreitender Tsunami
Direkte Folgeschäden:	Ausfall der Stromversorgung Ausfall von Teilen der Instrumentierung und Steuerung Ausfall der äusseren Wärmesenke
Hauptursache:	Auslegung gegen Tsunami entsprach nicht den üblichen Regeln der Auslegung gegen Naturereignisse
Beitragende Faktoren:	Zahlreiche Unzulänglichkeiten und Schwächen in Anlagentechnik und Organisation
Grundursache:	mangelnde Sicherheitskultur (komplexe Wechselwirkungen im Bereich der menschlichen und organisatorischen Faktoren, insbesondere der gesellschaftlichen Strukturen)

6.2 Folgemaassnahmen in der Schweiz

Das Eidgenössische Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI) hat als zuständige Aufsichtsbehörde in der Schweiz schnell auf die Ereignisse von Fukushima reagiert. In je fünf Verfügungen, die erste davon bereits am 18. März 2011, wurden die schweizerischen Kernkraftwerke verpflichtet, die Anlagensicherheit insbesondere hinsichtlich Überflutung und Erdbeben gezielt zu überprüfen. In einzelnen Punkten verfügte das ENSI auch bereits Massnahmen. Weitere Massnahmen können sich aufgrund der Ergebnisse der laufenden Überprüfungen ergeben. Aus den Terminen in den Verfügungen und den vom ENSI für sich selbst gesetzten Terminen für die Beurteilung der Eingaben der schweizerischen Kernkraftwerke ergibt sich eine hohe Kadenz von Aktionen.

Kommentar der Eidgenössischen Kommission für nukleare Sicherheit (KNS)

Die KNS begrüsst die entschlossene und sachorientierte Handlungsweise des ENSI. Nach Ansicht der KNS stellt der Zeitplan für Überprüfungen und Massnahmen (vgl. Tabelle 1) sehr hohe Anforderungen an die Betreiber und an das ENSI selbst.

Das ENSI hat die Ereignisse von Fukushima Daiichi dokumentiert und systematisch analysiert. Die Ergebnisse wurden in vier Berichten zuhanden der Öffentlichkeit zusammengefasst [ENSI Ablauf 2011] [ENSI Analyse 2011] [ENSI Lessons 2011] [ENSI Auswirkung 2011]. Für die Folgemaassnahmen in der Schweiz ist der Bericht mit den Lehren [ENSI Lessons 2011] von besonderem Interesse. Darin sind 37 Prüfpunkte für die schweizerischen Kernkraftwerke und die Aufsicht festgehalten, welche das ENSI aufgrund der Lehren aus der Unfallanalyse und nach Evaluation der entsprechenden Verhältnisse in der Schweiz identifiziert hat. In diesem Bericht ist auch für alle Prüfpunkte angegeben, wie sie umgesetzt werden sollen oder gegebenenfalls bereits umgesetzt worden sind. Aufgrund der Ergebnisse der EU-Stresstests [ENSI Stresstests 2011] hat das ENSI noch 8 weitere „offene Punkte“ identifiziert, die überprüft werden sollen.

Auf Bundesebene wurde ausserdem die „Interdepartementale Arbeitsgruppe zur Überprüfung der Notfallschutzmassnahmen bei Extremereignissen in der Schweiz“ (IDA NOMEX) eingesetzt. Sie hat den Auftrag, im Licht der Ereignisse in Japan zu untersuchen, inwiefern in der Schweiz gesetzliche und organisatorische Massnahmen ergriffen werden müssen, um den Notfallschutz weiter zu entwickeln. Verschiedene Prüfpunkte des ENSI fallen in den Tätigkeitsbereich der IDA NOMEX und werden auch von dieser Arbeitsgruppe behandelt.

Auf Aspekte des externen Notfallschutzes geht die KNS nur am Rande ein. Beratendes Organ des Bundes für den externen Notfallschutz ist in erster Linie die Eidgenössische Kommission für ABC-Schutz (KomABC). Die KNS wartet die Ergebnisse der IDA NOMEX ab und wird dann über die Ausarbeitung einer Stellungnahme entscheiden.

Beratendes Organ des Bundes für den Strahlenschutz ist die Eidgenössische Kommission für Strahlenschutz und Überwachung der Radioaktivität (KSR). Zu Fragen des Strahlenschutzes, sowohl innerhalb wie ausserhalb der Kernanlagen, äussert sich die KNS daher nicht.

Die KNS hat die Lehren im Bericht der japanischen Regierung [JGR 2011] und der IAEA Fact Finding Mission [IAEA FFM 2011] beachtet. Diese Kataloge sind umfangreich und enthalten auch Punkte, die auf die Situation in Japan zugeschnitten sind und in diesen Fällen für Folgemaassnahmen in der Schweiz wenig Relevanz aufweisen.

Die KNS ist der Auffassung, dass die Aktionsliste des ENSI mit bisher insgesamt 45 Punkten zur Überprüfung der schweizerischen Kernkraftwerke und der Aufsicht geeignet ist, die möglichen Lehren für die Kernkraftwerke in der Schweiz in umfassender Weise zu ziehen. Die meisten Prüfpunkte sind derzeit noch in Bearbeitung; diese wird sich noch über mehrere Jahre fortsetzen. Unter den bereits eingeleiteten konkreten Massnahmen für alle schweizerischen Kernkraftwerke begrüsst die KNS insbesondere die Bereitstellung von zusätzlichen mobilen Einsatzmitteln zur Bewältigung von schweren Unfällen, die Überprüfung der Notfallinstrumentierung und die Absicht, eine ganzheitliche Strategie zur langfristigen Stromversorgung von ausgewählten Verbrauchern auch bei einem totalen Wechselstromausfall zu entwickeln. Sodann begrüsst die KNS insbesondere auch die Schaffung einer diversitären äusseren Wärmesenke im Kernkraftwerk Mühleberg.

Die KNS äussert sich nur zu wenigen ausgewählten Punkten mit formellen Empfehlungen. Diese sind im nachfolgenden Abschnitt zusammengefasst und betreffen die folgenden Punkte:

- Periodische Überprüfung der internen Notfallschutzmassnahmen unter besonderer Berücksichtigung von Ereigniskombinationen und Folgeereignissen (Empfehlung 4.3);
- Zeitnaher Abschluss der Untersuchungen zur Bestimmung der Erdbebengefährdung an den Standorten der schweizerischen Kernkraftwerke und Festlegung der massgebenden neuen Erdbebengefährdung (Empfehlung 5.1.1);

- Periodische Berücksichtigung neuer Erkenntnisse zur Gefährdung durch Überflutung (Empfehlung 5.1.2);
- Management der Verbraucherlasten zur Erstreckung der Batteriestandzeiten (Empfehlung 5.1.3);
- Optimierung der gefilterten Druckentlastung als Strategie zur Beherrschung der Wasserstoffproduktion bei schweren Unfällen (Empfehlung 5.2.1);
- Validierung und Optimierung des Konzepts des externen Lagers für Einsatzmittel (Empfehlung 5.2.2);
- Dauerhafte Sicherstellung der Fähigkeit des ENSI, bei einem Zwischenfall oder Unfall die Vorgehensweise des Betreibers zu bewerten (Empfehlung 5.4).

Im Text enthaltene Anregungen der KNS betreffen die juristische Prüfung der Zuordnung von Ereignissen zu den Störfallkategorien an den Kategoriengrenzen, die Beachtung von Hangrutschungen im Zusammenhang mit Überflutungsszenarien, die vertiefte Abklärung der Vorgehensweise bei extremer Trockenheit sowie die Berücksichtigung von gleichzeitigen Ereignissen in mehr als einem Block im Kernkraftwerk Beznau.

Den menschlichen und organisatorischen Aspekten kommt speziell auch im Zusammenhang mit dem Unfall von Fukushima eine fundamentale Bedeutung zu. Beurteilungen in diesem Bereich setzen aber detaillierte Einblicke und Analysen zum Einzelfall voraus. Die KNS geht deshalb nicht vertieft auf diesen Themenkreis ein. Sie begrüsst jedoch die Überprüfungen des ENSI in diesem Bereich, insbesondere in den Handlungsfeldern Erfahrungsrückfluss, Aufsicht und Sicherheitskultur.

Hinweis: Eine Gegenüberstellung der Massnahmen, die in verschiedenen massgebenden Ländern mit Kernkraftwerken im Nachgang zur Reaktorkatastrophe von Fukushima getroffen worden sind, kann Anhaltspunkte liefern, um die Sicherheitsvorsorge in den schweizerischen Kernkraftwerken im internationalen Vergleich darzustellen und gegebenenfalls Lücken zu identifizieren.

6.3 Formelle Empfehlungen der KNS

Überprüfung von internen Notfallschutzmassnahmen (Sicherheitsebene 4)

In erster Linie muss die Auslegung (Sicherheitsebene 3) so umfassend und robust gestaltet sein, dass sie möglichst nie überschritten wird. Dennoch ist sicherzustellen, dass bei einem auslegungsüberschreitenden Ereignis wirkungsvolle Handlungsmöglichkeiten im Rahmen von internen Notfallschutzmassnahmen (Sicherheitsebene 4) bestehen.

Empfehlung 4.3

Die Wirksamkeit der internen Notfallmassnahmen (Sicherheitsebene 4) soll periodisch überprüft werden. Dabei sollen Ereigniskombinationen und mögliche Folgeereignisse vermehrt berücksichtigt werden.

Festlegung der massgebenden Erdbebengefährdung

Durch neuere Erkenntnisse ist die heutige Einschätzung der Gefährdung durch Erdbeben deutlich höher als zur Zeit des Baus der schweizerischen Kernkraftwerke. Mit Untersuchungen der Erdbebengefährdung nach fortschrittlichsten Methoden und punktuellen Nachrüstmassnahmen wurde dem Rechnung getragen. Die konkrete Festlegung der für die Auslegung bzw. Requalifikation massgebenden Gefährdungsannahmen steht aber noch aus.

Empfehlung 5.1.1

Die Untersuchungen zur Bestimmung der Erdbebengefährdung der schweizerischen Kernkraftwerke (PEGASOS Refinement Project) sind zeitnah zu einem Abschluss zu bringen und die massgebenden Erdbebengefährdungen durch das ENSI festzulegen.

Periodische Überprüfung der Überflutungsgefährdung

Die im Zusammenhang mit Überflutungen gebotenen Abklärungen und Massnahmen sind mit den Fragestellungen und Forderungen des ENSI eingeleitet bzw. durchgeführt worden, soweit dies seit dem Unfall von Fukushima möglich war. Die Hochwassergefährdungen gemäss Rahmenbewilligungsgesuchen aus dem Jahr 2008 stellen nach wie vor eine aktuelle Basis für die Gefährdung durch Überflutung dar. Darüber hinaus können insbesondere Untersuchungen zu historischen Hochwasserhäufigkeiten und maximalen Hochwasserständen neue Erkenntnisse liefern und sollen periodisch berücksichtigt werden.

Empfehlung 5.1.2

Neue Erkenntnisse zur Gefährdung durch Überflutung, wie zum Beispiel Studien zur historischen Hydrologie, sind im Rahmen der periodischen Sicherheitsüberprüfungen zu berücksichtigen.

Management der Verbraucherlasten zur Erstreckung der Batteriestandzeiten

In Teilen der Anlagen von Fukushima Daiichi blieben Batterien schliesslich für längere Zeit die einzig verfügbare Stromquelle. Die KNS begrüsst, dass im Rahmen der Systemüberprüfungen in der Schweiz auch die Standzeiten von Speichersystemen nochmals überprüft werden. Zur weiteren Erstreckung von Batteriestandzeiten im Rahmen von Notfallmassnahmen kann ein gezieltes Management der Verbraucherlasten beitragen.

Empfehlung 5.1.3

Zur weiteren Stärkung der Vorsorge für den Fall eines lang andauernden Ausfalls der Wechselstromversorgung soll das Optimierungspotenzial zur Erstreckung der Batteriestandzeiten überprüft werden, das sich aus einem gezielten Management der Verbraucherlasten im Rahmen von Notfallmassnahmen ergibt.

Wasserstoffproblem und gefilterte Druckentlastung

Das Problem der Beherrschung des Wasserstoffs wird zwar ausführlich behandelt; bei den vorgesehenen Vorkehrungen besteht aber nach Ansicht der KNS weiterer Optimierungsbedarf. Für die KNS sind die folgenden Ziele massgebend: Erstens ist zu verhindern, dass in einem grösseren Teil des Containments ein zündfähiges Gemisch entsteht. Sollte es, zweitens, dennoch zu einer Zündung von Wasserstoffgas kommen, so muss die Druckspitze beherrschbar bleiben. Zu diesem Zweck kann und soll die gefilterte Druckentlastung eingesetzt werden, neben ihrer Grundfunktion des Überlastschutzes. Da das Containment die letzte Barriere ist, muss seine Beschädigung unter allen Umständen vermieden werden. Prozeduren und Bedienbarkeit müssen zielführend gestaltet sein.

Empfehlung 5.2.1

Die Beherrschung einer voll entwickelten, schnellen Wasserstoffproduktion in den schweizerischen Kernkraftwerken ist zu überprüfen. Die gefilterte Druckentlastung als mögliche Strategie soll mit folgenden Massnahmen optimiert werden:

- Für die Messung von Wasserstoff- und Sauerstoffkonzentration sind störfallfeste Einrichtungen in hinreichender Anzahl an massgebenden Stellen im Primärcontainment zu installieren. Beide Messgrössen sollen als Kriterium herangezogen werden, um die Bildung von zündfähigen Gasgemischen in potenziell schädigendem Umfang durch frühzeitige gefilterte Druckentlastungen zu vermeiden.
- Im Licht der Ereignisse von Fukushima ist zu überprüfen und sicherzustellen, dass die gefilterte Druckentlastung unter erschwerten Bedingungen fehlersicher fernbedient und nötigenfalls manuell vor Ort bedient werden kann, auch unter radiologisch erschwerten Bedingungen.
- Die Prozeduren für eine gefilterte Druckentlastung sind im Voraus festzulegen. Dabei müssen die Entscheidungswege so festgelegt sein, dass eine Autorisierung auch unter erschwerten Bedingungen zeitgerecht vorliegt.

Darüber hinaus empfiehlt die KNS zu prüfen, in welchen Situationen Wasserstoff in benachbarte Räume austreten kann, welche Gefährdung daraus erwächst und mit welchen Massnahmen diese gegebenenfalls beherrscht werden kann.

Vorbereitung auf schwere Unfälle

Die Bereitstellung von zusätzlichen Einsatzmitteln durch die schweizerischen Kernkraftwerke in einem externen Lager ist zu begrüssen. Es bleibt aber offen, ob mit der vorliegenden Lösung eine optimale Wirkung erzielt wird. Beispielsweise birgt der Transport über mittlere Distanz erhebliches Störpotenzial, insbesondere im Umfeld einer Unfallsituation nach bedeutenden Naturereignissen.

Empfehlung 5.2.2

Die KNS empfiehlt, das Konzept des externen Lagers für Einsatzmittel hinsichtlich zeitgerechter Verfügbarkeit von benötigtem Material in Übungen zu validieren und gegebenenfalls zu optimieren.

Behördliche Begleitung von Störfällen

Auch wenn primär die Betreiber für die Sicherheit verantwortlich sind, so muss die Aufsichtsbehörde in der Lage sein zu überprüfen, ob die Vorschriften durch die Betreiber korrekt umgesetzt werden. Insbesondere muss die Aufsichtsbehörde in einem Notfall die Entscheide der Betreiber beurteilen und begleiten können.

Empfehlung 5.4

Dem ENSI fällt bei einem Zwischenfall oder Unfall die Aufgabe zu, die Vorgehensweise des Betreibers zu bewerten. Zu diesem Zweck müssen die Notfall-Situation und die Zweckmässigkeit von Massnahmen unabhängig vom Betreiber laufend beurteilt werden. Mit geeigneten Mitteln sollen diese Fähigkeiten dauerhaft sichergestellt werden.

Dieser Bericht wurde von der KNS in ihrer 46. Sitzung (21. März 2012) verabschiedet.

Brugg, 28. März 2012

Eidgenössische Kommission
für nukleare Sicherheit

Der Präsident

sign. Dr. B. Covelli

Geht an: Eidg. Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK)
Bundesamt für Energie (BFE)
Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI)

Referenzen

- [ENSI Ablauf 2011] Ablauf Fukushima 11032011; Ereignisabläufe Fukushima Dai-ichi und Daini infolge des Tohoku-Chihou-Taiheiyou-Oki Erdbebens vom 11.03.2011; ENSI-AN-7614 Rev. 1; ENSI, Brugg, 26.08.2011 — www.ensi.ch → Dossiers → Fukushima
- [ENSI Aktionsplan 2012] Aktionsplan Fukushima 2012; ENSI-AN-7844; ENSI, Brugg, 28.02.2012 — www.ensi.ch → Dossiers → Fukushima
- [ENSI Analyse 2011] Analyse Fukushima 11032011; Vertiefende Analyse des Unfalls in Fukushima am 11.03.2011 unter besonderer Berücksichtigung der menschlichen und organisatorischen Faktoren; ENSI-AN-7669; ENSI, Brugg, 29.08.2011 — www.ensi.ch → Dossiers → Fukushima
- [ENSI Auswirkung 2011] Auswirkung Fukushima 11032011; Radiologische Auswirkungen aus den kerntechnischen Unfällen in Fukushima vom 11.03.2011; ENSI-AN-7800; ENSI, Brugg, 16.12.2011 — www.ensi.ch → Dossiers → Fukushima
- [ENSI Lessons 2011] Lessons Fukushima 11032011; Lessons Learned und Prüfpunkte aus den kerntechnischen Unfällen in Fukushima; ENSI-AN-7746; ENSI, Brugg, 29.10.2011 — www.ensi.ch → Dossiers → Fukushima
- [ENSI Status 2011] Stand der Abklärungen zum KKW-Unfall von Fukushima (Japan) und Stand der Massnahmen und der vorzeitigen Sicherheitsüberprüfungen bei den schweizerischen Kernkraftwerken; Bericht des ENSI z.Hd. Bundesrat; ENSI, Brugg, 5. Mai 2011
- [ENSI Stresstests 2011] EU Stress Test: Swiss National Report; ENSI review of the operators' reports; ENSI-AN-7798; ENSI, Brugg, 31.12.2011 — www.ensi.ch → Dossiers → EU-Stresstest
- [ENSI Vf1 2011] Verfügung: Massnahmen aufgrund der Ereignisse in Fukushima; vier gleichlautende Verfügungen an die schweizerischen KKW („Verfügung 1“); ENSI, Brugg, 18. März 2011 — www.ensi.ch → Dokumente → Verfügungen
- [ENSI Vf2 2011] Verfügung: Vorgehensvorgaben zur Überprüfung der Auslegung bezüglich Erdbeben und Überflutung; vier gleichlautende Verfügungen an die schweizerischen KKW („Verfügung 2“); ENSI, Brugg, 1. April 2011 — www.ensi.ch → Dokumente → Verfügungen
- [ENSI Vf3 2011] Verfügung: Stellungnahme zu Ihrem Bericht vom 31. März 2011; vier werkspezifische Verfügungen an die KKW Beznau, Gösgen, Leibstadt und Mühleberg („Verfügungen 3“); ENSI, Brugg, 5. Mai 2011 — www.ensi.ch → Dokumente → Verfügungen

- [ENSI Vf3-KKM 2011] Verfügung: Stellungnahme zu Ihrem Bericht vom 31. März 2011; Verfügung an das KKW Mühleberg („Verfügung 3 KKM“); ENSI, Brugg, 5. Mai 2011 — www.ensi.ch → Dokumente → Verfügungen
- [ENSI Vf4 2011] Verfügung: Neubewertung der Sicherheitsmargen des Kernkraftwerks ... im Rahmen der EU-Stresstests; vier gleichlautende Verfügungen an die schweizerischen KKW („Verfügung 4“); ENSI, Brugg, 1. Juni 2011 — www.ensi.ch → Dokumente → Verfügungen
- [ENSI Vf5 2012] Verfügung: Stellungnahme zu Ihrem Bericht zum EU-Stresstest; vier werkspezifische Verfügungen an die KKW Beznau, Gösgen, Leibstadt und Mühleberg („Verfügungen 5“); ENSI, Brugg, 10. Januar 2012 — www.ensi.ch → Dossiers → EU-Stresstest
- [ENSI Stn-Vf3-KKM 2011] Stellungnahme zu den vom KKM eingereichten Verbesserungsmassnahmen zur Erfüllung der Forderungen aus der Verfügung vom 5. Mai 2011; ENSI 11/1502; ENSI, Brugg, 15. November 2011 — static.ensi.ch/1321370401/stellungnahmekkm.pdf
- [ExpBerBW 2011] Ergebnisbericht der Expertenkommission Baden-Württemberg zur Überprüfung der Kernkraftwerke in Neckarwestheim und Philippsburg; Ministerium für Umwelt, Naturschutz und Verkehr Baden-Württemberg, Stuttgart, 6.05.2011 — www.um.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/77924/Ergebnisbericht_Expertenkommission_BW.pdf
- [HSK 2007] Neubestimmung der Erdbebengefährdung an den Kernkraftwerkstandorten in der Schweiz (Projekt PEGASOS); HSK-AN-6252; HSK, Villigen, Juni 2007 (heute: ENSI, Brugg) — www.ensi.ch → Dokumente → Gutachten
- [IAEA FFM 2011] IAEA International Fact Finding Expert Mission of the Fukushima Dai-ichi NPP Accident Following the Great East Japan Earthquake and Tsunami; Japan, 24 May–2 June 2011; Report to the IAEA Member States, IAEA, Vienna, 16 June 2011 — www-pub.iaea.org/MTCD/Meetings/PDFplus/2011/cn200/documentation/cn200_Final-Fukushima-Mission_Report.pdf
- [IAEA IRRS 2011] Integrated Regulatory Review Service (IRRS) Mission to Switzerland; Brugg, Switzerland, 20 November to 2 December 2011; IAEA-NS-IRRS-2011/11; IAEA/IRRS, 2 December 2011 (Draft!)
- [INPO 2011] Special Report on the Nuclear Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station, Revision 0; INPO 11-005; Institute of Nuclear Power Operations; Atlanta (GA), November 2011
- [INSAG-12] Basic safety principles for nuclear power plants (75-INSAG-3, Rev. 1) (1999); International Nuclear Safety Advisory Group; INSAG-12; IAEA, Vienna, 1999 — www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/P082_scr.pdf

- [JGR 2011] Report of the Japanese Government to the IAEA Ministerial Conference on Nuclear Safety; The Accident at TEPCO's Fukushima Nuclear Power Stations; Nuclear Emergency Response Headquarters, Government of Japan, June 2011 — www.kantei.go.jp/foreign/kan/topics/201106/iaea_houkokusho_e.html
- [KNS Pr45 2012] Protokoll der 45. Sitzung der KNS (16. Februar 2012); 3.2 Diskussion Berichtsentwurf mit ENSI; KNS-Pr. 45; KNS, Brugg, 22. März 2012
- [Minoura 2001] K. Minoura, F. Imamura, D. Sugawara, Y. Kono, T. Iwashita; The 869 Jögan tsunami deposit and recurrence interval of large-scale tsunami on the Pacific coast of northeast Japan; Journal of Natural Disaster Science; 23 (2), 83–88, 2001m — jsnds.org/contents/jnds/23_2_3.pdf
- [Nöggerath et al. 2011] J. Nöggerath, R.J. Geller, V.K. Gusiakov; Fukushima: The myth of safety, the reality of geoscience; Bulletin of the Atomic Scientists, 67(5) 37–46 — bos.sagepub.com/content/67/5/37
- [PSI 1993] H. Wedda, Chr. Müller, B. Gerodetti; Bestimmung der Zündgrenzen für das Vierstoffsystem Wasserstoff-Luft-Dampf-Kohlendioxid bei Unfallsituationen in Kernkraftwerken; Technische Mitteilung TM-43-93-30; Paul Scherrer Institut, Villigen, 20.12.1993;
auch: H.P. Alder, H. Wedda; Prevention of Ignitions in the LWR-Containment Atmosphere under Severe Accident Conditions by Carbon Dioxide Inertization; in: Specialists' Meeting on Selected Containment Severe Accident Management Strategies; Stockholm, Juni 1994
- [Wetter-Pfister 2011] O. Wetter, C. Pfister et al.; The largest floods in the High Rhine basin since 1268 assessed from documentary and instrumental evidence; Hydrological Sciences Journal, 56:5 (2011) 733–758 — www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/02626667.2011.583613

Abkürzungen

ENSI	Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat
ENSREG	European Nuclear Safety Regulators Group
EU	Europäische Union
HPCI	High Pressure Coolant Injection
HSK	Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen (seit 1.1.2009 ENSI)
IAEA	International Atomic Energy Agency
IAEO	Internationale Atomenergie-Organisation
IDA NOMEX	Interdepartementale Arbeitsgruppe zur Überprüfung der Notfallschutzmassnahmen bei Extremereignissen
INES	International Nuclear and Radiological Event Scale (Internationale Bewertungsskala für nukleare und radiologische Ereignisse)
INPO	Institute of Nuclear Power Operations
INSAG	International Nuclear Safety Advisory Group (to the Director General of the IAEA)
KKB	Kernkraftwerk Beznau
KKG	Kernkraftwerk Gösgen
KKL	Kernkraftwerk Leibstadt
KKM	Kernkraftwerk Mühleberg
KKW	Kernkraftwerk
KomABC	Eidgenössische Kommission für ABC-Schutz
KNS	Eidgenössische Kommission für nukleare Sicherheit
KSR	Eidgenössische Kommission Strahlenschutz und Überwachung der Radioaktivität
mSv	Milli-Sievert (Einheit für Strahlendosis)
PAR	Passive autokatalytische Rekombinatoren
PEGASOS	Probabilistische Erdbebengefährdungsanalyse für die KKW-Standorte in der Schweiz
PRP	PEGASOS Refinement Project
PSI	Paul Scherrer Institut
RCIC	Reactor Core Isolation Cooling
RHR	Residual Heat Removal (System)
SAMG	Severe Accident Management Guidance
SR	Systematische Sammlung des Bundesrechts
StSV	Strahlenschutzverordnung (SR 814.501)
UVEK	Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation

Anhang 1 Störfallverlauf in den betroffenen Anlagen

Im Folgenden wird ein Überblick über die Akutphase des Ereignisablaufs in den verschiedenen KKW im betroffenen Gebiet gegeben. Die Angaben beziehen sich in erster Linie auf anlagentechnische Aspekte. Auf organisatorische Aspekte wird an dieser Stelle in der Regel nicht eingegangen. Auch auf Strahlenschutzaspekte wird nur am Rande eingegangen, weil diese nicht zum Aufgabenkreis der KNS gehören.

Die Angaben beruhen vor allem auf den Berichten der japanischen Regierung [JGR 2011] und der INPO [INPO 2011]. Für detailliertere Darlegungen sei auf diese Berichte sowie die Berichte der IAEA Fact Finding Mission [IAEA FFM 2011] und des ENSI [ENSI Ablauf 2011] verwiesen. Weitere, hier nicht genannte Quellen finden sich im Internet.

A1.1 KKW Fukushima Daiichi

Die allgemeine Situation im KKW Fukushima Daiichi vor dem Unfall, das Erdbeben und der Tsunami als auslösendes Ereignis sind in Abschnitt 2 beschrieben. In den nachfolgenden Unterabschnitten wird der Störfallverlauf in den einzelnen Blöcken bis zum Beginn der Konsolidierungsphase skizziert. Auf die Ereignisse in den Blöcken 1 bis 3 wird etwas ausführlicher eingegangen, um die im Prinzip möglichen Notfallmassnahmen (Sicherheitsebene 4; vgl. Abschnitte 4.1.3 und 4.2.3) und die Gründe für ihr Scheitern zu illustrieren. Dabei ist die grosse Bedeutung der Stromversorgung zu unterstreichen.

A1.1.1 Fukushima Daiichi Block 1

Wegen des Ausfalls des Stromnetzes beim Erdbeben wurden die Hauptdampfventile geschlossen. Der Isolation Condenser²⁹ wurde automatisch in Betrieb genommen und anschliessend mehrmals von der Betriebsmannschaft angesteuert, um die Abkühlrate des Reaktors innerhalb der Vorgaben zu halten.

Dreiviertel Stunden nach dem Erdbeben traf die grösste Tsunami-Welle ein und führte zum Ausfall der Kühlwasserpumpenanlagen, der Notstromdieselgeneratoren und von Teilen der Gleichstromversorgung. Die Betreiberin meldete den vollständigen Ausfall der Wechselstromversorgung an die Behörden. Wie weit die Funktion des Isolation Condensers, der im Prinzip von Fremdenergie unabhängig ist, nach dem Tsunami aufrecht erhalten blieb, ist gemäss späteren Untersuchungen fraglich. Etwa eine Stunde nach der grössten Tsunami-Welle meldete die Betreiberin den Behörden den Zustand: „Wassereinspeisung durch das Notkühlssystem nicht möglich.“ Von der Überflutung durch die Tsunami-Welle war auch die Gleichstromversorgung für Instrumentierungen betroffen. Der Wasserstand im Reaktor war deshalb nicht bekannt. Es muss aber davon ausgegangen werden, dass der Kern schon wenige Stunden nach Ereignisbeginn abgedeckt war und schliesslich schmolz. Jedenfalls war der Strahlungspegel im Maschinenhaus am 11. März 2011 um 23 Uhr erhöht.

Am 12. März 2011 kurz nach Mitternacht meldete die Betreiberin den Behörden den Zustand: „Anormaler Druckanstieg im Primärcontainment (Sicherheitsbehälter).“ Erreicht wurde ungefähr der doppelte Auslegungsdruck. Eine Druckentlastung des Primärcontainments wurde in den ersten Morgenstunden vereinbart, aber nicht umgesetzt, und gegen 7 Uhr behördlich

²⁹ Isolation Condenser System: Wenn der Reaktor isoliert, d.h. vom Sekundärsystem und damit von der normalen Wärmesenke getrennt ist, kann der Dampf vom Reaktor dem Isolation Condenser zugeführt werden, der ausserhalb des Containments steht. Der eigentliche Kondensator (Wärmetauscher) steht in einem Wasserbehälter. Mit der anfallenden Wärme wird Wasser aus dem Behälter verdampft und an die Umgebung abgeführt. Das primärseitige Kondensat fliesst in den Reaktor zurück. Ist der Isolation Condenser über der Kote des Reaktors angebracht, so kann das Kühlmittel selbsttätig zirkulieren (passiver Kühlkreislauf).

angeordnet. Vor allem wegen technischer und radiologischer Schwierigkeiten verzögerte sich die Druckentlastung weiter: Mangels Strom und Druckluft mussten Ventile vor Ort betätigt werden, was improvisiert werden musste und durch hohe Strahlenpegel, speziell im Torusraum (Untergeschoss des Reaktorgebäudes mit ringförmiger Druckabbaukammer), massiv behindert wurde. Nach Angaben der Betreiberin konnte der Druck im Primärcontainment schliesslich am 12. März 2011 ab 14:30 Uhr abgesenkt werden.

Zuvor war ab 12. März 2011 kurz nach Mitternacht versucht worden, mit einer stationären Feuerwehrrampe Wasser einzuspeisen, was aber nicht gelang. Gegen 6 Uhr morgens konnte mit einem Löschfahrzeug erstmals eingespeist werden, 14 Stunden nach dem Tsunami. Aber anfänglich waren die Einspeiseraten gering (geringe Druckdifferenz und intermittierender Betrieb). Am Nachmittag gingen die Frischwasservorräte aus. Am Abend wurde deshalb mit der Einspeisung von Meerwasser begonnen, bis dann am 25. März 2011 wieder auf Reinwasser umgestellt wurde.

Zurück zum 12. März 2011: Um 15:36 Uhr, etwa eine Stunde nach Beginn der Containment-Druckentlastung, zerriss eine grosse Wasserstoffexplosion³⁰ den Oberbau des Reaktorgebäudes und legte damit die Betriebsetage mit dem Brennelementlagerbecken frei. Auf welchen Pfaden der Wasserstoff in den oberen Teil des Reaktorgebäudes gelangt war, ist nicht bekannt. Mit der Explosion wurden radioaktive Substanzen freigesetzt und die Strahlendosis in der Umgebung stieg an. Auch wurden provisorische Einrichtungen zur Störfallbewältigung beschädigt (Generatoren, Kabel, Feuerwehrrampe, Schlauchleitungen für Meerwassereinspeisung).

Ab ca. 19 Uhr wurde mit einem Feuerwehrrampe Meerwasser mit Bor über das Kernsprühsystem eingespeist. Diese Massnahme wurde über die kommenden Tage fortgeführt. Am 20. März 2011 wurde die externe Stromversorgung wieder hergestellt. Um weitere Explosionen zu verhindern, wurde ab 7. April 2011 in Abstimmung mit behördlichen Vorgaben Stickstoff eingespeist.

Gemäss vorläufigen Analysen ist davon auszugehen, dass der Kern vollständig abgeschmolzen und das Reaktordruckgefäss begrenzt beschädigt ist. Möglicherweise ist auch das Primärcontainment leck. Genauere Kenntnisse liegen nicht vor.

A1.1.2 Fukushima Daiichi Block 2

Wegen des Ausfalls des Stromnetzes beim Erdbeben wurden die Hauptdampfventile geschlossen. Bis zum Eintreffen des Tsunami kamen die vorgesehenen Systeme für die Nachwärmeabfuhr zum Tragen (RCIC³¹ und RHR³²). Dreiviertel Stunden nach dem Erdbeben traf die grösste Tsunami-Welle ein. Einer der Notstromdiesel war im Nasslagergebäude stationiert und lief weiter, aber die zugehörige Stromverteilung wurde überflutet. Somit fielen als Folge des Tsunami die Nachwärmeabfuhrsysteme, die gesamte Wechselstromversorgung und die Gleichstromversorgung für wesentliche Instrumentierungen aus. Die Betreiberin meldete umgehend den vollständigen Ausfall der Wechselstromversorgung an die Behörden. Gewisse Instrumentierungen konnten offenbar am späteren Abend wieder aktiviert werden.

³⁰ Wasserstoff entsteht aus der Zirkon-Wasser-Reaktion: Zirkon ist ein Metall, das für Brennstabhüllrohre und weitere Reaktoreinbauten verwendet wird. Wird Brennstoff ungenügend gekühlt, erhitzt er sich und damit auch das umgebende Hüllrohr. Überhitztes Zirkon oxidiert mit dem Sauerstoff des umgebenden Wasserdampfs, wobei Wasserstoff freigesetzt wird.

³¹ RCIC Reactor Core Isolation Cooling (Wassereinspeisung aus der Druckabbaukammer oder dem Kondensattank in den Reaktor; Antrieb durch Dampfturbine mit Dampf ab Reaktor)

³² RHR Residual Heat Removal System — Nachwärmeabfuhrsystem
(Wärmeabfuhr aus der Druckabbaukammer über Wärmetauscher an die äussere Hauptwärmesenke)

Nach vorliegenden Berichten scheint die Reaktorkühlung und -einspeisung (RCIC) während drei Tagen bei hohem Reaktordruck (ca. 60 bar) erhalten geblieben zu sein, länger als aufgrund der Batteriekapazität zu erwarten gewesen wäre. In dieser Zeit wurde versucht, alternative Wasser-Einspeisungen zu realisieren.

Eine alternative Hochdruckeinspeisung über betriebliche Hilfssysteme und zugehörige kurzschlussfreie Stromverteilungen wurden ausfindig gemacht. Eine entsprechende Stromversorgung ab einem Generatorfahrzeug stand unmittelbar vor der Inbetriebnahme, als sich etwa 25 Stunden nach dem auslösenden Erdbeben die Wasserstoffexplosion in Block 1 ereignete. Trümmerteile beschädigten das Kabel und das Generatorfahrzeug. Die Arbeiten im Areal mussten eingestellt werden. Am nächsten Tag konnte die provisorische Stromversorgung nicht mehr in Betrieb genommen werden.

Als Vorbereitung für eine Niederdruckeinspeisung wurden Druckentlastungen des Primärcontainments und des Reaktordruckgefässes eingeleitet bzw. vorbereitet. Am 13. März 2011 um 11 Uhr war die Leitung für die Druckentlastung des Primärcontainments ab Druckabbaukammer (Torus) durchgeschaltet. Der angezeigte anstehende Druck lag aber unter dem Auslösedruck der Berstscheibe, für welche keine Umgehung vorhanden war. Am 14. März 2011 um 11 Uhr ereignete sich die Wasserstoffexplosion im benachbarten Block 3. Die provisorische Stromversorgung für das Druckentlastungsventil bei der Druckabbaukammer wurde beschädigt und das Ventil schloss. Ebenfalls beschädigt wurden ein Feuerwehrfahrzeug und Leitungen, welche für eine Einspeisung von Meerwasser vorbereitet worden waren. Die Arbeiten im Areal wurden unterbrochen.

Am 14. März 2011 nach 13 Uhr begann das Wasserniveau im Reaktordruckgefäss zu sinken, vermutlich wegen Ausfalls des RCIC. Zu diesem Zeitpunkt lag der Wasserstand gemäss Anzeige noch 2.4 m über der aktiven Zone des Reaktors. Um eine Einspeisung ab Feuerwehrfahrzeugen zu ermöglichen, wurde versucht, den Druck im Reaktordruckgefäss abzusinken. Aber erst um 18 Uhr konnte mit Hilfe von eingesammelten Autobatterien nur ein einziges Sicherheitsventil geöffnet werden, sodass der Druckabbau langsam verlief. Als eine Stunde später ein Druckniveau erreicht war, das eine Einspeisung ermöglicht hätte, wurde festgestellt, dass beim angeschlossenen Feuerwehrfahrzeug der Brennstoff ausgegangen war. (Dieses konnte wegen der Strahlenbelastung nicht dauernd bemannt, sondern nur periodisch kontrolliert werden.) Ab etwa 20 Uhr, ca. 6½ Stunden nachdem das Wasserniveau laut Anzeige zu sinken begonnen hatte, konnte dann mit zwei Feuerwehrfahrzeugen Meerwasser eingespeist werden. Gemäss Füllstandanzeige war der Kern zu diesem Zeitpunkt vollständig abgedeckt.

Die weitere Entwicklung von angezeigten Drücken in den beiden Kammern des Primärcontainments sowie von angezeigtem Druck und Füllstand im Reaktordruckgefäss ist nicht einfach nachvollziehbar. Von mehreren Druckanstiegen im Reaktordruckgefäss wird berichtet und das Primärcontainment scheint fast doppelten Auslegungsdruck erreicht zu haben. Weiterhin wurde mit Ventilschaltungen vor Ort versucht, den Druck im Primärcontainment abzusinken, was aber nicht gelang. Es ist davon auszugehen, dass in den Phasen nach dem Funktionsverlust des RCIC der Reaktorkern stark beschädigt und Wasserstoff freigesetzt wurde.

Am 15. März 2011 kam es um 6 Uhr im Bereich des Druckabbauringes im Untergeschoss des Reaktorgebäudes zu einer Explosion, vermutlich einer Wasserstoffexplosion. Etwa gleichzeitig ereignete sich eine dritte grosse Wasserstoffexplosion in Block 4. Dies führte erneut zu einem Arbeitsunterbruch. Äusserlich sind keine Schäden am Reaktorgebäude von Block 2 beobachtet worden. Im obersten Geschoss (Betriebsebene) hatte sich bereits durch die Explosion in Block 1 ein Überdruck-Wandelement geöffnet; durch die so entstandene Belüftung dürfte die Bildung von zündfähigem Gasgemisch verhindert worden sein, falls Wasserstoff ins Obergeschoss freigesetzt worden sein sollte.

Die am Abend des 14. März 2011 begonnene Einspeisung von Meerwasser wurde über die folgenden Tage fortgesetzt.

Die genauen Vorgänge, die zur Explosion in Block 2 führten, wie auch der genaue Zustand der Anlage sind nicht bekannt. Vermutet wird, dass sich der Grossteil des zerstörten Reaktorkerns im unteren Teil des Reaktordruckgefässes befindet und mit der fortgeführten Bespeisung gekühlt wird. Möglicherweise ist ein Teil des Kernmaterials aus dem Reaktordruckgefäss ausgeflossen. Aufgrund der Explosion werden Leckagen an der Druckabbaukammer vermutet.

A1.1.3 Fukushima Daiichi Block 3

Wegen des Ausfalls des Stromnetzes beim Erdbeben wurden die Hauptdampfventile geschlossen. Etwa eine Viertelstunde später wurde das RCIC-System manuell gestartet.

Nach dem Tsunami meldete die Betreiberin umgehend den vollständigen Ausfall der Wechselstromversorgung an die Behörden. In Block 3 blieb die Gleichstromverteilung teilweise funktionsfähig. Das RCIC-System speiste Wasser in den Reaktor ein. Es stellte die Funktion am Mittag des 12. März 2011 ein, vermutlich wegen erschöpfter Batterien. In der Folge übernahm das Hochdruckeinspeisesystem (HPCI³³), das wie das RCIC durch Dampf aus dem Reaktor angetrieben wird, diese Funktion.

Nach etwa 14 Stunden Betrieb fiel das HPCI am 13. März 2011 um 02:42 Uhr aus (36 Stunden nach dem Erdbeben). Der Versuch einer Einspeisung durch eine dieselgetriebene Feuerlöschpumpe scheiterte, weil der Druck im Reaktordruckbehälter nicht abgesenkt werden konnte. Bis 4 Uhr stieg der Reaktordruck auf 70 bar an. Nach stundenlangen Anstrengungen gelang es um 08:40 Uhr, die Abblaseleitung durchzuschalten und die Druckentlastung des Primärcontainments begann. Etwa gleichzeitig konnte auch das Reaktordruckgefäss entlastet werden, sodass ab 09:25 Uhr boriertes Wasser in den Reaktor eingespeist werden konnte. Dieses Regime aufrecht zu erhalten, bereitete grosse Schwierigkeiten: Beschaffung von Wasser, Offenhalten der Abblaseleitung ohne Strom- und Druckluftversorgung, eskalierende radiologische Situation, Nachbeben usw.

Am 14. März 2011 um 11 Uhr ereignete sich eine grosse Wasserstoffexplosion, die den Oberbau des Reaktorgebäudes komplett, das darunterliegende Geschoss und das Abfallbehandlungsgebäude stark zerstörte. Dabei kam es auch zu einem Ölbrand. Trümmerteile beschädigten provisorische Einrichtungen zur Störfallbewältigung und waren teilweise stark radioaktiv. Nach einem Unterbruch aller Arbeiten konnte um 16:30 Uhr eine neue Wassereinspeisung in Betrieb genommen werden und wurde über die folgenden Tage fortgesetzt.

Wie für die anderen Blöcke sind die genauen Vorgänge und Schäden, die zur Explosion führten, nicht bekannt, ebenso wenig der genaue Zustand der Anlage. Vermutet wird, dass ein Grossteil des Reaktorkerns abgeschmolzen ist und ein Teil der Schmelze aus dem Reaktordruckgefäss austrat. Bilanzen zum eingespeisten Wasser lassen darauf schliessen, dass das Reaktordruckgefäss leck ist.

Mit den aktiv herbeigeführten Druckentlastungen des Primärcontainments, durch die Explosion und die nachfolgenden Abgaben wurden erhebliche Mengen an radioaktiven Substanzen freigesetzt.

³³ HPCI High Pressure Coolant Injection (Hochdruck-Wassereinspeisung aus dem Kondensattank in den Reaktor; Antrieb durch Dampfturbine mit Dampf ab Reaktor)

A1.1.4 Fukushima Daiichi Block 4

Block 4 war seit dem 30. November 2010 im Revisionsstillstand, wobei grössere Unterhaltsarbeiten ausgeführt wurden (Ersatz des Kernmantels). Der Kern war ausgeladen und die Wärmelast im Brennelementlagerbecken deutlich höher als in den anderen Blöcken.

Am 15. März 2011 um 6 Uhr ereignete sich eine grosse Wasserstoffexplosion, die den Oberbau des Reaktorgebäudes komplett und auch Teile der darunter liegenden Geschosse teilweise zerstörte. Später kam es noch zu einem oder zwei Bränden. Da Block 4 vor dem Unfall nicht in Betrieb war, ist unklar, woher der Wasserstoff stammte. Nach Angaben der Betreiberfirma könnte möglicherweise Wasserstoff von Block 3 über die Abgasleitung („rückwärts“) in Block 4 eingeströmt sein. (Die Leitungen von Block 3 und Block 4 sind beim Hochkamin verbunden.)

Die Explosion hatte einen erneuten Unterbruch der Arbeiten zur Folge. Nur noch etwa siebenzig unbedingt erforderliche Personen verblieben im Areal; ca. 650 Personen wurden vorübergehend in das KKW Fukushima Daini evakuiert.

Einen Tag vor der Explosion hatte das Brennelementlagerbecken nahezu Siedetemperatur erreicht, weil die Kühlung ausgefallen war. Ab 20. März 2011 wurde mit Wasserwerfern und Helikoptern, ab 22. März 2011 erfolgreich mit einer Betonpumpe Wasser zugeführt. Befürchtungen, dass eingelagerter Brennstoff freigelegt worden sein könnte, scheinen nach aktueller Datenlage gegenstandslos zu sein [INPO 2011].

A1.1.5 Fukushima Daiichi Blöcke 5 und 6

Die Reaktoren von Block 5 und 6 waren nach mehrmonatigen Unterhaltsabschaltungen wieder mit Brennstoff beladen und das Reaktordruckgefäss verschlossen. In Block 5 war die Dichtheitsprüfung im Gang und zur Zeit des Erdbebens stand das Reaktordruckgefäss etwa unter Betriebsdruck.

Nach dem Tsunami meldete die Betreiberin umgehend den vollständigen Ausfall der Wechselstromversorgung in Block 5 an die Behörden. In Block 6 blieb ein Notstromdieselgenerator verfügbar, der luftgekühlt und in einem separaten Gebäude untergebracht ist, auf höherer Kote als die meisten anderen Dieselgeneratoren. Mit manuellen Druckreduktionen am Reaktordruckgefäss und – nach Einrichtung einer Stromversorgung für Block 5 – mit dem Kondensatsystem konnte die Situation bei beiden Reaktoren weitgehend kontrolliert werden. Nach behelfsmässiger Installation einer Meerwasserpumpe stand am 19. März 2011 auch wieder ein Nachwärmeabfuhrsystem zur Verfügung, sodass abwechselnd die Reaktoren und die Brennelementlagerbecken gekühlt werden konnten. Am 20. März 2011 erreichten beide Reaktoren den Zustand „kalt abgeschaltet“.

A1.2 Die übrigen KKW im Katastrophengebiet

A1.2.1 KKW Tokai Daini

1 Block; Inbetriebnahme 1978

Der erdbebenbedingte Ausfall der 3 Anschlussleitungen zum Stromnetz wurde mit Notstromdieselgeneratoren während gut zwei Tagen überbrückt.

Die Tsunami-Wellen erreichten die Ebene der Hauptgebäude nicht. Bei den etwas tiefer angeordneten Meerwasserpumpstationen waren Nachrüstungen im Gang, um den Überflutungsschutz um 1.2 m zu erhöhen. Die Mauern waren errichtet, aber Durchführungen

beim nördlichen Becken noch nicht abgedichtet. Dort eindringendes Wasser überflutete die Kühlwasserpumpe für einen der drei Notstromdieselgeneratoren und führte zu dessen Ausfall. Mit den verbleibenden zwei Dieselgeneratoren konnte die Situation beherrscht werden.

A1.2.2 KKW Fukushima Daini

4 Blöcke; Inbetriebnahmen 1981, 1983, 1984, 1986

Nach dem Erdbeben blieb eine 500-kV-Verbindung zum Stromnetz verfügbar, während zwei weitere Anschlussleitungen wegen des Erdbebens und eine wegen Unterhaltsarbeiten ausgefallen waren.

Die genaue Höhe des Tsunami ist nicht bekannt, erreichte aber etwa 7 m Überflutungshöhe. Obwohl die oberirdischen Teile der Meerwasserpumpenanlagen in Gebäuden untergebracht waren, wurden sie durch den Tsunami überflutet und ausser Betrieb gesetzt, ausgenommen Teile der Anlagen von Block 3. Die 12 m über Meer angelegten Plattformen für die Hauptgebäude wurden nicht überflutet. Block 3 erreichte den sicheren Zustand „kalt abgeschaltet“ am 12. März 2011 mittags.

Für die Blöcke 1, 2 und 4 war infolge der Überflutungen das Meer als äussere Wärmesenke nicht mehr verfügbar; verfügbar waren nur noch die RCIC-Systeme und die Kondensat-Einspeisesysteme. Am frühen Abend des 11. März 2011 meldete das KKW für die betroffenen 3 Blöcke den Status „Verlust der Wärmeabfuhr aus dem Reaktor“, zwölf Stunden später den Status „Verlust der Kontrolle über den Reaktordruck“. Mit Ersatz von beschädigten Pumpen und provisorischen elektrischen Installationen wurde erreicht, dass am 14. März 2011 gestaffelt wieder je ein Kreis der Nachwärmeabfuhrsysteme in den Blöcken 1, 2 und 4 in Betrieb genommen werden konnte. Jeweils etwa einen halben Tag später erreichten auch diese Reaktoren den sicheren Zustand „kalt abgeschaltet“.

A1.2.3 KKW Onagawa

3 Blöcke; Inbetriebnahmen 1983, 1994, 2001

Zur Zeit des Ereigniseintritts wurde Block 2 nach dem Brennelementwechsel hochgefahren; die beiden anderen Blöcke waren im Leistungsbetrieb. Nach dem Erdbeben war nur noch eine 275-kV-Leitung von insgesamt 5 Anschlussleitungen an das Netz verfügbar. Bei Block 1 war ein Anfahr-Transformator für einen Tag nicht verfügbar, was mit den Notstromdieselgeneratoren überbrückt wurde.

Die grösste Tsunami-Welle war bei dieser Anlage mit 13 m sehr hoch, erreichte aber die Ebene der Hauptgebäude nicht (Kote 13.8 m nach Absenkung um 1 m durch geologische Deformation). Vom unterirdischen Zulauf her strömte aber Wasser aus Meeresniveau-Messschächten in den vertieft angeordneten Pumpenraum einer Meerwasserpumpe und von dort in das Untergeschoss von Block 2, wo der Wärmetauscherraum mit einer Pumpe für die Komponentenkühlung überschwemmt wurde. Damit war der Ausfall von zwei der insgesamt drei Notstromdieselgeneratoren von Block 2 verbunden.

Trotz dieser Schwierigkeiten konnten alle Reaktorblöcke in den sicheren Zustand „kalt abgeschaltet“ überführt werden.

A1.2.4 KKW Higashidori

1 Block; Inbetriebnahme 2005

Diese Anlage befand sich im Revisionsstillstand. Erdbebenbedingt fiel die externe Stromversorgung für neun Stunden aus; diese Zeit wurde mit einem Dieselgenerator überbrückt; der zweite war wegen Unterhaltsarbeiten nicht verfügbar. Für diesen Standort wurde von keinen Schäden infolge Erdbeben oder Tsunami berichtet.

Eidgenössische Kommission
für nukleare Sicherheit
Gaswerkstrasse 5
5200 Brugg
Schweiz / Switzerland

Telefon +41 56 462 86 86
contact@kns.admin.ch
www.kns.admin.ch