

Der Unfall in Fukushima

Zwischenbericht
zu den Abläufen in
den Kernkraftwerken
nach dem Erdbeben
vom 11. März 2011

Der Unfall in Fukushima

Zwischenbericht
zu den Abläufen in
den Kernkraftwerken
nach dem Erdbeben
vom 11. März 2011

Stefan Borghoff
Benjamin Brück
Yvonne Kilian-Hülsmeier
Michael Maqua
Oliver Mildenberger
Claudia Quester
Thorsten Stahl
Gernot Thuma
Norbert Wetzel
Volker Wild

August 2011

Anmerkung:

Dieser Bericht wurde im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) im Rahmen des Vorhabens 3609R01700 erstellt.

Die Arbeiten wurden von der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH durchgeführt.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Auftragnehmer. Der Bericht gibt die Auffassung des Auftragnehmers wieder und muss nicht mit der Meinung des Auftraggebers übereinstimmen.

Deskriptoren:

Erdbeben, Fukushima, INES, Kernkraftwerk, Nuklearkatastrophe, Unfall, Reaktor, Tsunami

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Auslösendes Ereignis	3
3	Fukushima Dai-ichi.....	7
3.1	Standort.....	7
3.2	Kurzbeschreibung und Chronologie des Unfallhergangs.....	10
3.3	Fukushima Dai-ichi, Block 1.....	13
3.3.1	Anlagenbeschreibung	13
3.3.2	Ereignisablauf in Fukushima Dai-ichi, Block 1.....	20
3.4	Fukushima Dai-ichi, Block 2.....	29
3.4.1	Anlagenbeschreibung der Blöcke 2 – 4.....	29
3.4.2	Ereignisablauf in Fukushima Dai-ichi, Block 2.....	37
3.5	Fukushima Dai-ichi, Block 3.....	43
3.5.1	Anlagenbeschreibung	43
3.5.2	Ereignisablauf in Fukushima Dai-ichi, Block 3.....	43
3.6	Fukushima Dai-ichi, Block 4.....	51
3.6.1	Anlagenbeschreibung	51
3.6.2	Ereignisablauf in Fukushima Dai-ichi, Block 4.....	51
3.7	Brennelementlagerbecken der Blöcke 1 – 6.....	53
3.8	INES-Einstufung der japanischen Behörde für Fukushima Dai-ichi.....	54
4	Maßnahmen zur Begrenzung der Unfallfolgen am Standort Fukushima Dai-ichi.....	55
4.1	Maßnahmen zur Aufrechterhaltung eines stabilen Anlagenzustandes	55
4.2	Sonstige Maßnahmen auf dem Anlagengelände.....	55
5	Fukushima Dai-ni.....	59
5.1	Standort.....	59
5.2	Erdbeben und Tsunami.....	60
5.3	Fukushima Dai-ni, Block 1, 2 und 4	60

5.4	Fukushima Dai-ni, Block 3	61
5.5	INES-Einstufung der japanischen Behörde für Fukushima Dai-ni	61
6	Radiologische Situation	63
6.1	Radiologische Situation am Standort Fukushima Dai-ichi	63
6.2	Abschätzung der luftgetragenen Freisetzung	67
6.3	Radiologische Situation in der Umgebung	69
6.4	Kontamination von Meerwasser	71
6.5	Maßnahmen zum Schutz der Bevölkerung	74
6.5.1	Umgebung des Standorts Fukushima Dai-ichi	74
6.5.2	Umgebung des Standorts Fukushima Dai-ni.....	76
7	Lessons Learned nach NISA und IAEA Fact-Finding Mission	77
7.1	Report of Japanese Government to the IAEA Ministerial Conference on Nuclear Safety – The Accident at TEPCO's Fukushima Nuclear Power Stations	77
7.2	IAEA International Fact-Finding Expert Mission of the Fukushima Dai- ichi NPP Accident following the Great East Japan Earthquake and Tsunami.....	79
8	Offene Punkte	81
8.1	Wasserstoffexplosion auf dem Beckenflur von Block 4	81
8.2	Rekritikalität	82
8.3	Explosion in Block 2.....	83
8.4	Krisenmanagement und Kommunikation	84
8.5	Füllstandsmessung.....	85
9	Erkenntnisse für deutsche Anlagen	87
	Quellen	89
	Abbildungen.....	93
	Tabellen.....	95

1 Einleitung

Dieser Zwischenbericht zu den Ereignissen aufgrund des Tohoku-Erdbebens vom 11.03.2011 an den japanischen Kraftwerksstandorten Fukushima Dai-ichi (I) und Dai-ichi (II) wurde von der GRS im Auftrag des BMU erstellt. Er fasst den Informationsstand bis Ende Juni 2011 zusammen. Eine zugehörige Datensammlung wurde für diesen Bericht und weitere wissenschaftliche Aufarbeitungen durch die GRS angelegt. Der Bericht enthält Anlagenbeschreibungen der havarierten Reaktoren in Fukushima Dai-ichi, deren Unfallabläufe sowie Aspekte zur radiologischen Situation am Standort. Die aktuellen Pläne des Betreibers und der japanischen Regierung zur Verbesserung der Situation am Kraftwerksstandort werden dargelegt, genauso wie bisherige Erkenntnisse aus den Auswertungen der japanischen Aufsichtsbehörde zur Verbesserung der allgemeinen Sicherheitsstandards in Kernkraftwerken.

Im Rahmen der Unterstützung des BMU wurde von der GRS bereits am 11.03.2011 ein Notfallzentrum eingerichtet, das in entsprechenden Lagedarstellungen über den jeweiligen Kenntnisstand zu den Unfällen und Ereignissen in den betroffenen japanischen Kernkraftwerken berichtete. In der Zwischenzeit liegen detailliertere Informationen zu den Ereignissen in den japanischen Kernkraftwerken vor, die in diesem Bericht zusammengefasst werden. Die Hauptquellen zum Unfallhergang und zu den Anlagen stammen einerseits von der Tokyo Electric Power Company (TEPCO), dem Betreiber des Kraftwerksstandortes Fukushima, und andererseits von der japanischen Aufsichtsbehörde NISA. Inzwischen gibt es von japanischer Seite sowie von der IAEA erste Informationen zu sogenannten „lessons learned“, die in diesem Bericht zusammenfassend dargestellt werden.

Die Arbeiten zu diesem Bericht wurden im Auftrag des BMU innerhalb des Vorhabens „Ermittlung des internationalen Standes von Wissenschaft und Technik auf dem Gebiet der kerntechnischen Sicherheit und dessen nationale Umsetzung“ im Arbeitspunkt „Auswertung internationaler Betriebserfahrung“ geleistet.

2 Auslösendes Ereignis

Am 11. März 2011 ereignete sich um 14:46 Ortszeit (5:46 UTC) vor der Ostküste der japanischen Hauptinsel Honshu ein Erdbeben der Stärke $M_W = 9,0$ (Momentmagnitudenskala). Durch dieses Erdbeben wurde auch ein Tsunami ausgelöst, der neben den unmittelbaren Erdbebeneinwirkungen erheblich zur Schadensbilanz des Gesamtereignisses in den betroffenen Regionen beitrug (15.592 Tote und 5.070 Vermisste; Stand: 19.07.2011, [19]). Im Folgenden werden die tektonischen Hintergründe des Erdbebens und seine Auswirkungen auf der Insel Honshu sowie die Charakteristika des Tsunami zusammenfassend dargestellt.

Im Japanischen Graben taucht die Pazifische Platte unter die Eurasische und Philippinische Platte ab.¹ Die mittlere Verschiebungsgeschwindigkeit an dieser Subduktionszone beträgt 83 mm/Jahr. Die durch diese Subduktion entstehenden Spannungen in den beteiligten tektonischen Platten werden in unregelmäßigen Abständen in Erdbeben unterschiedlicher Stärke und aseismischen Gleitvorgängen abgebaut. Das Erdbeben vom 11. März 2011 ist einem solchen Entlastungsprozess zuzuordnen. Während des etwa 150 s dauernden Erdbebens erfolgt auf einer Fläche (13° Neigung gegen die Horizontale, Tiefe des Erdbebenherds » 30 km) von 510 km x 210 km in zwei Phasen eine Relativverschiebung von ≤ 23 m [20]. Am über der Bruchfläche liegenden Meeresboden resultierte dies in einem Horizontalversatz von ≤ 15 m und einem Vertikalversatz von ≤ 9 m, durch den ein Tsunami ausgelöst wurde. Diesem Hauptbeben gingen am 9. März 2011 ein starkes Vorbeben mit einer Momentmagnitude von $M_W = 7,3$ sowie mehrere schwächere Vorbeben voraus.² Die Nachbebentätigkeit dauert immer noch an und wird (messtechnisch) noch über Monate hinweg zu verfolgen sein. Bereits in den ersten zehn Tagen nach dem Hauptbeben wurden mehr als 250 Nachbeben mit Stärken $M_W \geq 5$ registriert. Bis heute traten 6 Nachbeben mit Stärken $M_W \geq 7$ auf.

Aufgrund der Abstrahlungscharakteristik des Herdprozesses traten die größten Bodenbeschleunigungen nicht an der relativ herdnahen Küstenlinie auf (mittlere Entfernung des Epizentrums von der Küste » 120 km), sondern im Landesinneren, in der Präfektur

¹ In anderen Interpretationen der tektonischen Struktur der Region wird die hängende (obere) Platte (unter die die Pazifische Platte subduziert wird) als Teil der Nordamerikanischen Platte oder als eigenständige Mikroplatte angesehen.

² Vorbeben lassen sich erst nach Auftreten des Hauptbebens als solche identifizieren und können daher nicht zur Erdbebenvorhersage/-warnung herangezogen werden.

Miyagi. In der Stadt Tsukidate wurde mit $29,3 \text{ m/s}^2$ (3D-Resultierende; max. Horizontalkomponente: $27,0 \text{ m/s}^2$, Vertikalkomponente: $18,8 \text{ m/s}^2$) die größte Bodenbeschleunigung gemessen. Dies entspricht auf der Intensitätsskala der Japanese Meteorological Agency (JMA) einer Intensität von $I_{\text{JMA}} \gg 7$. Nach der Europäischen Makroseismischen Skala (EMS) wäre dem mit dieser JMA-Intensität verbundenen Schadensbild eine Intensität $I_{\text{EMS}} \gg \text{XI}$ zuzuordnen. In anderen Gebieten wurden geringere Bodenbeschleunigungen (max. Horizontalkomponente der K-Net-Messungen) und Intensitäten gemessen, so zum Beispiel in Sendai (MYG013) $15,2 \text{ m/s}^2 / I_{\text{JMA}} \gg 7^3$, in Fukushima (FKS003) $3,3 \text{ m/s}^2 / I_{\text{JMA}} \gg 6^+$ und in Tokyo (TKY007) $1,9 \text{ m/s}^2 / I_{\text{JMA}} \gg 5^+$.

Für die Standorte der Kernkraftwerke, die von dem Erdbeben betroffen waren, liegen ebenfalls Beschleunigungsmessungen vor. Bei diesen Messungen handelt es sich jedoch nicht wie bei den oben angeführten um Freifeldmessungen, sondern um Beschleunigungen an der Fundamentplatte der Reaktorgebäude. Ein direkter Vergleich der Werte ist somit nicht möglich, da bei den Messungen an der Fundamentplatte die Boden-Bauwerkwechselwirkung bereits zu einer Filterung geführt hat. Als Maximalwert werden am Standort Onagawa etwa $6,1 \text{ m/s}^2$ (Horizontalbeschleunigung im Block 2, Auslegung $5,9 \text{ m/s}^2$), am Standort Tokai etwa $2,3 \text{ m/s}^2$ (Horizontalbeschleunigung, Auslegung 4 m/s^2), am Standort Fukushima Dai-ichi $5,5 \text{ m/s}^2$ (Horizontalbeschleunigung im Block 2, Auslegung $4,4 \text{ m/s}^2$) und am Standort Fukushima Dai-ni knapp $3,1 \text{ m/s}^2$ (Vertikalbeschleunigung im Block 1, Auslegung $5,1 \text{ m/s}^2$) berichtet. Damit wurden an den Standorten Onagawa und Fukushima Dai-ichi die Auslegungswerte überschritten (Design Basis Ground Motion, DBMG).

An vielen Orten der Ostküste Honshus wurden die Schäden durch die beschriebenen erdbebeninduzierten Erschütterungen von den Folgen des Tsunami weit übertroffen.

Typischerweise lösen Erdbeben dann Tsunamis aus, wenn drei Kriterien zusammenreffen: (1) Erdbebenstärke $M_w \geq 6,5$, (2) deutliche Vertikalkomponente des Versatzes der beteiligten tektonischen Platten und (3) oberflächennahe Lage des Hypozentrum (dicht unter dem Meeresgrund). Diese drei Komponenten waren bei dem Tsunami-

³ Die Intensität 7 stellt die höchste Stufe der JMA-Intensitätsskala dar. Dieser Wert wird bereits bei Bodenbeschleunigungen von etwa 4 m/s^2 erreicht, so dass ab dieser Beschleunigung keine weitere Differenzierung stattfindet. Daher wird auch der gegenüber Tsukidate geringeren Schadenswirkung des Erdbebens in Sendai die Intensität $I_{\text{JMA}} = 7$ zugeordnet.

ereignis am 11.03.2011 vor der japanischen Küste gegeben (Erdbebenstärke: $M_w = 9,0$, Vertikalversatz: + 9 m, Hypozentrum: 30 km Tiefe).

Bei einem Tsunami handelt es sich um Schwerewellen (Flachwasserwellen, d. h. Wellenlänge \gg Wassertiefe), die durch Erdbeben, Hangrutschungen, Vulkanausbrüche oder Meteoriteneinschläge ausgelöst werden und sich mit rund 800 Kilometer pro Stunde in alle Richtungen ausbreiten. Beim Auftreffen auf eine Küste können durch die Bodenreibung und die damit verbundene Aufsteilung der Wellen Wasserhöhen von vielen Metern erreicht werden. Neben der reinen Wasserbedeckung spielen für die Schadenswirkung eines Tsunami auch die mit dem Massentransport und der internen Dynamik der Wellen verbundenen Kräfte eine entscheidende Rolle.

Der durch das Erdbeben vom 11. März 2011 ausgelöste Tsunami erreichte den epizentrumnächsten Punkt der japanischen Küste (nahe Sanriku) nach etwa 30 Minuten. In östlicher Richtung erreichten die Wellen Hawaii nach etwa 8 Stunden, die US-amerikanische Pazifikküste nach gut 9 Stunden und Chile nach 22 Stunden [21].

An der Pazifikküste der japanischen Hauptinsel Honshu variierte die maximale Höhe der Tsunamiwellen zwischen etwa 0,6 m und mehr als 10 m. In Tokyo wurden z. B. 1,3 m, in Onahama (Fukushima) 3,3 m und in Soma (Fukushima) mehr als 9 m ermittelt. Die Küste von Fukushima (im Gebiet der Stadt Soma) wurde von den ersten flachen Wellen gegen 14:55 Uhr Ortszeit erreicht. Die Hauptwelle traf ca. 55 Minuten später (1 Stunde und 4 Minuten nach dem Erdbeben), um 15:50 Uhr Ortszeit ein [22]. Den Standort des Kernkraftwerks Fukushima Dai-ichi erreichten erste größere Wellen um 15:27 Uhr und 15:35 Uhr, die Hauptwelle traf um 15:41 Uhr Ortszeit ein, also 55 Minuten nach dem Erdbeben [2]. Dort wurde eine Wellenhöhe von 14 m erreicht [23]. Von den Kernkraftwerkstandorten Fukushima Dai-ni und Onagawa werden Wellenhöhen von 10 m bzw. 15 m berichtet. Insgesamt wurde eine Fläche von 561 km^2 durch den Tsunami überflutet [21].

3 Fukushima Dai-ichi

3.1 Standort

Der Standort Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Station liegt an der Ostküste des Pazifiks in der Präfektur Fukushima ca. 250 km nördlich von Tokio (siehe Abb. 3.1). Hier befinden sich insgesamt sechs Siedewasserreaktorblöcke, deren Betrieb ab 1971 begann (siehe Tab. 3.1 und Abb. 3.2). Die insgesamt installierte Leistung beträgt 4.696 MW. Der Betreiber der Anlagen ist die Firma Tokyo Electric Power Company (TEPCO). Block 1 ist von der GE-Bauart BWR 3. Die Blöcke 2 bis 5 sind von der Bauart BWR 4 und Block 6 ist von der Bauart BWR 5. Die ersten fünf Blöcke besitzen ein Containment vom Typ Mark I und Block 6 ein Containment des Typ Mark II, siehe Abb. 3.3.

Tab. 3.1 Daten zu Fukushima Dai-ichi [1], [11]

Block	Jahr der Inbetriebnahme	Leistung in MWe	Typ	Hersteller
1	1971	460	SWR	GE
2	1974	784	SWR	GE/Toshiba
3	1976	784	SWR	Toshiba
4	1978	784	SWR	Hitachi
5	1978	784	SWR	Toshiba
6	1979	1.100	SWR	GE/Toshiba

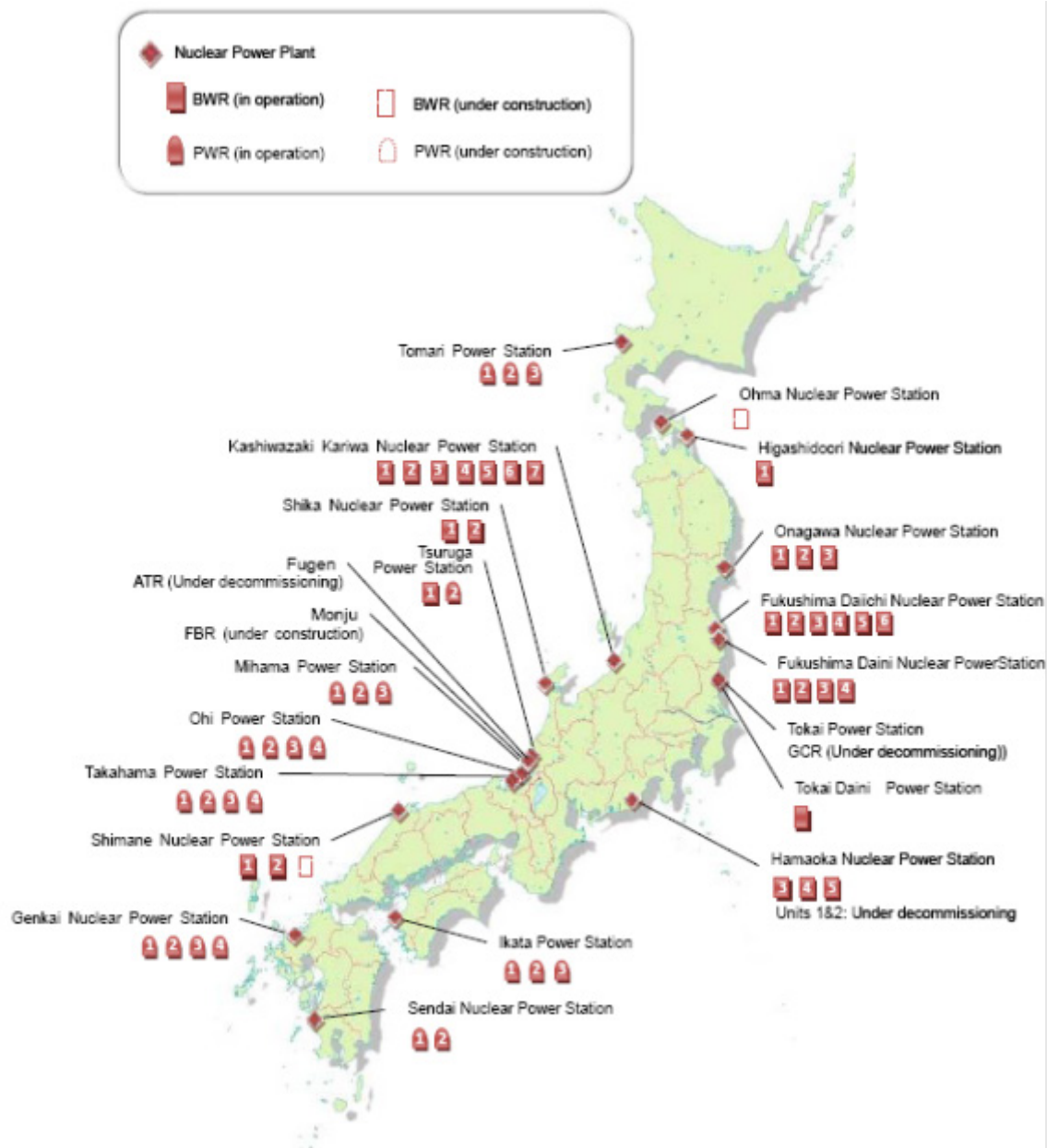


Abb. 3.1 Lage von Fukushima Dai-ichi [1]

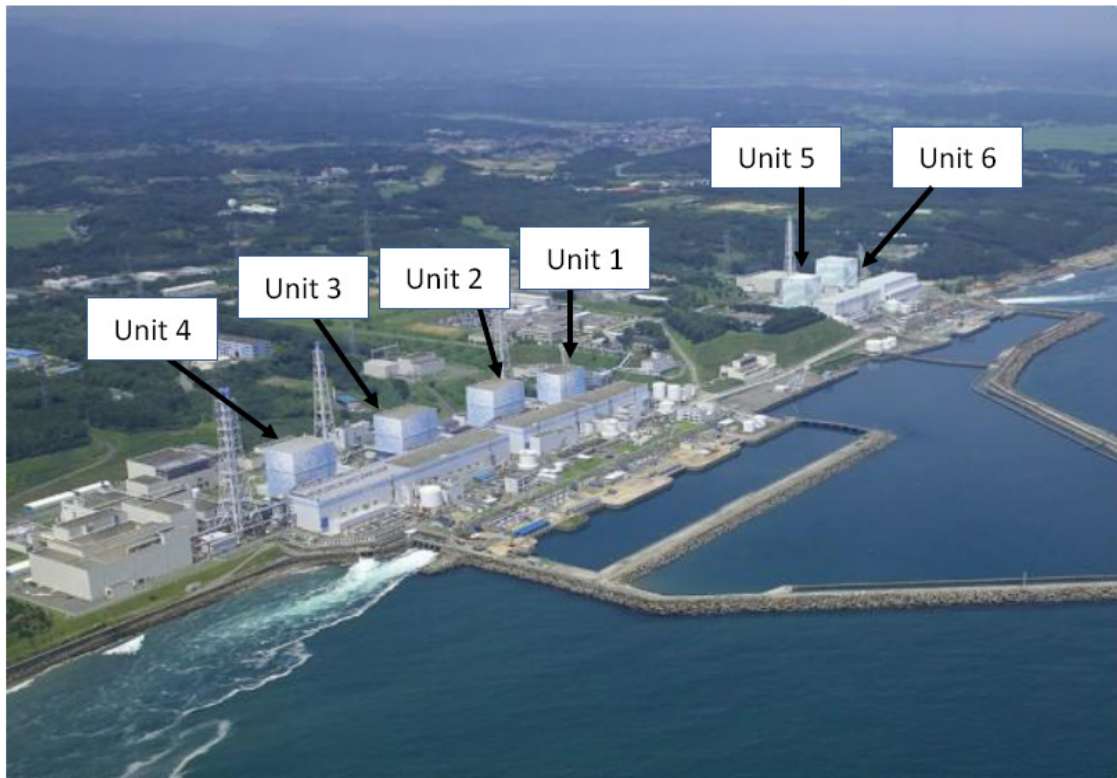


Abb. 3.2 Fukushima Dai-ichi vor dem Erdbeben [12]

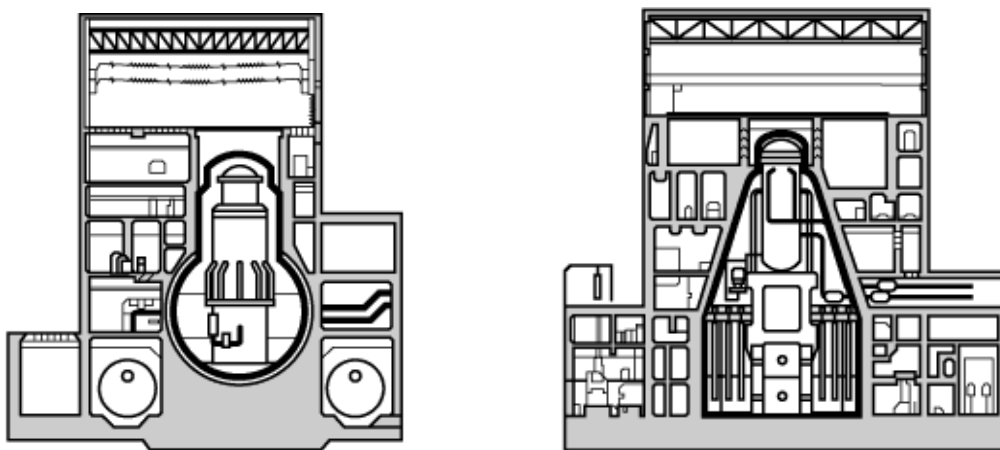


Abb. 3.3 Mark I (links) und Mark II (rechts) Containment im Schnittbild [3]

3.2 Kurzbeschreibung und Chronologie des Unfallhergangs

Aufgrund des Erbebens fiel bei allen Blöcken die externe Stromversorgung aus. Es kam zur Schnellabschaltung der im Leistungsbetrieb befindlichen Blöcke 1 – 3. Die Blöcke 4 – 6 befanden sich in Revision. Im Block 4 war der Reaktorkern vollständig in das Brennelementlagerbecken entladen. Bis zum Eintreffen des Tsunami war in allen Blöcken die Stromversorgung über Notstromdiesel sowie die Nachkühlung der Reaktorkerne und Brennelementlagerbecken gewährleistet. Anhand der vorliegenden Informationen ergeben sich keine Hinweise auf signifikante Schäden, die direkt durch das Erdbeben verursacht wurden. Aufgrund der Überflutung des Anlagengeländes durch den auslegungsüberschreitenden Tsunami⁴ versagten die Notstrom- und Nebenkühlwasserversorgungen der insgesamt sechs Reaktorblöcke am Standort Fukushima Dai-ichi nahezu vollständig. In den Blöcken 1 – 4 kam es innerhalb der ersten vier Tage zum Versagen aller Not- und Nachkühlsysteme. Die getroffenen Notfallmaßnahmen waren nicht ausreichend, um Schäden an den Reaktorkernen der Blöcke 1 – 3 zu vermeiden, die zum Zeitpunkt des Erdbebens in Betrieb waren.

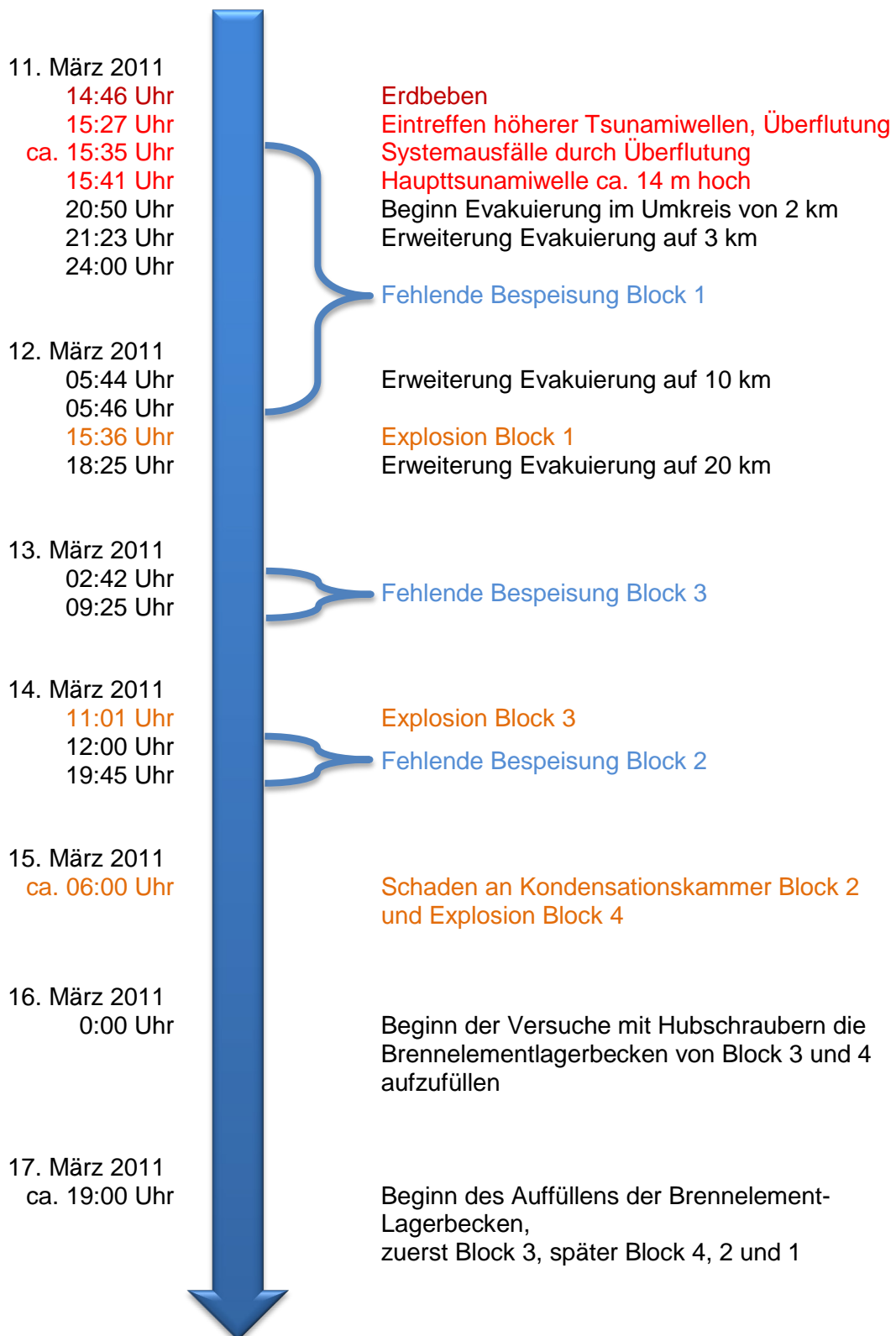
NISA und TEPCO haben vorläufige Analysen zum aktuellen Zustand der Reaktorkerne in den Blöcken 1 – 3 durch rechnerische Simulationen des Unfallablaufs durchgeführt. Nach diesen Analyseergebnissen sind in den Blöcken 1 – 3 zumindest Teile der Kerne geschmolzen, eine Beschädigung der Reaktordruckbehälter (RDB) wird ebenfalls nicht ausgeschlossen.

In den ersten drei Blöcken kam es in Folge der Kernschäden zu Wasserstoffbildung und zu einem auslegungsüberschreitenden Druckanstieg im Containment. Anhand der vorliegenden Informationen vermutet NISA, dass die Containments der Blöcke 1 – 3 während des Ereignisablaufs beschädigt wurden. In den drei Blöcken wurden ungefilterte Druckentlastungsvorgänge des Containments in die Umgebung (Venting) eingeleitet. Bei den Blöcken 1 und 3 kam es zu Wasserstoffexplosionen im oberen Bereich der Reaktorgebäude, in deren Folge diese massiv beschädigt wurden.

⁴ Im Jahr 2002 wurde die Auslegungshöhe basierend auf „Tsunami Assessment Method for Nuclear Power Plants in Japan (2002)“ der Japan Society of Civil Engineers für die Kraftwerke am Standort Fukushima Dai-ichi auf 5,7 m festgelegt. Die weitere Ertüchtigung der Anlagen hinsichtlich der Auslegung gegen Erdbeben und Tsunamis war bereits vor dem 11.03.2011 Gegenstand einer Befassung durch regulatorische Gremien in Japan. Der Tsunami am 11.03.2011 erreichte am Standort Fukushima Dai-ichi eine Höhe von etwa 14 m.

Die Kühlung der Brennelementlagerbecken der Blöcke 1 – 4 war mit dem Versagen der Notstromdiesel aufgrund des Tsunami ausgefallen. Ein Notstromdiesel von Block 6, der luftgekühlt war und sich an einer erhöhten Position auf dem Anlagengelände befand, überstand den Tsunami und sicherte die Kühlung der Brennelementlagerbecken und der sich in den Reaktoren der Blöcke 5 und 6 befindlichen Brennelemente. Eine Beschädigung der Brennelemente in diesen beiden Blöcken ist daher unwahrscheinlich. Eine Nuklidanalyse des Brennelementlagerbecken-Wassers von Block 4 deutet darauf hin, dass auch die Brennelemente im Lagerbecken von Block 4 weitestgehend unbeschädigt sind. Als Ursache für die Explosion im Block 4 am 15.03.2011 wird der Eintrag von Wasserstoff aus Block 3 über den gemeinsam genutzten Fortluftanschluss am Kamin bei den Druckentlastungsvorgängen des Containments von Block 3 vermutet. Die Brennelementlagerbecken der Blöcke 2 und 3 weisen nach einer Nuklidanalyse des Brennelementlagerbecken-Wassers eine erhöhte Aktivitätskonzentration auf. Ob dies eine Folge möglicher Brennelementschäden in den Lagerbecken oder des Eintrags von radioaktiven Stoffen aus den beschädigten Reaktorkernen der Blöcke 1 – 3 ist, kann zum jetzigen Zeitpunkt nicht geklärt werden. Die Brennelemente im Lagerbecken von Block 1 weisen kaum Nachzerfallsleistung auf, da die letzte Einlagerung von Brennelementen während der Revision des Blockes bei Eintritt des Erdbebens fast ein Jahr zurück lag. Weitere Aussagen von NISA zu dem Zustand des Brennelementlagerbeckens von Block 1 werden in [2] nicht getroffen.

Chronologie für den Standort Fukushima Dai-ichi



3.3 Fukushima Dai-ichi, Block 1

3.3.1 Anlagenbeschreibung

Nach den Unterlagen der GRS [5], [11], [13] verfügt Block 1 im japanischen Fukushima Dai-ichi über die nachfolgend beschriebenen Not- bzw. Nachkühlsysteme.

In Abb. 3.4 ist das Höhenschema von Fukushima Dai-ichi Block 1 dargestellt. Der Block 1 liegt auf einer Höhe von 10 m. Die Nebenkühlwasserpumpen stehen auf einer Höhe von 5,6 m über dem Meeresspiegel.

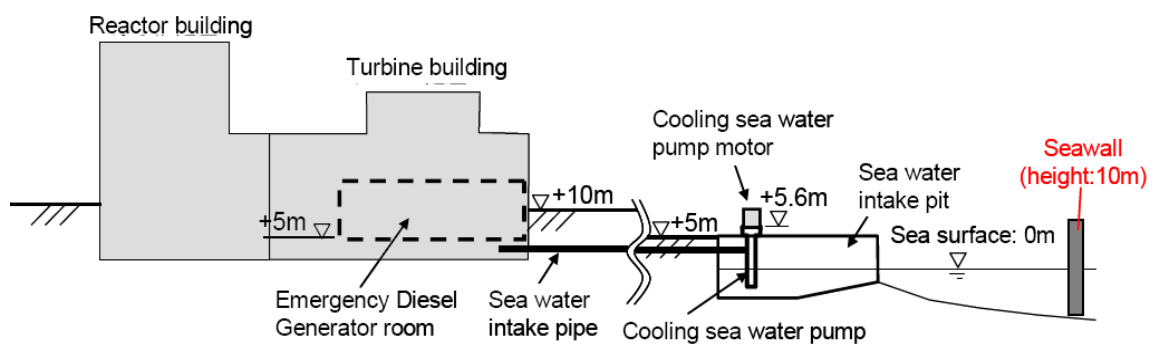


Abb. 3.4 Höhenschema am Standort Fukushima Dai-ichi Block 1 [2]

3.3.1.1 Betriebliches Nachwärmeabfuhrsystem (Reactor Shutdown Cooling System)

Zur betrieblichen Nachwärmeabfuhr besitzt Block 1 ein Reactor Shutdown Cooling System, siehe Abb. 3.5. Dabei wird das Wasser aus einer Treibwasserschleife⁵ entnommen und über einen Wärmetauscher geführt. Anschließend wird das Kühlmittel wieder in die Treibwasserschleife eingespeist und so dem RDB zugeführt. Dieses System ist nicht notstromversorgt.

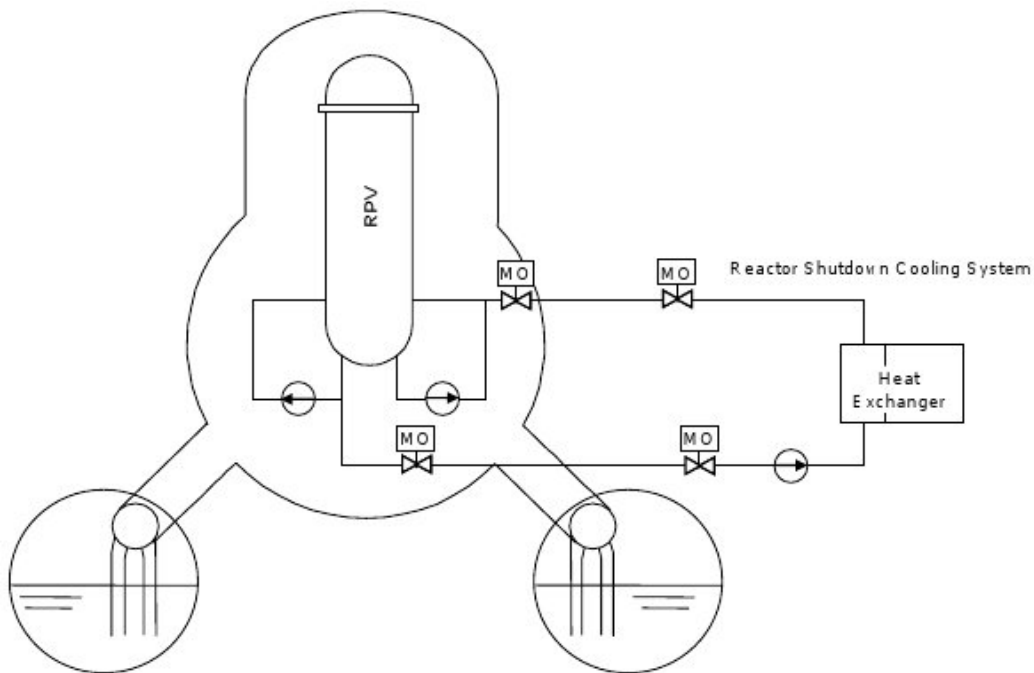


Abb. 3.5 Reactor Shutdown Cooling System [2]

⁵ Die beiden externen Treibwasserschleifen sorgen zusammen mit den internen Strahlpumpen im Bereich des Rückstromraums für einen Zwangsumlauf innerhalb des RDB. In deutschen Siedewasserreaktoren der Baulinie 69 oder 72 wird diese Aufgabe von internen Zwangsumwälzpumpen übernommen.

3.3.1.2 Hochdruckeinspeisesystem (HPCI)

Das Hochdruckeinspeisesystem (siehe Abb. 3.6), das sogenannte High Pressure Coolant Injection System (HPCI), besteht aus einem einsträngigen System mit einer turbinengetriebenen Pumpe, die durch Frischdampf angetrieben wird und Wasser aus einem Kondensatvorratsbehälter (CST) oder der Kondensationskammer (S/C) in den RDB einspeisen kann. Im HPCI-System ist kein Wärmetauscher integriert. Das bedeutet, dass dieses System ausschließlich der RDB-Bespeisung dient. Die zur Regelung notwendige Leittechnik ist über Batterien abgesichert.

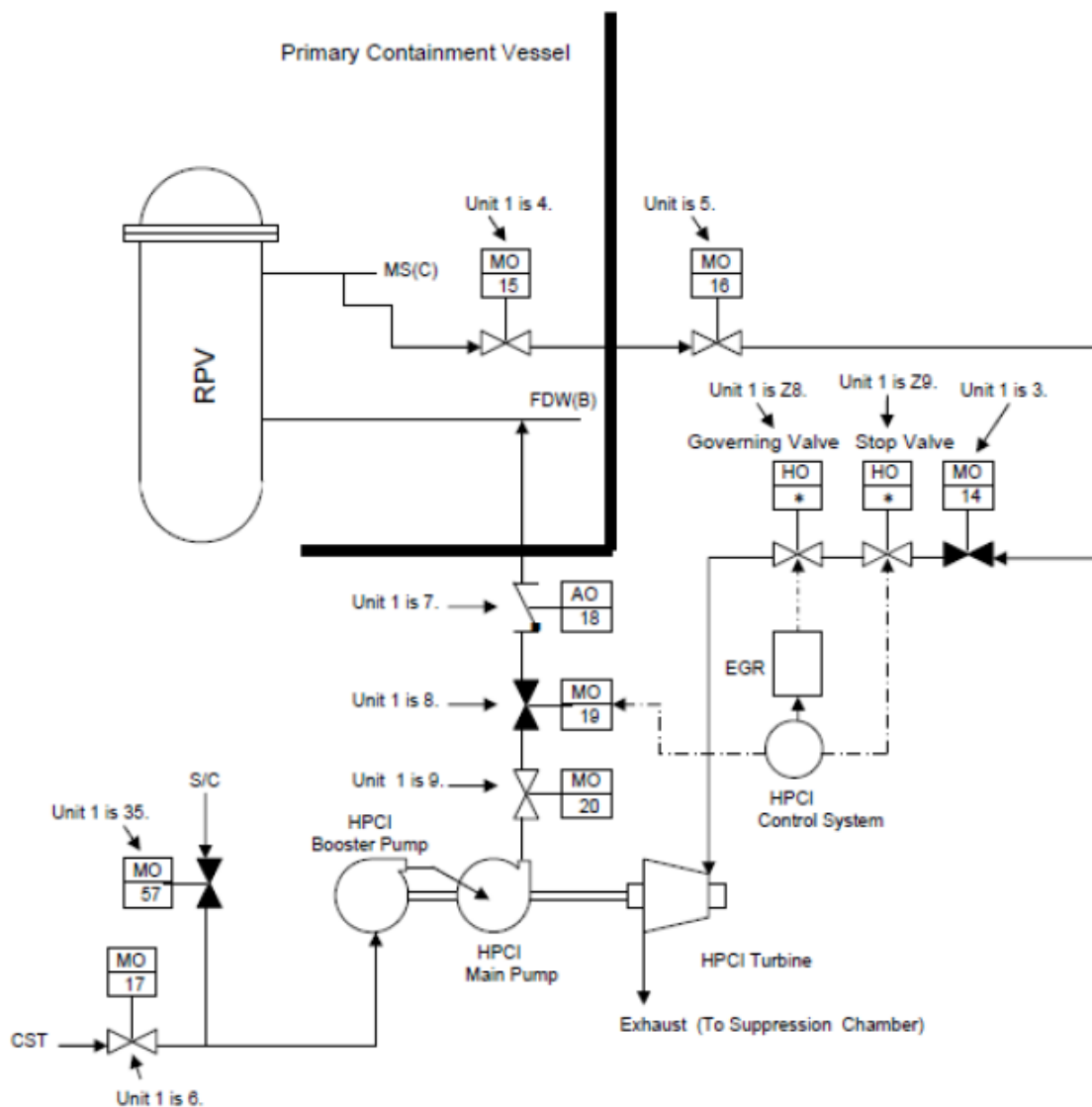


Abb. 3.6 Hochdruckeinspeisesystem (HPCI) [2]

3.3.1.3 Kernsprühsystem (CS)

Das Kernsprühsystem (siehe Abb. 3.7), das sogenannte Core Spray System (CS), ist ein Niederdrucksystem und ist zweisträngig aufgebaut. Das System hat vier elektrische Pumpen. Im Kernsprühsystem ist kein Wärmetauscher integriert. Das bedeutet, dass das aus der Kondensationskammer angesaugte Wasser keine weitere Kühlung erfährt, bevor es in den RDB gespeist wird.

Das Hochdruckeinspeisesystem wird zusammen mit dem Kernsprühsystem auch als Notkühlsystem (Emergency Core Cooling System, ECCS) zusammengefasst.

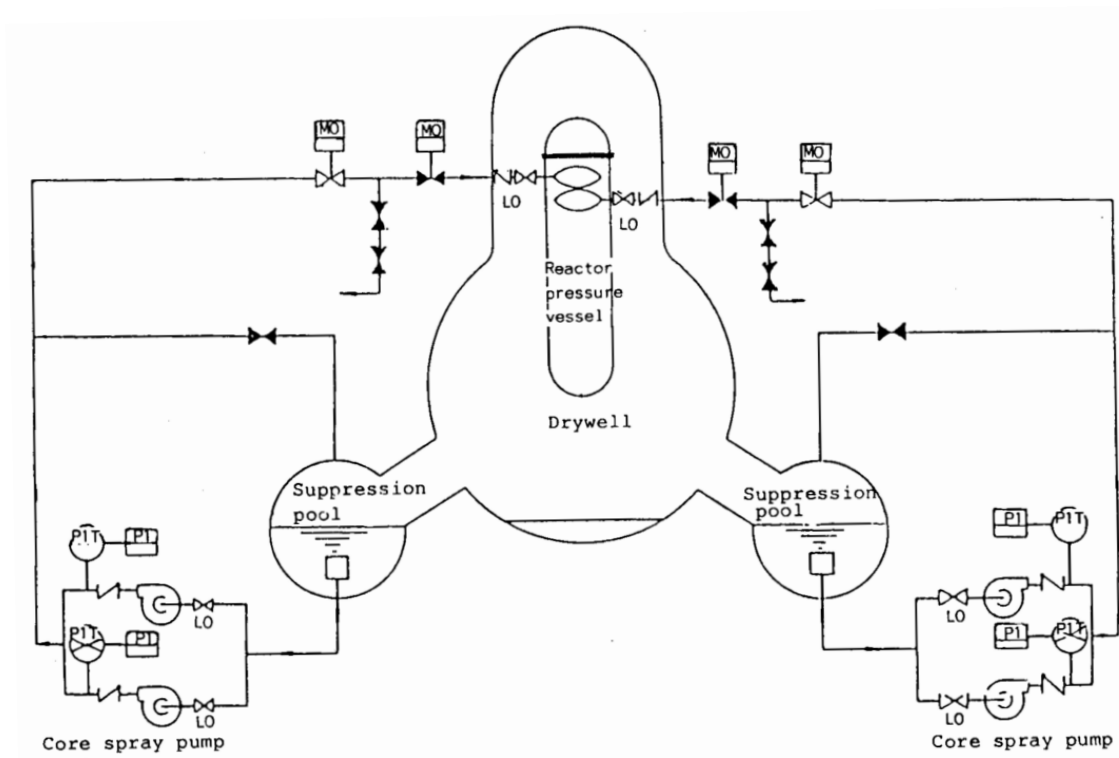


Abb. 3.7 Kernsprühsystem (CS) [5]

3.3.1.4 Notkondensationssystem (IC)

Das Notkondensationssystem (Isolation Condenser, IC) ist ein passives System zur Kühlung des Kerns, aufgebaut als zweifach-redundantes System, siehe Abb. 3.8. Diese Notkondensationsanlage soll das Kühlmittel während eines Ereignisses mit Frischdampfabschluss ohne Wasserverlust kühlen. Der im Reaktor erzeugte Frischdampf wird über den Isolation Condenser gekühlt und in kondensierter Form wieder über die externen Treibwasserschleifen in den RDB zurückgeführt. Die Kühlung und Kondensation des Dampfes erfolgt nach dem Prinzip eines Wärmetauschers innerhalb der Wasservorlage des Systems. Diese Wasservorlage, welche aus zwei Tanks besteht, wird mit Frischwasser bespeist. Die abgegebene Wärme des Frischdampfes sorgt für eine Verdampfung. Das verdampfte Wasser des Isolation Condensers wird an die Umgebung abgegeben. Nach Angaben von GE-Hitachi [15] reicht die Kapazität der beiden Stränge des Isolation Condensers zusammen aus, um die Abfuhr der Nachzerfallswärme im Batteriebetrieb ohne Bespeisung des Isolation Condensers über 10 Stunden sicherzustellen. Von TEPCO [14] wird ein Zeitraum von 8 Stunden angegeben. Die beiden Wasserbehälter der IC-Stränge können zusammen 6 % der Nennreaktorleistung abführen. Die Absperrventile in den Frischdampf- und Kondensatsträngen sind motorgesteuert und können mit Gleichstrom betrieben werden.

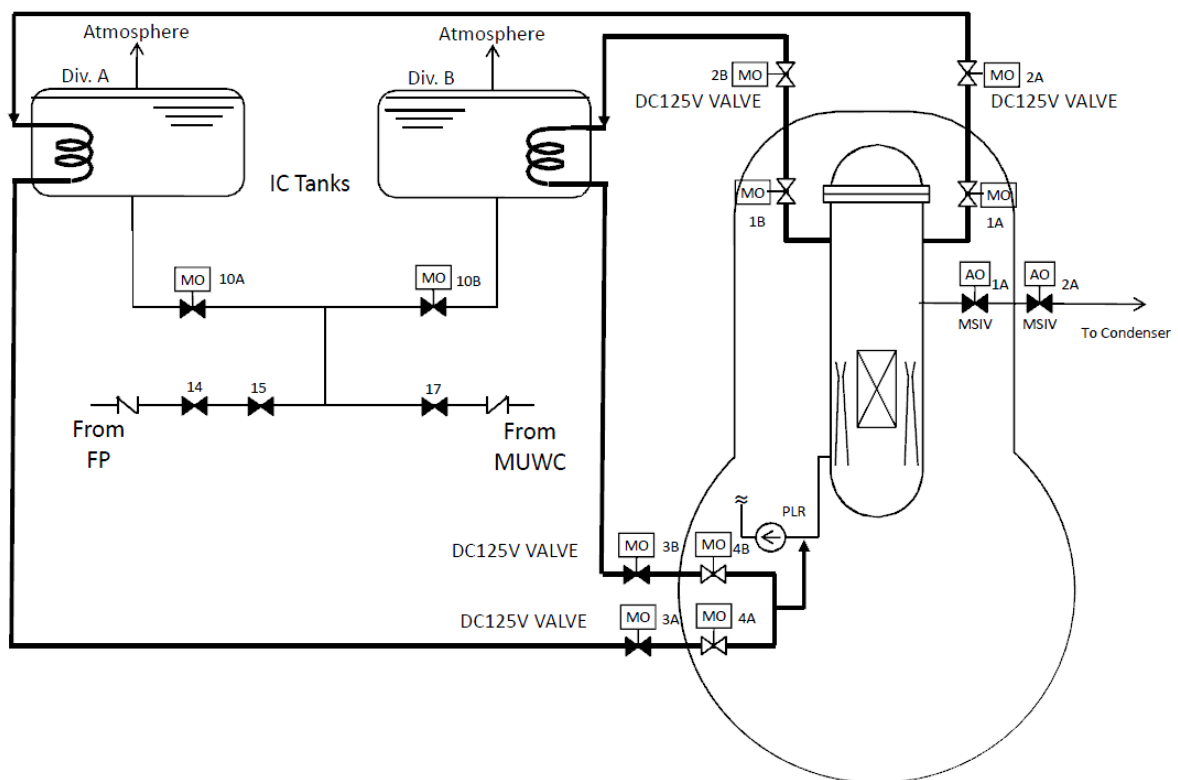


Abb. 3.8 Isolation Condenser [2]

3.3.1.5 Containment-Sprühsystem (CCS)

Zur Wärmeabfuhr aus der Kondensationskammer von Block 1 wird das Containment-Sprühsystem verwendet.

Der Block besitzt ein zweisträngiges Containment-Sprühsystem (Containment Cooling System), welches Kühlmittel aus der Kondensationskammer ansaugen kann, dann über Wärmetauscher kühlt und in die Druck- oder Kondensationskammer einsprühen kann. Das Containment-Sprühsystem ist notstromversorgt.

3.3.1.6 Notstromversorgung

Ein aktueller elektrischer Übersichtsschaltplan liegt der GRS nicht vor. Der Block hat zwei wassergekühlte Notstromdiesel und verfügt über 125 V Batterien. Beide Notstromdiesel (D/G) sowie die Batterieversorgung (DC) befinden sich im Maschinenhaus [18] (siehe Abb. 3.9).

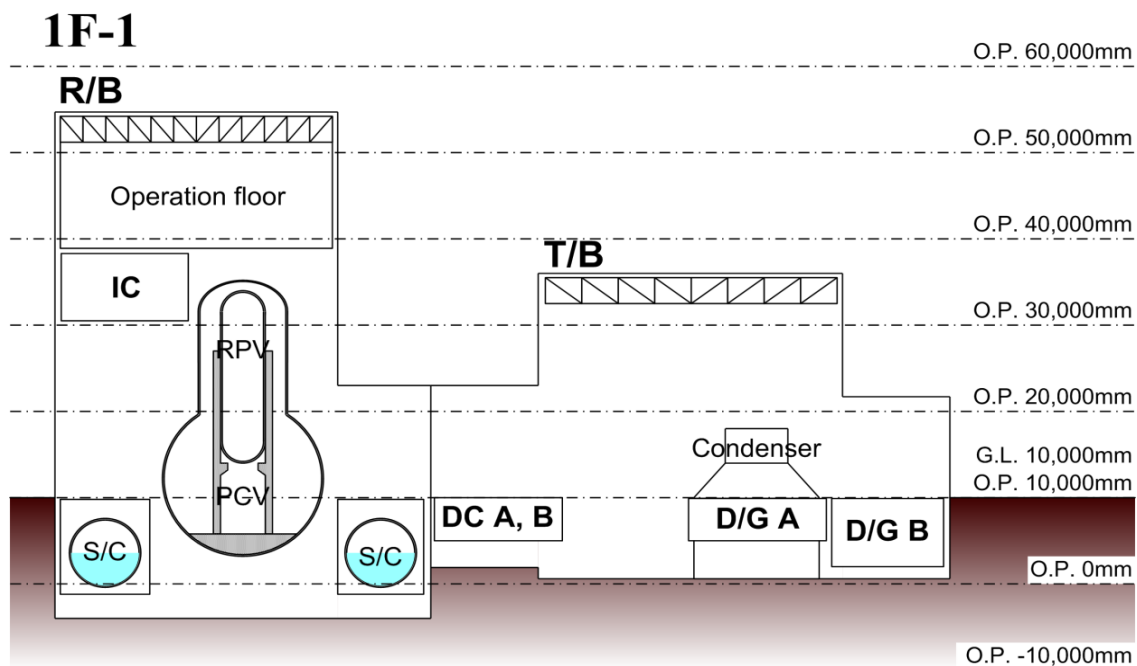


Abb. 3.9 Lage der Diesel und Batterien im Maschinenhaus [2]

Nach Angaben von GE-Hitachi [13] ist in Block 1 ein Betrieb des Hochdruckeinspeisesystems und des Isolation Condensers auch bei Ausfall der externen Stromversorgung sowie der Notstromversorgung möglich. Die erforderlichen Schalthandlungen erfolgen

batteriegestützt. Die Kapazität der Batterien wird vom Hersteller mit einer Dauer von 10 Stunden angegeben.

3.3.1.7 Ventingsystem

Block 1 besitzt ein nachgerüstetes Ventingsystem zur Druckentlastung des Containments (siehe Abb. 3.10). Diese Druckentlastung erfolgt ungefiltert und kann sowohl aus der Druck- als auch aus der Kondensationskammer erfolgen. In diesem System gibt es ein motorgesteuertes Ventil (MO-210) und jeweils zwei druckluftgesteuerte Ventile für die Druckentlastung aus Druckkammer (AO-1 und AO-83) bzw. Kondensationskammer (AO-72 und AO-90). Den Abgaskamin, in welchen auch dieses System einmündet teilen sich die Blöcke 1 und 2.

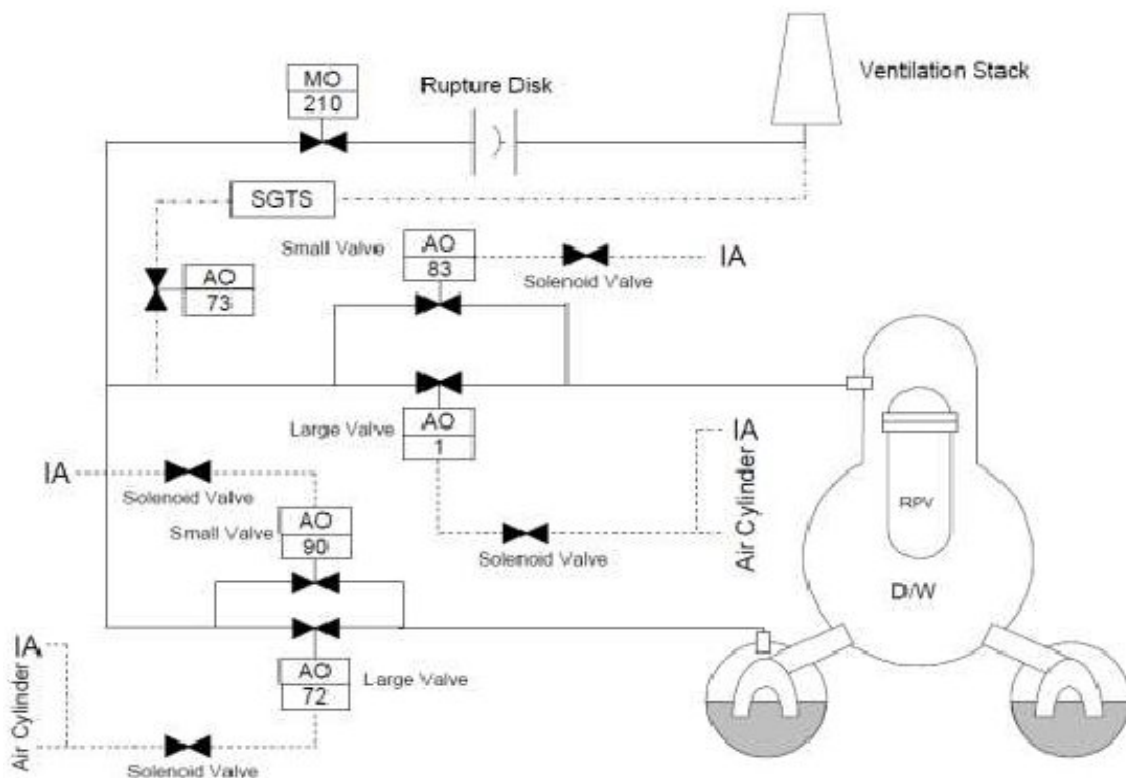


Abb. 3.10 Ventingsystem des Containments [2]

3.3.2 Ereignisablauf in Fukushima Dai-ichi, Block 1

Der Ereignisablauf ist weitgehend aus der Quelle [2] entnommen. Angaben aus anderen Quellen werden entsprechend gekennzeichnet.

11.03.2011 – 14:46 Uhr – Erdbeben

Zum Zeitpunkt des Erdbebens gegen 14:46 Uhr am 11.03.2011 befand sich der Block 1 des Kernkraftwerks Fukushima Dai-ichi im Leistungsbetrieb. Der Block wurde aufgrund des Erdbebens automatisch abgeschaltet und im Zustand unterkritisch heiß gehalten. Die externe Stromversorgung des Blockes fiel aufgrund von Schäden durch das Erdbeben aus, woraufhin die beiden Notstromdiesel starteten. Aufgrund des Ausfalls der Stromversorgung kam es zum Durchdringungsabschluss im Frischdampfsystem.

Die Rechenmeldeanlage von Block 1 zeichnete für etwa 10 Minuten nach dem Erdbeben Daten auf. Als Grund für den folgenden Ausfall wird eine die Kapazität der Rechenmeldeanlage übersteigende Anzahl von Meldungen genannt. Die Not- und Gefahrenmeldungen wurden nach dem Erdbeben über einen Zeitraum von 30 Minuten aufgezeichnet, dann wurde die Aufzeichnung auslegungsgemäß gestoppt. Die Schreiber der Warte zeichneten bis zum überflutungsbedingten Ausfall der Batterieversorgung aufgrund des Tsunami Daten auf. Nach dem Ausfall dieser Systeme liegen nur noch die schriftlichen Aufzeichnungen der Mitarbeiter über den Anlagenzustand und über vorgenommene Handmaßnahmen vor.

Der Füllstand im RDB sank zunächst durch die kollabierenden Dampfblasen, jedoch nicht unter die Ansprechmarken der ECCS-Systeme.

Aufgrund der geschlossenen Frischdampfabschlussarmaturen kam es zu einem Druckanstieg im RDB. Daraufhin wurde der Isolation Condenser um 14:52 Uhr automatisch gestartet. Hierdurch kühlte sich das Kühlmittelinventar in den externen Treibwasserschleifen um etwa 100 K ab, siehe Abb. 3.11.

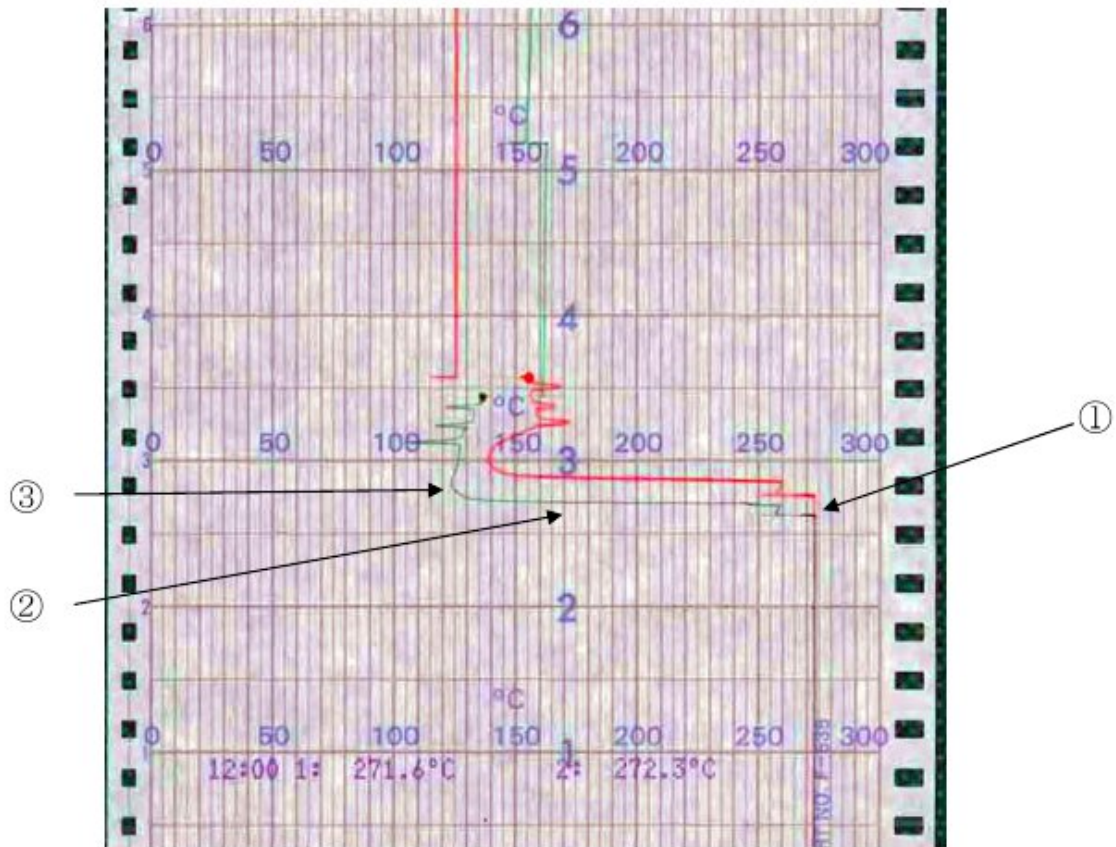


Abb. 3.11 Temperatur am Eingang der Treibwasserschleife [4]

Folgende Ereignisse sind im Temperaturverlauf am Eingang der Treibwasserschleife (Abb. 3.11) zu erkennen:

1. 14:46 Uhr, RESA
2. Temperatur fällt hauptsächlich durch die Kalteinspeisung des Isolation Condensers
3. IC stoppt

Gegen 15:03 Uhr wurde der Isolation Condenser manuell abgeschaltet, um die maximale betriebliche Abkühlgeschwindigkeit des Reaktors von 55 K/h nicht zu überschreiten. In der Zeit zwischen 15:17 Uhr und 15:37 Uhr wurde der Isolation Condenser drei Mal von Hand in Betrieb genommen, wodurch es jeweils zu einer Druck- und Temperaturabsenkung kam, siehe Abb. 3.11 und Abb. 3.12.

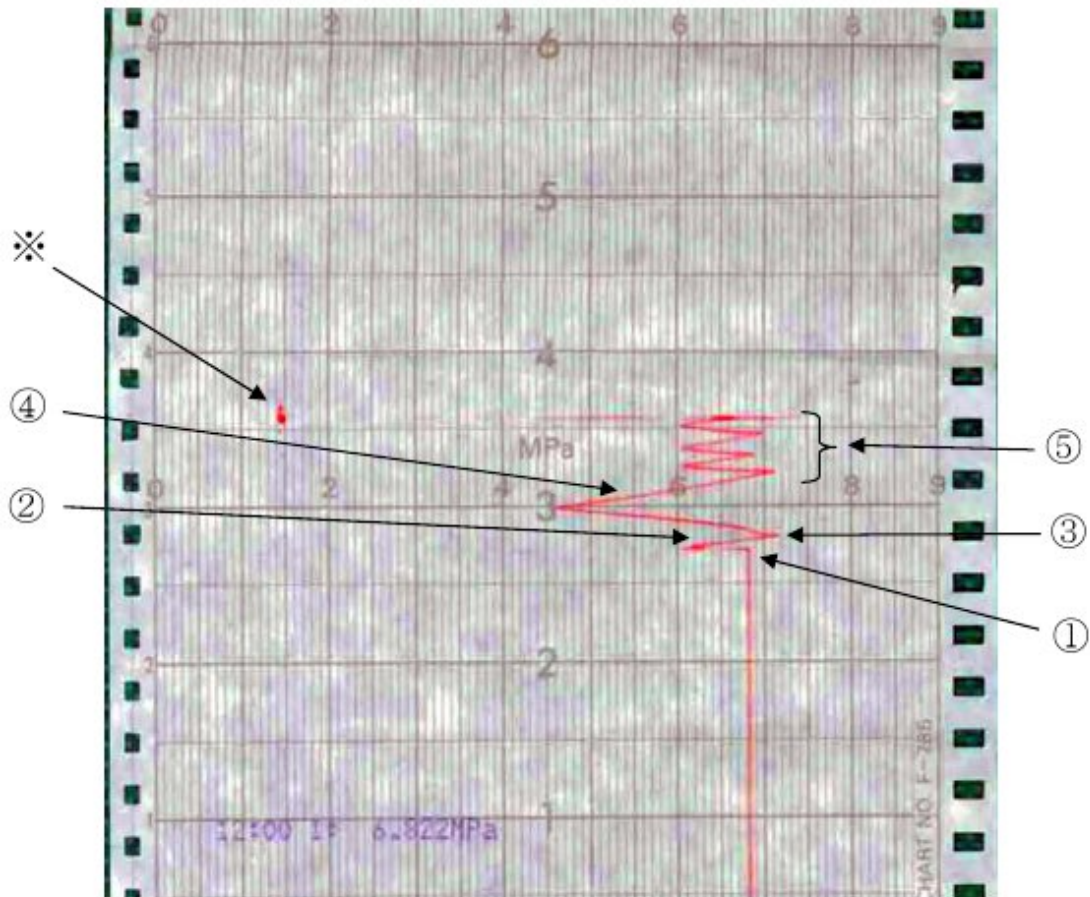


Abb. 3.12 RDB-Druck [2]

Folgende Ereignisse sind im Verlauf des RDB-Druckes (Abb. 3.12) zu erkennen:

1. 14:46 Uhr, RESA
2. FD-Isolationsventile zu – Druck steigt
3. Automatischer Start des IC – Druck fällt
4. IC stoppt – Druck steigt
5. Druckschwankungen nach manueller Betätigung des IC

Zur Kühlung der Kondensationskammer wurde von 15:07 Uhr bis 15:10 Uhr auslegungsgemäß das Containment-Sprühsystem verwendet (siehe Abb. 3.13). Nach dem Verlust der Drehstromversorgung über die Notstromdieselgeneratoren war dieses System nicht mehr verfügbar.

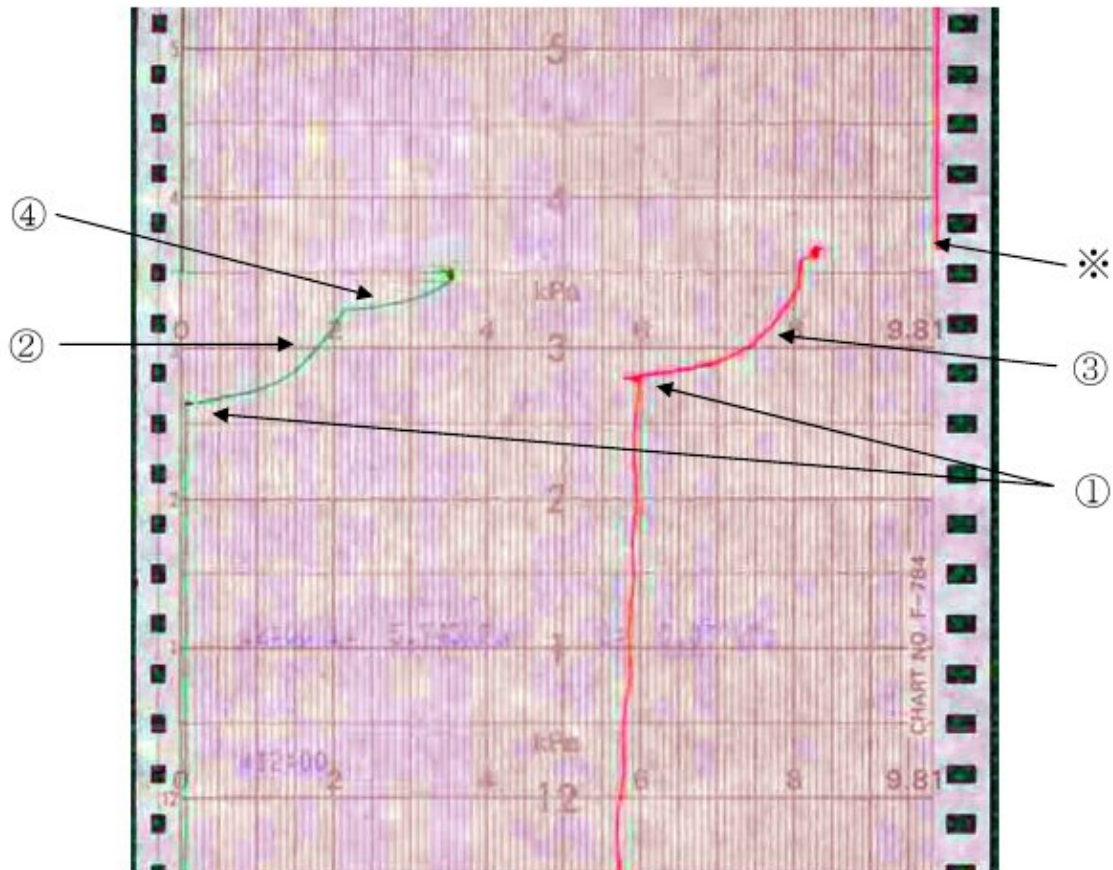


Abb. 3.13 Druckkammer-Druck (rot),
Differenzdruck Druckkammer-Kondensationskammer (grün) [2]

Folgende Ereignisse sind im Druckverlauf von Druck- und Kondensationskammer (Abb. 3.13) zu erkennen:

1. 14:46 Uhr, RESA
2. Druck in der Druckkammer steigt – Differenzdruck (grün) steigt
3. Druckkammer-Lüftung fällt aus – Druckkammer-Druck (rot) steigt
4. Kondensationskammer-Kühlung ein – Kondensationskammer-Druck fällt – Differenzdruck (grün) steigt

Der Ereignisablauf bis zum Eintreffen des Tsunami ist mit den vorliegenden Schreiberaufzeichnungen des Blocks erklärbar (Abb. 3.12 bis Abb. 3.14). Weiterhin ist dem Schreiberauszug zu entnehmen, dass sich Block 1 beim Eintreffen des Tsunami im heiß-unterkritischen Zustand befand.

11.03.2011 – ab 15:27 Uhr – Eintreffen des Tsunami am Kraftwerksstandort

Um 15:41 Uhr, etwa eine Stunde nach dem Erdbeben, versagten die Notstromdiesel und die Nebenkühlwasserversorgung aufgrund einer Überflutung des Anlagengeländes durch den Tsunami. Zusätzlich fiel durch die Überflutung die Batterieversorgung des Blockes aus. Eine Überwachung von Anlagenparametern wie zum Beispiel dem RDB-Füllstand war damit nicht mehr möglich.

Der Betreiber gibt für den Zustand des Blockes zu diesem Zeitpunkt Folgendes an: Durch die Nachzerfallsleistung des Reaktors produzierte dieser weiteren Dampf, welcher über die Sicherheits- und Entlastungsventile in die Kondensationskammer geleitet wurde. Hierdurch fiel einerseits der Füllstand im Reaktordruckbehälter, andererseits heizte sich die Kondensationskammer auf, was dann zunächst einen Druckanstieg in der Kondensationskammer und schließlich in der Druckkammer zur Folge hatte. Eine Bespeisung des Reaktordruckbehälters über das HPCI-System war nicht möglich, da auch für dieses System die Batterieversorgung ausgefallen war. Sonstige Einspeisesysteme des Reaktordruckbehälters waren nicht verfügbar, da die hierfür benötigte Drehstromversorgung nicht zur Verfügung stand.

Etwa eine Stunde nach Ausfall der Notstromdiesel um 16:36 Uhr wurde gemäß Artikel 15 des „Special Law on Emergency Preparedness for Nuclear Disaster“ der Zustand „Inability of water injection of the Emergency Core Cooling System“ gemeldet, also der Ausfall der Notkühlung.

Um 18:18 Uhr wurde versucht, die Kühlung und Wiedereinspeisung des Kühlmittels über den Isolation Condenser wiederherzustellen. Hierzu wurde vor Ort manuell eine Armatur geöffnet und um 18:25 Uhr wieder geschlossen. Um 21:19 Uhr wird eine Einspeisemöglichkeit in den Isolation Condenser (sekundärseitig) über eine dieselgetriebene Pumpe installiert. Um 21:30 Uhr wird erneut versucht, den Isolation Condenser durch Öffnen einer Armatur zu starten. Die genaue Stellung der Ventile im Einspeiseweg ist jedoch unklar, so dass TEPCO und NISA weiterhin keine Aussage treffen können, inwieweit über den Isolation Condenser gekühlt wurde und dieser gekühltes Wasser zurück in den Reaktordruckbehälter (über die Treibwasserschleifen) eingespeist hat.

In ihren Analysen gehen NISA und TEPCO davon aus, dass nach dem Eintreffen des Tsunami die Funktion des Isolation Condensers nicht wieder hergestellt wurde. Nach

Analysen von NISA wird unter der Voraussetzung einer Unverfügbarkeit des HPCI angenommen, dass eine Freilegung des Kerns ab 17:00 Uhr erfolgte. Im weiteren Verlauf kam es zu Kernschäden und einer Beschädigung des RDB. TEPCO geht nach eigenen Analysen davon aus, dass die Freilegung des Kerns etwa 3 Stunden nach dem Erdbeben erfolgte. Nach den Analysen ist ein Großteil des Kerns geschmolzen und hat sich auf den Boden des RDB verlagert. Es besteht weiterhin die Möglichkeit, dass der RDB beschädigt worden ist und sich ein Teil der Schmelze in die Druckkammer verlagert hat. Eine Abschätzung des Zeitpunktes von ersten Beschädigungen des RDB liegt nach den Analysen von TEPCO 15 Stunden nach dem Erdbeben.

Aufgrund der Unklarheiten über die Funktion des Isolation Condensers und fehlender Kenntnis über den Füllstand im RDB begann TEPCO gegen 17:12 Uhr mit Notfallmaßnahmen zur Sicherstellung einer alternativen Einspeisemöglichkeit in den RDB über Feuerlöschwasserleitungen, siehe Abb. 3.15. Zur Nutzung dieser Einspeisemöglichkeiten wurden von der Schicht manuell Ventile des Kernsprühsystems unter schwierigen Bedingungen als vorbereitende Maßnahme geöffnet. Die Einspeisung über diesen Weg hat als zusätzliche Voraussetzung einen druckentlasteten Reaktordruckbehälter. Das Heranbringen des benötigten Feuerwehrautos wurde aufgrund der Zerstörungen durch den Tsunami an der Infrastruktur am Standort verzögert, so dass mit der Einspeisung erst am 12. März gegen 5:46 Uhr begonnen werden konnte [32].

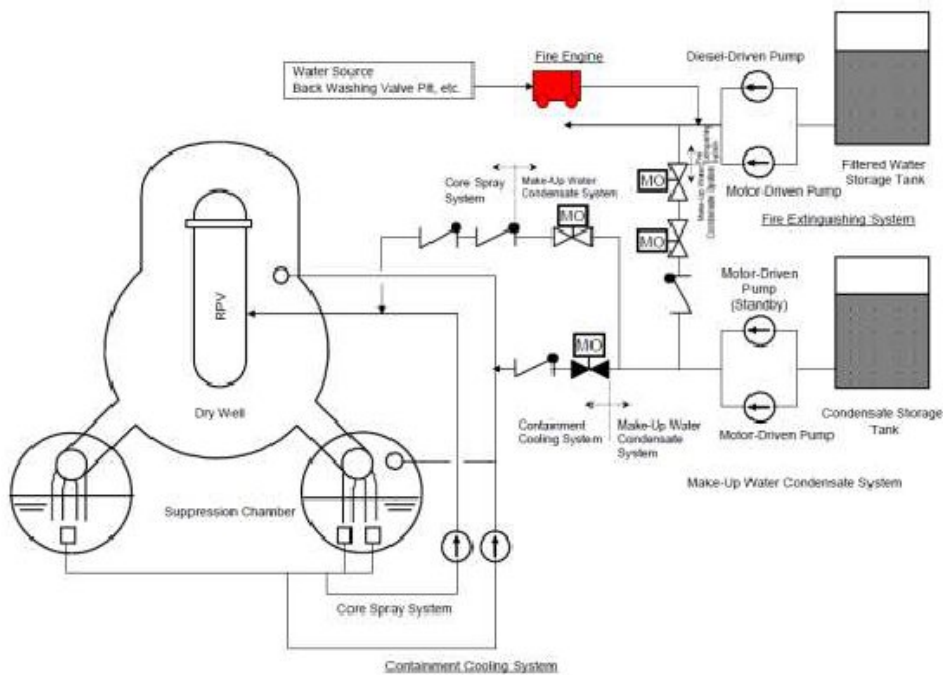


Abb. 3.15 Alternative Bespeisung über Feuerlöschwasserleitungen [2]

Die Ortsdosisdetektoren im Maschinenhaus zeigen um 23:00 Uhr eine Dosisleistung von 1,2 mSv/h an [2]. Gegen 23:50 Uhr wurde nach dem Anschließen eines kleinen Generators an die Instrumentierung der Anlage ein Druck innerhalb des Containments von 6 bar, bei einem maximal erlaubten Druck von 5,28 bar, gemessen. Hierauf wurde mit der Arbeitsvorbereitung für das spätere Venting (Druckentlastung des Containments) vor Ort und mit Evakuierungen in der Umgebung der Anlage begonnen [32].

12.03.2011

Ab 0:30 Uhr wurde der Isolation Condenser sekundärseitig mit Wasser über Feuerlöschleitungen bespeist.

Am 12.03.2011 gegen 5:46 Uhr begann eine Frischwassereinspeisung über Feuerlöschleitungen in den Reaktor Druckbehälter unter Zuhilfenahme einer mobilen Feuerlöschpumpe. Das bedeutet, dass nach dem Ende der Kühlung mit dem IC um 15:37 Uhr am Vortag und der Annahme, dass die Kühlung mit dem IC anschließend nicht mehr wiederhergestellt werden konnte, der Kern für etwas über 14 Stunden nicht aktiv gekühlt wurde. Der zeitliche Verlauf der Nachzerfallsleistung des Blocks ist Abb. 3.16 zu entnehmen.

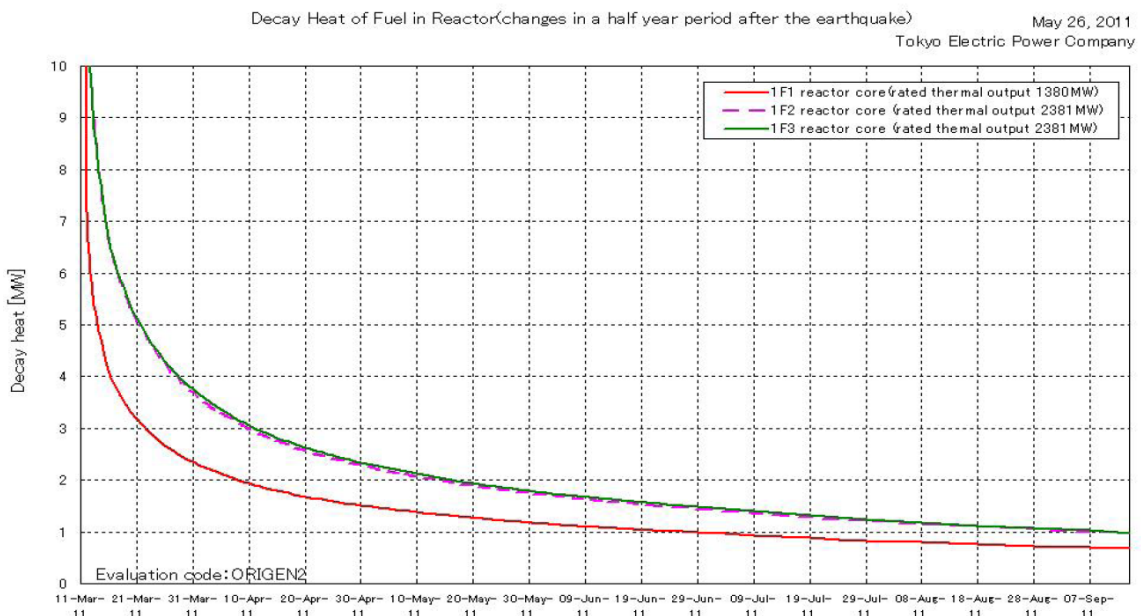


Abb. 3.16 Nachzerfallsleistung [3]

Gegen 5:14 Uhr wurden ein Abfallen des Druckkammerdruckes vor dem ersten Venting sowie ein Anstieg der Strahlenbelastung bemerkt. Daher nimmt TEPCO an, dass zu diesem Zeitpunkt eine Leckage aus dem Containment auftrat.

Die Evakuierung der anlagennahen Bewohner und der Stadt Okuma waren bis 9:03 Uhr abgeschlossen. Um 9:15 Uhr wurde das motorgetriebene Ventil (MO210, siehe Abb. 3.10) einer Venting-Leitung zum Abgaskamin um 25 % manuell geöffnet. Zum Venting sollte nun noch eines der beiden Abschlussventile zur Kondensationskammer geöffnet werden. Zunächst sollten Arbeiter das kleinere der beiden pneumatisch betätigten Ventile (AO90, siehe Abb. 3.10) öffnen, was jedoch aufgrund der vorherrschenden Strahlenbelastung nicht möglich war. Deshalb wurde zunächst von der Warte aus versucht das entsprechende Ventil zu verfahren, in der Hoffnung, dass die Druckluftleitungen noch über genügend Restluft verfügten. Gegen 14:00 Uhr wurde ein provisorischer Druckluftkompressor eingesetzt um das Ventil (AO72, siehe Abb. 3.10) zu öffnen. Hiernach konnte gegen 14:30 Uhr ein Druckabfall im Containment beobachtet werden [2], [32].

Eine Stunde nach dem Ventingvorgang um 15:36 Uhr ereignete sich eine Explosion im oberen Bereich des Reaktorgebäudes außerhalb des mit Strickstoff inertisierten Containments. Es handelte sich hierbei um eine Wasserstoffexplosion. Der Wasserstoff bildete sich durch eine Zirkon-Wasser-Reaktion im Reaktor, aufgrund der hohen Temperaturen im Kern bevor im weiteren Verlauf eine Kernschmelze einsetzte.

NISA und TEPCO vermuten, dass sich der Wasserstoff durch Leckagen des Containments im Reaktorgebäude ansammeln konnte und sehen keinen direkten Zusammenhang mit dem Ventingvorgang.

Bis um 14:53 Uhr wurden insgesamt 80 m³ Frischwasser über den Feuerlöschanschluss in den RDB unter Zuhilfenahme einer mobilen Pumpe eingespeist. Dabei ist jedoch unklar, wann die Frischwassereinspeisung genau beendet wurde. Ab 19:04 Uhr erfolgte die Einspeisung von Meerwasser. Zusätzlich zu dem Meerwasser wurde ab 20:45 Uhr Borsäure als unterstützende Maßnahme zur Sicherstellung der Unterkritikalität eingespeist.

14.03.2011

Am 14.03.2011 gegen 1:10 Uhr wurde entdeckt, dass das Meerwasserbecken, aus dem das Meerwasser für die Einspeisung in den RDB entnommen wurde, leer war. Dabei ist unklar, wie lange der Reaktordruckbehälter vor dieser Entdeckung nicht bespeist wurde. Die Einspeisung in den RDB wurde über eine alternative Meerwasserversorgung wieder aufgenommen.

23.03.2011

Ab dem 23.03.2011 gegen 2:30 Uhr wurde eine zusätzliche Einspeisemöglichkeit von Meerwasser in den Reaktor über das Speisewassersystem geschaffen. Ab etwa 11:00 Uhr erfolgte die Einspeisung dann ausschließlich über diese Speisewasserleitung.

24.03.2011

Am 24.03.2011 gegen 11:30 Uhr wurde die Beleuchtung auf der Warte wieder hergestellt.

25.03.2011

Ab 15:37 Uhr am 25.03.2011 wird die Einspeisung in den RDB von Meerwasser auf Frischwasser umgestellt.

29.03.2011

Die Frischwassereinspeisung in den RDB wurde ab dem 29.03.2011 um 8:32 Uhr mit einer provisorischen elektromotorbetriebenen Pumpe fortgesetzt, die die Feuerlöschpumpe ersetzte.

3.4 Fukushima Dai-ichi, Block 2

3.4.1 Anlagenbeschreibung der Blöcke 2 – 4

Nach den Unterlagen der GRS [6], [7], [8], [11], [13] verfügen die Blöcke 2 – 4 im japanischen Fukushima Dai-ichi jeweils über die folgenden Systeme, die der Bespeisung und der Nachkühlung der Blöcke dienen.

3.4.1.1 Hochdruckeinspeisesystem (HPCI)

Das Hochdruckeinspeisesystem (siehe Abb. 3.17), das sogenannte High Pressure Coolant Injection System (HPCI), besteht bei den Blöcken 2 bis 4 identisch zu Block 1 aus einem einsträngigen System mit einer turbinengetriebenen Pumpe, die mittels Frischdampf betrieben wird und Wasser aus einem Kondensatvorratsbehälter oder der Kondensationskammer in den RDB einspeisen kann. Im HPCI-System ist kein Wärmetauscher integriert. Das bedeutet, dass dieses System ausschließlich der RDB-Bespeigung dient.

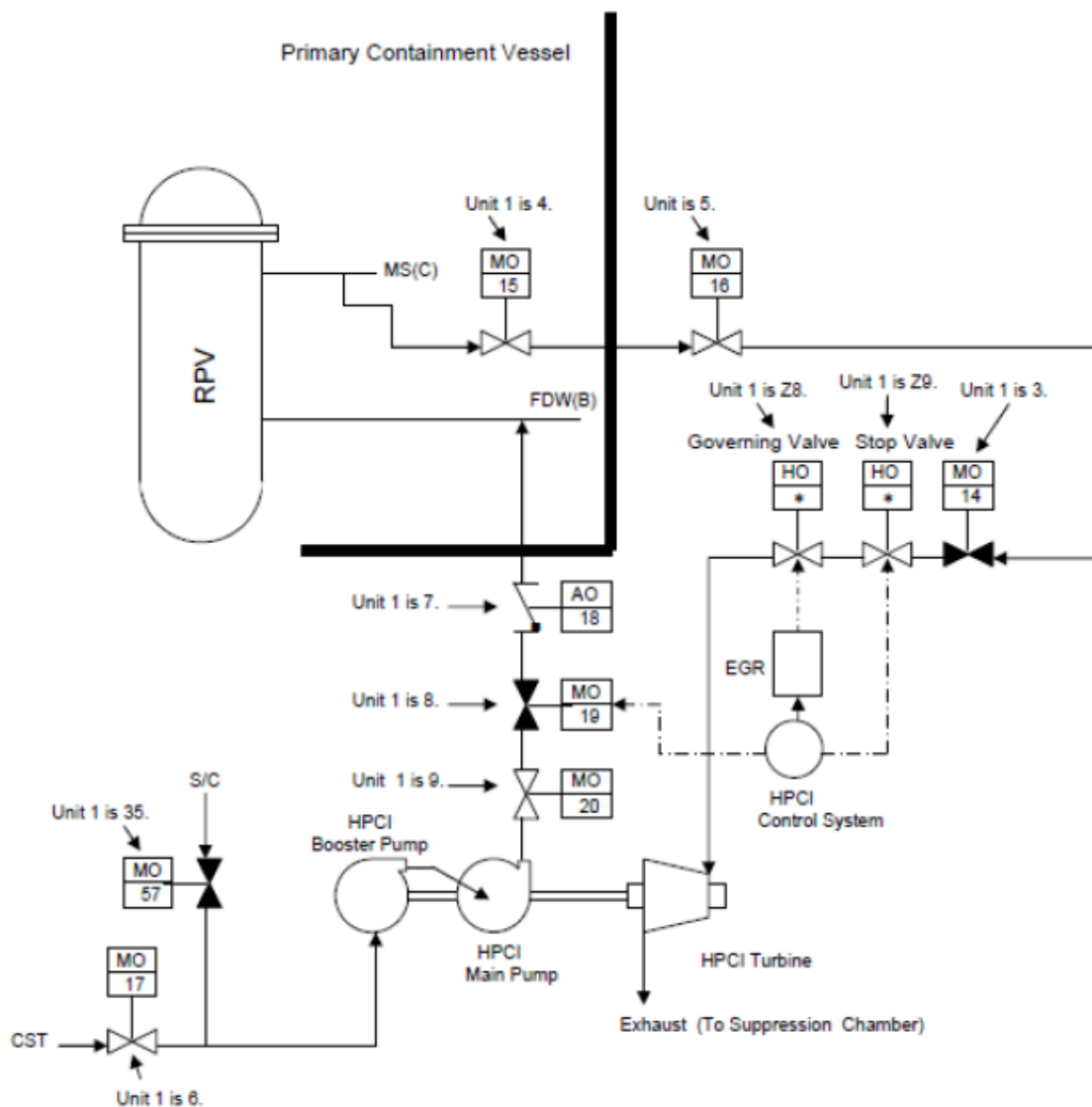


Abb. 3.17 Hochdruckeinspeisesystem (HPCI) [2]

3.4.1.2 Kernsprühsystem (CS)

Wie auch im Block 1 gibt es ein zweisträngiges Core Spray System (CS, Kernsprühsystem), siehe Abb. 3.18. Dieses wird jedoch im Gegensatz zu Block 1 mit nur zwei anstatt vier elektrischen Pumpen betrieben. Das System saugt aus der Kondensationskammer an und speist in den RDB ein.

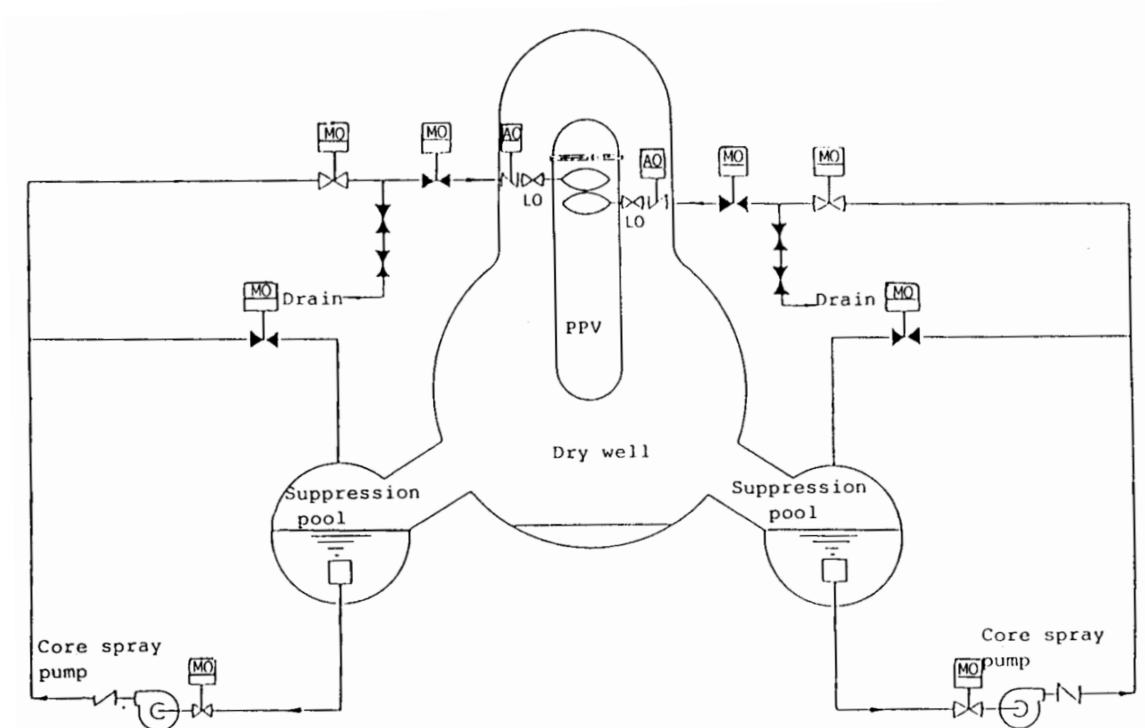


Abb. 3.18 Kernsprühsystem (CS) [6], [7], [8]

3.4.1.3 Nachwärmeabfuhrsystem (RHR)

Das Nachwärmeabfuhrsystem (Residual Heat Removal System, RHR) ist zweisträngig aufgebaut und besitzt vier Pumpen, siehe Abb. 3.19. In BWR 4-Reaktoren mit Mark-I-Containment übernimmt das RHR-System neben der Notbespeisung des RDB nach [16] auch die Aufgaben der betrieblichen Nachzerfallswärmeabfuhr aus dem RDB, des Kondensationskammerkühlens bzw. -sprühens sowie des Flutens im Rahmen des Brennelementwechsels. Eine Wärmeabfuhr aus dem RDB oder der Kondensationskammer an den nuklearen Zwischenkühlkreislauf ist betrieblich oder bei Störfällen über die Wärmetauscher des RHR-Systems möglich. Relevant für die Nachwärmeabfuhr aus dem RDB bei Störfällen unter geringem Reaktordruck ist der Low Pressure Co-

lant Injection (LPCI) Mode des Nachwärmeabfuhrsystems. Der LPCI Mode des Nachwärmeabfuhrsystems hat die Funktion, die Notbespeisung sicherzustellen.

Das Hochdruckeinspeisesystem wird zusammen mit dem Kernsprühsystem sowie dem Nachwärmeabfuhrsystem auch als Notkühlsystem (Emergency Core Cooling System, ECCS) zusammengefasst. Ein System mit Isolation Condenser, wie bei Block 1, existiert nicht.

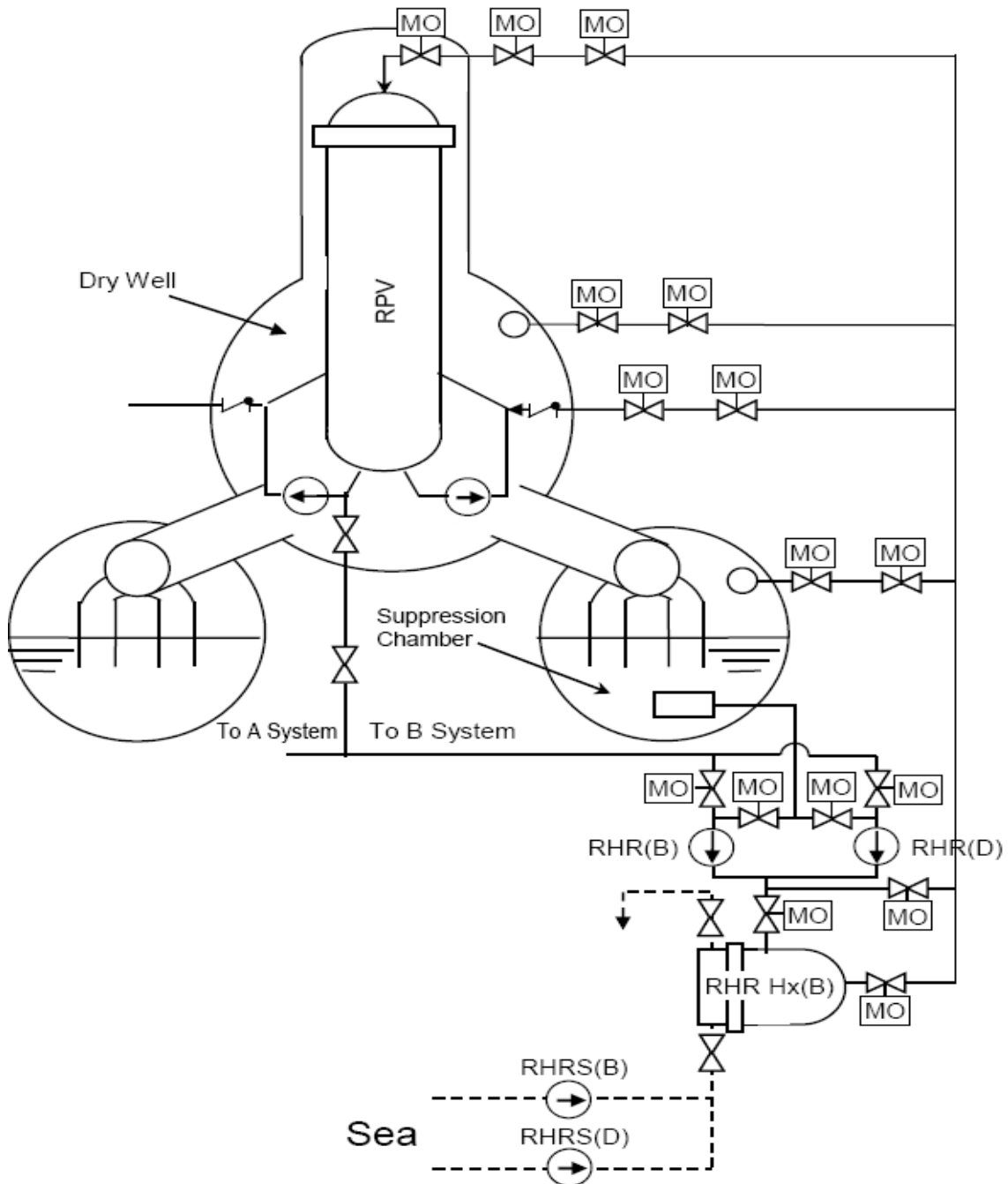


Abb. 3.19 Nachwärmeabfuhrsystem (RHR) [2]

3.4.1.5 Notstromdiesel

Die Blöcke 2 – 4 haben jeweils 2 Notstromdiesel (D/G). Die Notstromdiesel des dritten Blockes sind beide wassergekühlt. In den Blöcken 2 und 4 sind jeweils ein Diesel wasser- und ein Diesel luftgekühlt [18].

In den Blöcken 2 – 4 kann der Betrieb des dampfgetriebenen HPCI-Systems sowie des ebenfalls dampfgetriebenen RCIC-Systems auch aufrechterhalten bleiben, wenn die Batterieversorgung (DC) verfügbar ist. Die Kapazität der Batterien wird mit einer Dauer von 8 Stunden angegeben.

Die räumliche Anordnung der Notstromdiesel und der 125 V Batterien ist Abb. 3.21, Abb. 3.22 und Abb. 3.23 zu entnehmen.

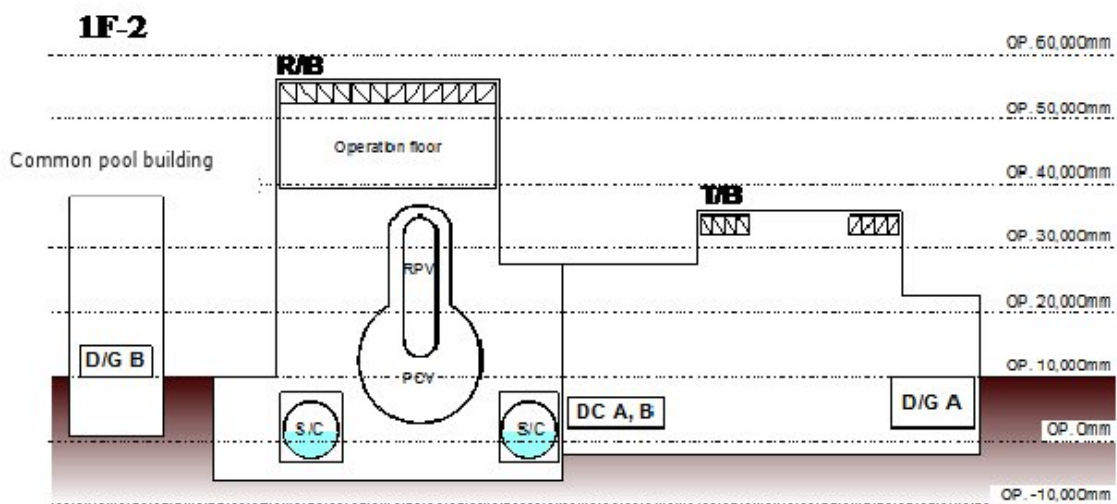


Abb. 3.21 Lage der Diesel und Batterien, Block 2 [2]

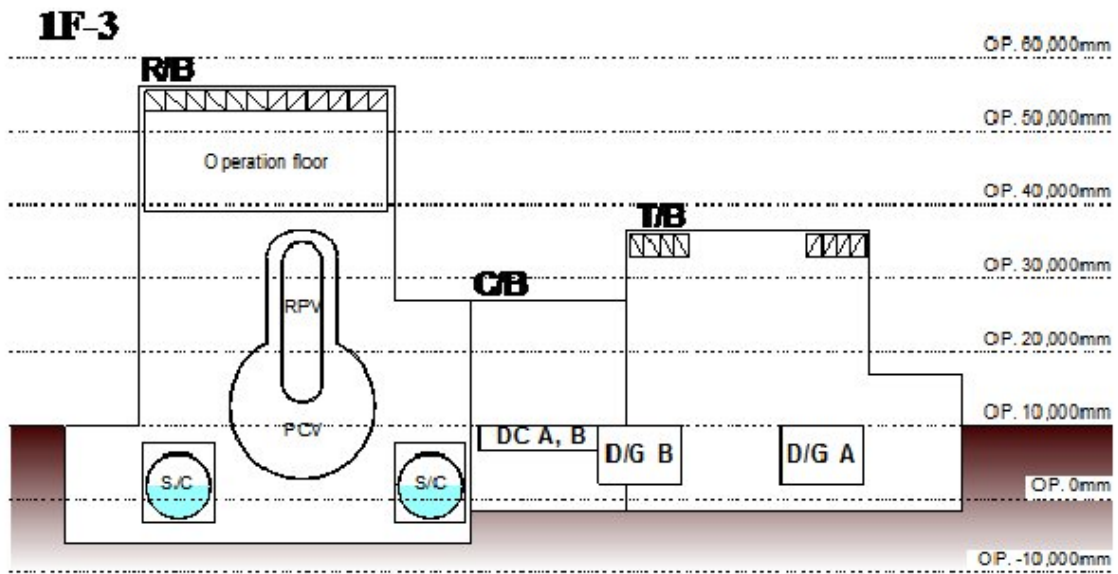


Abb. 3.22 Lage der Diesel und Batterien, Block 3 [2]

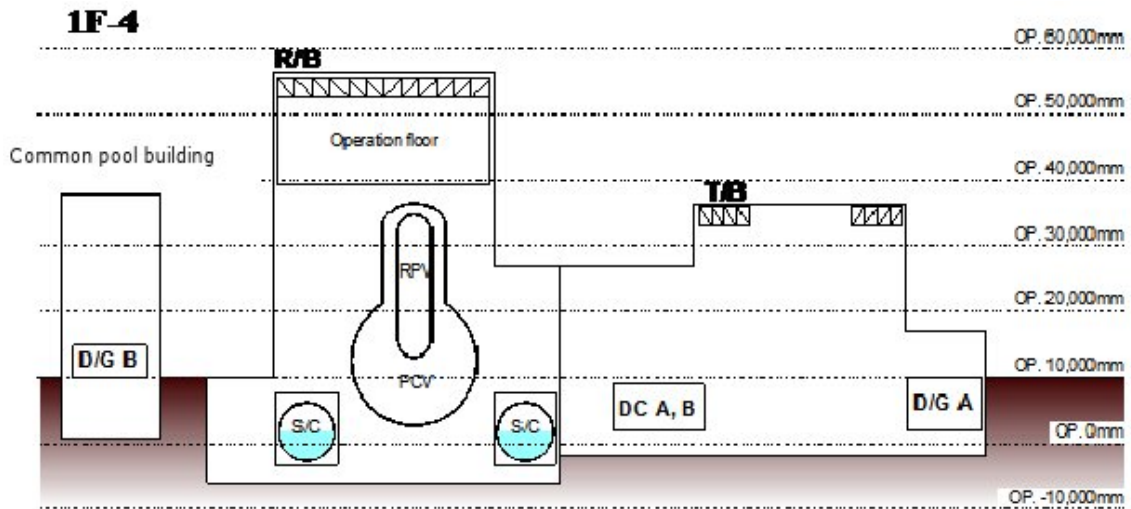


Abb. 3.23 Lage der Diesel und Batterien, Block 4 [2]

3.4.1.6 Ventingsystem

Block 1 besitzt ein nachgerüstetes Ventingsystem zur Druckentlastung des Containments (siehe Abb. 3.24). Diese Druckentlastung erfolgt ungefiltert und kann sowohl aus der Druck- als auch aus der Kondensationskammer erfolgen. In diesem System gibt es ein motorgesteuertes Ventil (MO-271) und jeweils zwei druckluftgesteuerte Ventile für die Druckentlastung aus Druckkammer (AO-207 und AO-208) bzw. Kondensationskammer (AO-205 und AO-206). Den Abgaskamin, in welchen auch dieses System einmündet, teilen sich die Blöcke 1 und 2, sowie sich die Blöcke 3 und 4 einen weiteren teilen.

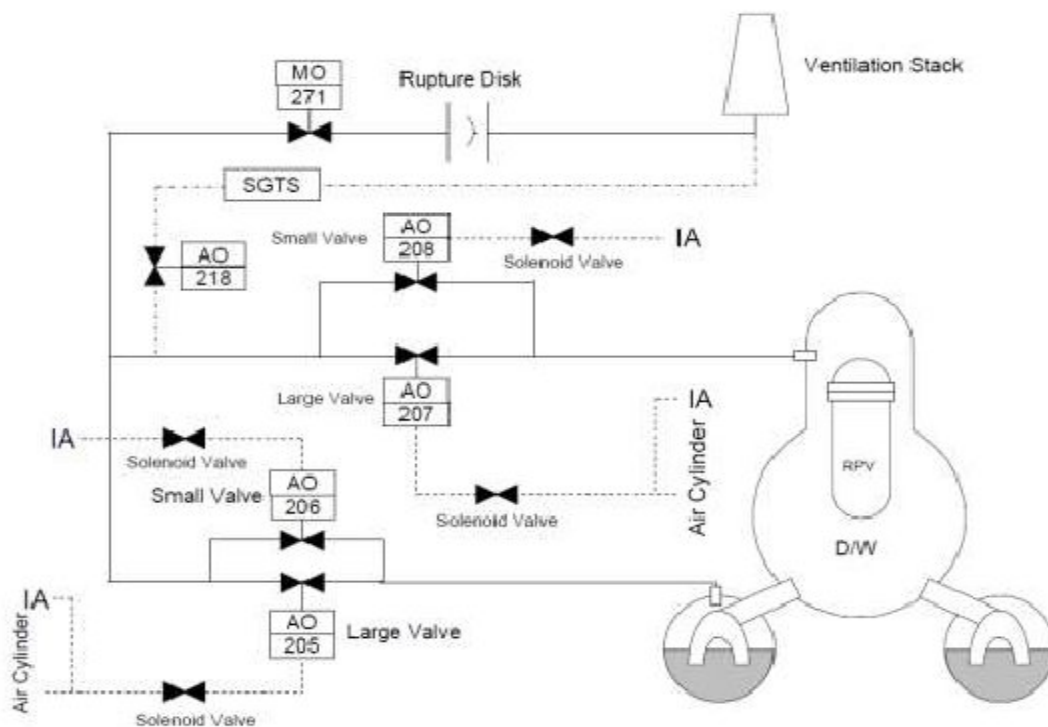


Figure IV-2-14 Overview of PCV Venting Facility (Units 2 and 3)

Abb. 3.24 Ventingsystem des Containments [2]

3.4.2 Ereignisablauf in Fukushima Dai-ichi, Block 2

11.03.2011 – 14:46 Uhr – Erdbeben

Zum Zeitpunkt des Erdbebens am 11.03.2011 um 14:46 Uhr befand sich der Block 2 des Kernkraftwerkes Fukushima Dai-ichi im Leistungsbetrieb. Der Block wurde aufgrund des Erdbebens automatisch abgeschaltet und im Zustand unterkritisch heiß gehalten. Nach dem Ausfall der externen Stromversorgung aufgrund von Schäden durch das Erdbeben starteten die zwei Notstromdiesel. Aufgrund des Ausfalls der Stromversorgung kam es zum Durchdringungsabschluss des Frischdampfsystems.

Der Prozessrechner von Block 2 zeichnete nach dem Erdbeben für etwa 60 Minuten Daten auf, d. h. bis ca. 15:46 Uhr. Nach dem Ausfall dieses Systems liegen nur noch die schriftlichen Aufzeichnungen der Mitarbeiter vor.

Der Füllstand im RDB sank zunächst durch die kollabierenden Dampfblasen, jedoch nicht unter die Ansprechmarken der ECCS-Systeme (siehe Abb. 3.25).

Durch den Containment- und Frischdampfabschluss stieg der Druck im RDB (siehe Abb. 3.25). Die Druckhaltung des RDB erfolgte über die Sicherheits- und Entlastungsventile.

die Pumpen des RHR sukzessive gegen 15:00 Uhr und 15:07 Uhr zur Kühlung der Ko-ka. Das RHR-System lief bis zum Ausfall der Drehstromversorgung gegen 15:36 Uhr.

11.03.2011 – ab 15:27 Uhr – Eintreffen des Tsunami am Kraftwerksstandort

Um 15:30 Uhr stieg die Temperatur in der Kondensationskammer wieder an. Die Pumpen des RHR-Systems fielen sukzessive bis 15:36 Uhr aus. Dies wird auf das Eintreffen der ersten Tsunamiwellen zurückgeführt. Durch den Tsunami versagten die Notstromdiesel und es kam somit zu einem Ausfall der Drehstromversorgung. Zusätzlich zu dem Ausfall der Diesel wurde das Nebenkühlwassersystem durch den Tsunami beschädigt.

Um 15:31 Uhr kam es zu einem Kurzschluss an einer der beiden Redundanzen der 125 V-Gleichspannungsversorgung. Hierdurch war unter anderem das HPCI-System (bzw. die Steuerung des Systems) nicht mehr einsatzfähig. Zusätzlich stand die Instrumentierung des Blockes nicht mehr zur Verfügung [25].

Aufgrund des Ausfalls des Nebenkühlwassers war das RHR nicht mehr in der Lage, die Wärme aus der Kondensationskammer abzuführen. Die Nachzerfallswärme des Reaktors wurde demnach nur aus dem RDB in die Kondensationskammer geführt. Daher resultierte eine Aufheizung der Kondensationskammer und folglich ein Druckanstieg im Containment.

Etwa eine Stunde nach Ausfall der Notstromdiesel gegen 16:30 Uhr wurde der Artikel 15 „Inability of water injection of the Emergency Core Cooling System“ ausgerufen, also der Ausfall der Notkühlung.

Aufgrund eines konstanten RDB-Füllstandes gegen 22:00 Uhr vermuten TEPCO und NISA, dass weiterhin eine Einspeisung über das RCIC bestanden hat.

12.03.2011

In der Zeit zwischen 4:20 Uhr und 5:00 Uhr wurden ein tiefer Füllstand im Kondensatvorratsbehälter und ein hoher Füllstand in der Kondensationskammer verzeichnet. Die Einspeisung des RCIC-Systems wurde hierdurch von dem Kondensatvorratsbehälter auf die Kondensationskammer umgestellt.

Am 12.03.2011 gegen 6:50 Uhr ordnete die japanische Aufsichtsbehörde NISA die Kontrolle des Containment-Druckes an, d. h. eine Druckentlastung des Containments, da wegen der fehlenden Wärmeabfuhr aus der Kondensationskammer der Druck angestiegen war.

13.03.2011

Als vorbereitende Arbeitsmaßnahme für ein Venting wurde gegen 8:10 Uhr das motorgetriebene Ventil der Venting-Leitung zum Kamin (MO271, siehe Abb. 3.24) um 25 % geöffnet. Einen Tag nach der Anordnung von NISA zur Druckentlastung wurde um 11:00 Uhr das Venting durch das Öffnen des pneumatischen Ventils zur Kondensationskammer (AO205, siehe Abb. 3.24) bei einem Druck von 4,6 bar in der Druckkammer eingeleitet. Ein Druckabfall in der Druckkammer konnte jedoch nicht bestätigt werden, die Berstscheibe der Venting-Leitung blieb intakt [2], [32].

14.03.2011

Gegen 11:00 Uhr fand eine Explosion im oberen Bereich des Reaktorgebäudes von Block 3 statt. Aufgrund dieser Explosion schloss das Ventil (AO205, siehe Abb. 3.24) der Venting-Leitung zur Kondensationskammer und konnte nicht mehr geöffnet werden. Im Anschluss wurden Arbeiten zur Wiederherstellung des Ventingsystems durchgeführt die bis 21:00 Uhr andauerten.

In der Zeit vom 11.03.2011 bis zum 14.03.2011 um 12:00 Uhr lag der Füllstand im RDB bei einem Wert von 3 m oberhalb des Kerns.

Ab 12:00 Uhr fiel der Füllstand im RDB jedoch ab. Daher wird davon ausgegangen, dass das RCIC-System nicht mehr funktionstüchtig war. Daraufhin wurde um 13:25 Uhr der Artikel 15: „Loss of reactor cooling functions“ ausgerufen.

Insgesamt war damit die Funktion des RCIC für 30 Stunden vorhanden, auch nach dem Verlust der Gleichstromversorgung.

Bis gegen 18:00 Uhr sanken der Druck sowie die Temperatur im RDB, während nachfolgend ein Anstieg von Druck und Temperatur verzeichnet wurde. Dies wird auf das Schließen der Sicherheits- und Entlastungsventile zurückgeführt. NISA und TEPCO

vermuten, dass dies unter anderem durch Probleme mit der Druckluftversorgung für die pneumatisch betätigten Ventile zu begründen ist.

Ab 19:54 Uhr erfolgte eine Meerwassereinspeisung in den RDB über Feuerlöschleitungen und einen Feuerlöschanschluss.

Damit wurde der RDB seit dem Ausfall des RCIC zwischen 12:00 Uhr und 13:25 Uhr für etwa 6,5 – 8 Stunden nicht mehr bespeist.

NISA geht nach der Durchführung von Analysen davon aus, dass der Kern gegen 18:00 Uhr freigelegt wurde und dadurch eine Kernschmelze eingetreten ist. Begleitet ist diese von der Oxidation der Brennstabhüllrohre sowie der Brennelementkästen und von Radionuklidfreisetzungen. Die Analysen von TEPCO kommen in etwa zu dem gleichen Ergebnis. Weiterhin wird davon ausgegangen, dass der Kern zu einem Großteil geschmolzen ist und sich auf dem Boden des RDB befindet. Es besteht weiterhin die Möglichkeit, dass der RDB beschädigt wurde und ein Teil der Schmelze in die Druckkammer gelangt ist.

In Folge der Kernschäden kam es zur Wasserstoffbildung und zu einem auslegungsüberschreitenden Druckanstieg im Containment. Gegen 21:00 Uhr wurde das kleine pneumatische Ventil der Venting-Leitung (AO206, siehe Abb. 3.24) zur Kondensationskammer geöffnet. Trotz dieser Maßnahme stieg der Druck in der Druckkammer weiter an. Es wurde um 22:50 Uhr der Artikel 15 „Unusual rise of pressure in pressure containment vessel“ ausgerufen. Da die Berstscheibe der Venting-Leitung nicht öffnete wurde das Venting durch das Öffnen des pneumatischen Ventils (AO208, siehe Abb. 24) um 0:02 Uhr am 15.03.2011 umgestellt auf die Druckkammer. Wenige Minuten später schloss das pneumatische Ventil wieder. Nachfolgend konnte keine Senkung des Druckkammerdrucks festgestellt werden.

15.03.2011

Gegen 6:00 Uhr wurde ein ungewöhnliches Geräusch in der Nähe der Kondensationskammer wahrgenommen. Nachfolgend wurde ein Druckabfall in der Kondensationskammer festgestellt. Der Betreiber TEPCO und die Aufsichtsbehörde NISA schlossen daraus, dass die Kondensationskammer beschädigt worden ist. Es wird davon ausgegangen, dass es sich bei dem ungewöhnlichen Geräusch in der Nähe der Kondensationskammer um eine Wasserstoffexplosion gehandelt hat, wodurch die Kondensations-

kammer beschädigt wurde (siehe Kapitel 8.3). Der Wasserstoff sollte sich durch eine Zirkon-Wasser-Reaktion im RDB gebildet haben, die aufgrund der hohen Temperaturen im Kern begleitend zum Kernschmelzvorgang einsetzte. Unklar ist, wie der Wasserstoff in den unteren Bereich des Reaktorgebäudes gelangte und ob ein Zusammenhang mit dem Ventingvorgang besteht.

20.03.2011

Gegen 15:46 Uhr konnte eine provisorische Stromversorgung über das externe Netz hergestellt werden.

26.03.2011

Ab 10:10 Uhr wurde anstelle von Meerwasser mit Borsäure versetztes Frischwasser in den RDB gespeist. Die Borsäureeinspeisung dient als unterstützende Maßnahme zur Sicherstellung der Unterkritikalität. Im Laufe des Tages (16:46 Uhr) konnte die Beleuchtung auf der Warte wiederhergestellt werden.

27.03.2011

Gegen 18:31 Uhr wurde die zur Frischwasserbespeisung des RDB angeschlossene Feuerlöschpumpe durch eine provisorische Elektropumpe ersetzt.

3.5 Fukushima Dai-ichi, Block 3

3.5.1 Anlagenbeschreibung

Siehe Anlagenbeschreibung von Block 2, Kapitel 3.4.1.

3.5.2 Ereignisablauf in Fukushima Dai-ichi, Block 3

11.03.2011 – 14:46 Uhr – Erdbeben

Zum Zeitpunkt des Erdbebens um 14:46 Uhr befand sich der Block 3 des Kernkraftwerkes Fukushima Dai-ichi im Leistungsbetrieb. Der Block wurde aufgrund des Erdbebens automatisch abgeschaltet und im Zustand unterkritisch heiß gehalten. Nach dem Ausfall der externen Stromversorgung aufgrund von Schäden durch das Erdbeben starteten zwei Notstromdiesel. Aufgrund des Ausfalls der Stromversorgung kam es zum Durchdringungsabschluss des Frischdampfsystems.

Der Alarmrechner von Block 3 zeichnete die ersten 3,5 Stunden nach dem Erdbeben auf. Nach dem Ausfall dieses Systems liegen neben den Schreiberdaten nur noch die schriftlichen Aufzeichnungen der Mitarbeiter vor. Die Schreiber von Block 3 zeichneten Daten bis nach dem Eintreten der Kernschmelze auf.

Der Füllstand im RDB sank zunächst durch die kollabierenden Dampfblasen, jedoch nicht unter die Ansprechmarken der ECCS-Systeme (siehe Abb. 3.26).

Durch den Durchdringungsabschluss stieg der Druck im RDB (siehe Abb. 3.26). Die Druckhaltung des RDB erfolgte nachfolgend über die Sicherheits- und Entlastungsventile.

Zur Bespeisung des RDB wurde das RCIC um 15:05 Uhr manuell gestartet. Gegen 15:28 Uhr erfolgte eine automatische Abschaltung aufgrund hohen Füllstandes (siehe Abb. 3.26).

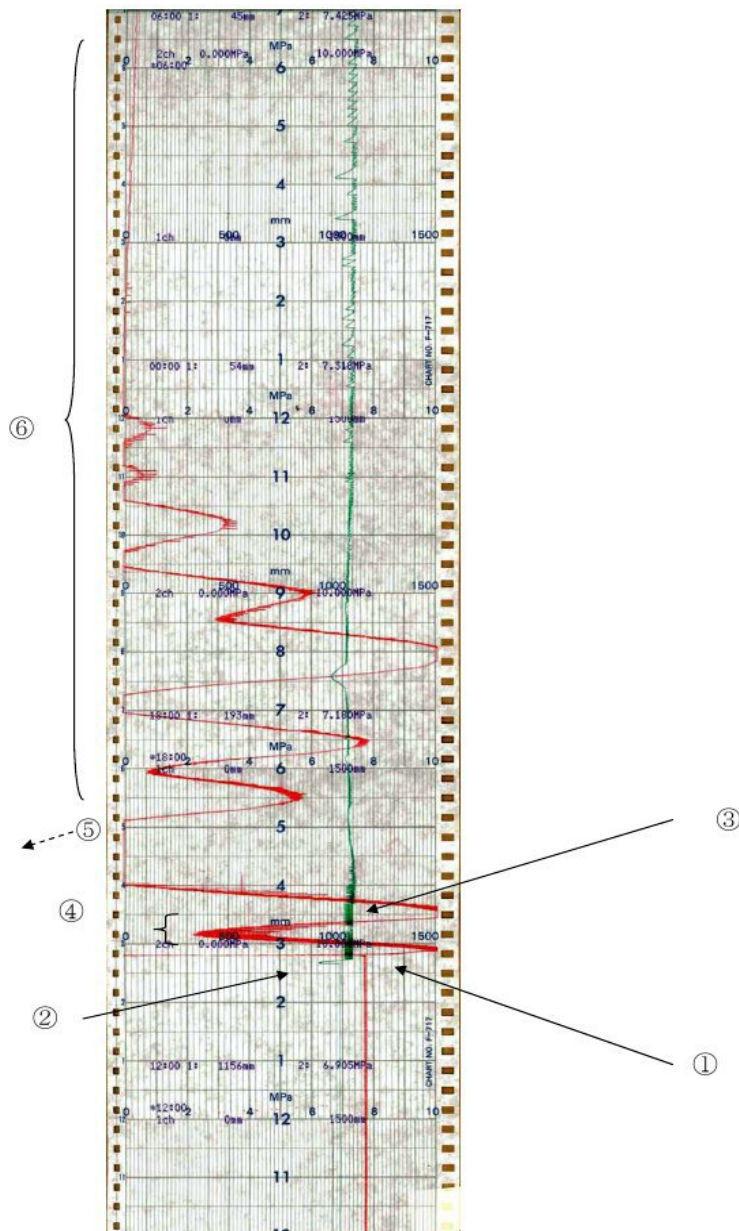


Abb. 3.26 RDB-Füllstand (rot), RDB-Druck (grün) [4]

Folgende Ereignisse sind im Verlauf des RDB-Füllstandes/Druckes (Abb. 3.26) zu erkennen:

1. 14:47 Uhr, RESA
2. Druck fällt zunächst, steigt dann nach dem Schließen der FD-Isolationsventile
3. Druckhaltung mit S+E-Ventilen
4. Füllstandsänderung aufgrund RCIC (15:05 – 15:25 Uhr)
5. Füllstandsänderung aufgrund RCIC (15:05 – 15:25 Uhr)
6. RDB-Druck ca. 70 bar, RDB-Füllstand ca. 4 m über dem Kern

11.03.2011 – ab 15:27 Uhr – Eintreffen des Tsunami am Kraftwerksstandort

Etwa eine Stunde nach dem Erdbeben, um 15:38 Uhr, versagten die Notstromdiesel und es kam somit zu einem Ausfall der Drehstromversorgung. Nach Aussagen der japanischen Behörde ist der Ausfall der Notstromdiesel auf den Tsunami zurückzuführen. Zusätzlich zu dem Ausfall der Diesel wurde das Nebenkühlwassersystem durch den Tsunami beschädigt. Im Gegensatz zu den Blöcken 1 und 2 wurde die Batterieversorgung des Blockes 3 nicht durch den Tsunami überflutet und stand somit nach dem Eintreffen des Tsunami zur Verfügung.

Um 16:03 Uhr wurde das RCIC wieder manuell in Betrieb genommen.

12.03.2011

Um 11:36 Uhr fielen das RCIC-System und damit die Bespeisung des RDB aus. Der genaue Grund des Ausfalls ist derzeit nicht bekannt. NISA und TEPCO halten es für möglich, dass die Kapazität der Batterien aufgebraucht war, da das System bereits 20 Stunden in Betrieb war.

Um 12:35 Uhr startete das HPCI-System automatisch aufgrund niedrigen Füllstands im RDB. Angaben, ob hierfür gegebenenfalls separate Batterien vorhanden waren, liegen nicht vor (siehe Abb. 3.27)

Bis um 12:30 Uhr blieb der Reaktordruck stabil bei 70 bar. Nach dem Start des HPCI-Systems fiel der Reaktordruck innerhalb von sechs Stunden um 60 bar ab (siehe Abb. 3.27).

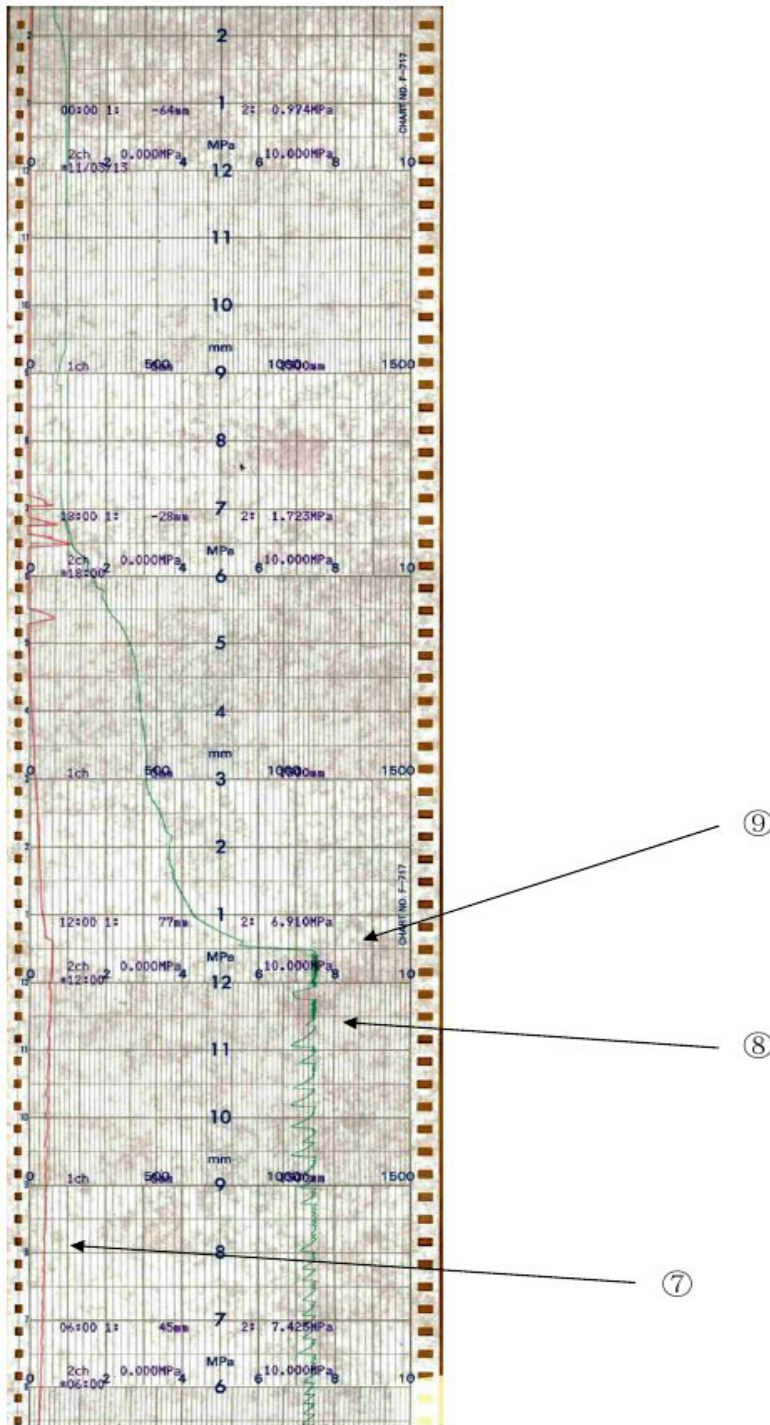


Abb. 3.27 RDB-Füllstand (rot), RDB-Druck (grün) [4]

Folgende Ereignisse sind im Verlauf des RDB-Füllstandes/Druckes (Abb. 3.27) zu erkennen:

7. RDB-Füllstand ca. 4 m über dem Kern
8. Kleine Änderung im RDB-Druck (S+E-Ventile)
9. Große Änderung im RDB-Druck (Start HPCI)

13.03.2011

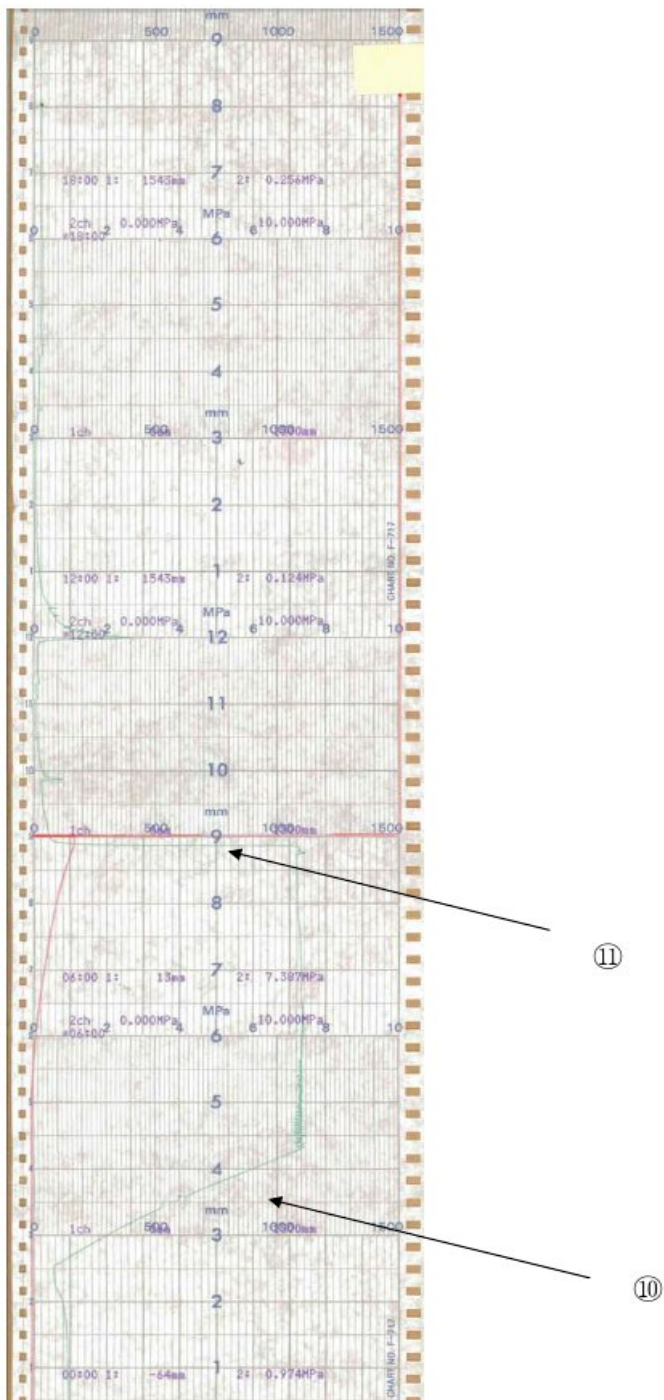


Abb. 3.28 RDB-Füllstand (rot), RDB-Druck (grün) [4]

Folgende Ereignisse sind im Verlauf des RDB-Füllstandes/Druckes (Abb. 3.28) zu erkennen:

10. Druck steigt innerhalb von 2 h auf 70 bar

11. Druck fällt schnell ab

Um 2:42 Uhr stoppte das HPCI-System die Bespeisung des RDB aufgrund eines niedrigen Dampfdruckes. Der Druck lag unter 10 bar (siehe Abb. 3.28).

Aufgrund des Druckabfalls beim Betrieb und dem nachfolgenden Ausfall des HPCI hält NISA es für möglich, dass eine Leckage im HPCI vorlag [2] oder die Batterien zu weit entleert waren [32]. Bis um 4:00 Uhr stieg der Druck aufgrund des Ausfalls des HPCI wieder auf 70 bar an.

Bis 5:10 Uhr wurde versucht, das RCIC wieder in Betrieb zu nehmen, was jedoch nicht gelang. Der Versuch, die Niederdruckstränge des Notkühlsystems (Emergency Core Cooling System) in Betrieb zu nehmen, scheiterte ebenfalls. Daher wurde der Artikel 15 „Loss of reactor cooling function“ ausgerufen.

Aufgrund des ansteigenden Druckes im Containment wurde ab 4:50 Uhr mit Arbeitsmaßnahmen für das Venting begonnen. Zum Öffnen der benötigten Ventile waren mehrere händische Maßnahmen erforderlich. Um 8:41 Uhr konnte mit dem eigentlichen Ventingvorgang begonnen werden. Gegen 9:24 Uhr wurde ein Absinken des Druckes im Containment von 6,37 bar (Druck um 9:10 Uhr) auf 5,4 bar festgestellt. Zuvor meldete TEPCO, dass zur Druckabsenkung im Containment gesprüht werden sollte, was jedoch wieder abgesagt wurde.

Um eine Druckentlastung des Reaktordruckbehälters durchzuführen sollte ein Sicherheits- und Entlastungsventil geöffnet werden. Aufgrund fehlender Batteriekapazität war dieses zunächst nicht möglich. Mit der Hilfe von gesammelten Autobatterien war es später möglich eins der Ventile zu verfahren. Gegen 9:00 Uhr folgte hierdurch eine schnelle Druckabsenkung (um ca. 70 bar) des RDBs, siehe Abb. 3.28 [32].

Nach dem Druckabfall im RDB parallel zum Ventingvorgang wurde gegen 9:25 Uhr Frischwasser mit Borsäure versetzt über eine Feuerlöschpumpe in den RDB eingespeist. Als Frischwasserquelle diente hierbei die Löschwasserzisterne. Als etwa vier Stunden später, um 13:12 Uhr, die Zisterne erschöpft war wurde die Einspeisung von Frischwasser auf Meerwasser umgestellt [32].

Der Reaktor wurde somit seit dem Ausfall des HPCI gegen 2:42 Uhr für über 6,5 Stunden nicht mehr bespeist. NISA geht nach Analysen davon aus, dass eine Kernfreilegung gegen 8:00 Uhr erfolgte. Daraufhin kam es zur Kernaufheizung und nachfolgender Kernschmelze. Dies ist verbunden mit der Erzeugung von Wasserstoff

und der Freisetzung von Radionukliden. NISA vermutet, dass ein Großteil des Kerns geschmolzen ist und sich auf dem Boden des RDB befindet. Weiterhin besteht die Möglichkeit, dass es zu einer Beschädigung des RDB gekommen ist und ein Teil des Kerns in die Druckkammer gelangt ist.

14.03.2011

Die Bespeisung des Reaktordruckbehälters wurde für etwa zwei Stunden eingestellt (1:10 Uhr – 3:20 Uhr). Grund dafür war ein leeres Becken, aus dem das Meerwasser für die Einspeisung entnommen wurde. Danach konnte die Bespeisung des RDB wieder aufgenommen werden.

Zwei Stunden später, um 5:20 Uhr, wurde ein weiteres Mal ein Venting des Containments durchgeführt.

Kurze Zeit später, gegen 6:50 Uhr, kam es zu einem anomalen Anstieg des Druckes im Containment auf 5,3 bar. Dabei ist nicht bekannt, wie hoch der Druck im Containment zuvor war und in welchen Zeitrahmen der Druckanstieg erfolgte. Nach etwa zweieinhalb Stunden sank der Druck im Containment auf 4,9 bar.

Gegen 11:00 Uhr Ortszeit ereignete sich eine Explosion im oberen Bereich des Reaktorgebäudes. NISA und TEPCO vermuten, dass es sich um eine Wasserstoffexplosion gehandelt hat. Der Wasserstoff hat sich durch eine Zirkon-Wasser-Reaktion, die aufgrund der hohen Temperaturen im RDB gebildet, bevor im weiteren Verlauf eine Kernschmelze einsetzte. NISA nimmt an, dass sich der Wasserstoff durch Leckagen am Containment im Reaktorgebäude ansammeln konnte. Ein Zusammenhang mit dem Ventingvorgang wird nicht gesehen.

16.03.2011

Da Schäden am Containment des Blockes nicht ausgeschlossen werden konnten, wurden die Warten der Blöcke 3 und 4 um 10:45 Uhr vorsorglich für etwa eine Stunde evakuiert. Danach konnten die Arbeiten zur Wassereinspeisung wieder aufgenommen werden.

22.03.2011

Gegen 22:43 Uhr konnte die Beleuchtung der Warte wiederhergestellt werden.

25.03.2011

Ab 18:02 Uhr erfolgt die Einspeisung in den RDB nicht mehr mit Meerwasser, sondern mit Frischwasser.

28.03.2011

Gegen 20:30 Uhr wurde die Frischwasserbespeisung des RDB umgestellt. Anstatt einer Feuerlöschpumpe wurde seitdem eine provisorische Elektropumpe eingesetzt.

3.6 Fukushima Dai-ichi, Block 4

3.6.1 Anlagenbeschreibung

Siehe Anlagenbeschreibung von Block 2, Kapitel 3.4.1.

3.6.2 Ereignisablauf in Fukushima Dai-ichi, Block 4

11.03.2011 – Erdbeben

Zum Zeitpunkt des Erdbebens gegen 14:46 Uhr am 11.03.2011 befand sich der Block 4 des Kernkraftwerkes Fukushima Dai-ichi in Revision. Der Kern war bereits über einen längeren Zeitraum vollständig in das Brennelementlagerbecken entladen. In diesem befanden sich insgesamt die Brennelemente von ca. 2,5 Kernladungen. Die externe Stromversorgung des Blockes fiel aufgrund von Schäden durch das Erdbeben aus. Es wird anhand eines gesunkenen Kraftstofffüllstandes und einer teilweisen Stromversorgung einiger Systeme davon ausgegangen, dass ein Notstromdiesel startete. Der zweite vorhandene Notstromdiesel war aufgrund von Instandhaltungsarbeiten nicht verfügbar.

Eintreffen des Tsunami am Kraftwerksstandort Fukushima Dai-ichi

Infolge des Tsunami versagte gegen 15:38 Uhr der Notstromdiesel und damit die Drehstromversorgung. Damit war die Kühlung des Brennelementlagerbeckens nicht mehr möglich.

15.03.2011

Vier Tage nach dem Tsunami kam es am 15.03.2011 gegen 6:00 Uhr zu einer Explosion im Reaktorgebäude von Block 4. Dabei wurden weite Teile des Gebäudes zerstört. Es war insgesamt die dritte Explosion am Standort. Es wird davon ausgegangen, dass es sich dabei um eine Wasserstoffexplosion gehandelt hat. Die Ursache der Explosion kann derzeit noch nicht eindeutig identifiziert werden. NISA und TEPCO nehmen anhand der Nuklid-Analysen des Wassers im BE-Becken an, dass es zu keinen umfangreichen Schäden an den Brennelementen gekommen ist. Ferner wurden keine Beschädigungen wie Risse oder Leckagen am Becken entdeckt. Laut NISA und TEPCO besteht die Möglichkeit, dass Wasserstoff, der durch die Kernschäden im Block 3 ent-

standen ist, über das Lüftungssystem in das Reaktorgebäude von Block 4 gelangen konnte und sich angesammelt haben kann. Die Lüftungssysteme der beiden Blöcke sind über Leitungen in Richtung Kamin miteinander verbunden (siehe Abb. 3.29). Zudem existieren keine Absperrventile bzw. Rückschlagklappen, die ein Einströmen in die Leitungen des Lüftungssystems des jeweils anderen Blockes verhindern könnten.

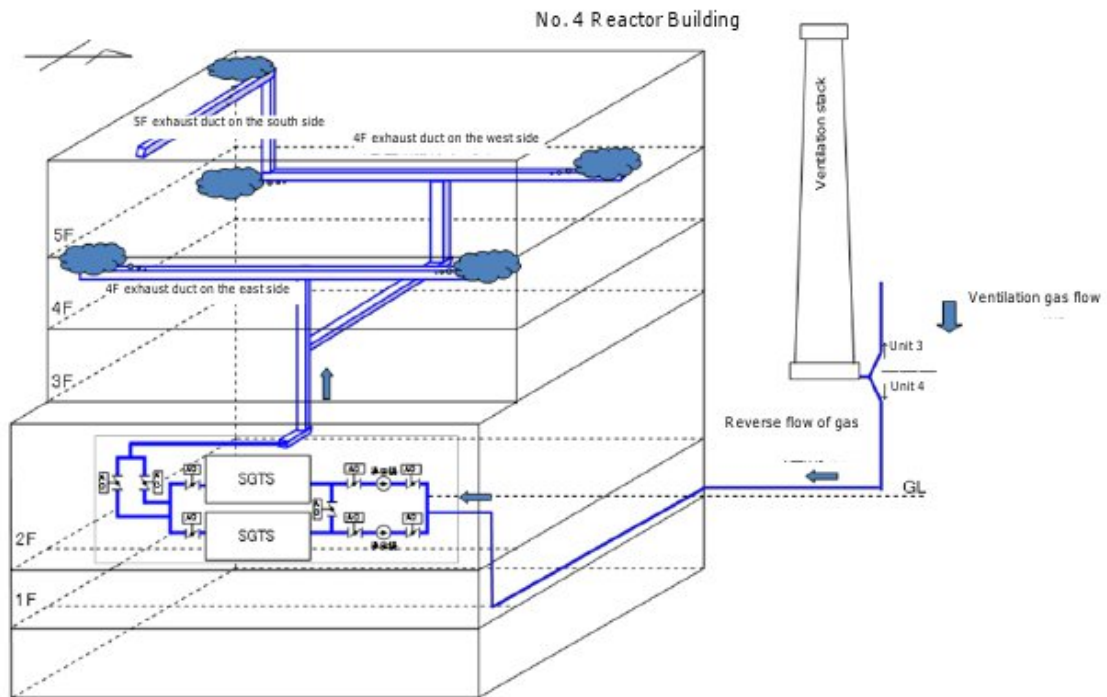


Abb. 3.29 Vermutete Wasserstoffroute von Block 3 nach Block 4 [3]

Die Wärmeabfuhr des Brennelementlagerbeckens ist in einem separaten Kapitel, Kapitel 3.8, für alle Blöcke beschrieben.

3.7 Brennelementlagerbecken der Blöcke 1 – 6

Die Kühlung und Bespeisung der Brennelementlagerbecken waren durch die Auswirkungen des Erdbebens und des Tsunami ebenfalls eingeschränkt. Die Brennelementlagerbecken sind im Reaktorgebäude oberhalb des Containments untergebracht. In Tab. 3.2 sind die Beladungen der Brennelementbecken sowie die Lagerkapazitäten nach Blöcken aufgeführt.

Tab. 3.2 Gelagerte Brennelemente und Lagerkapazitäten der Brennelementlagerbecken [2]

	Gelagerte Brennelemente (davon neue BE)	Lagerkapazität
Block 1	392 (100)	900
Block 2	615 (28)	1.240
Block 3	566 (52)	1.220
Block 4	1.535 (204)	1.590
Block 5	994 (48)	1.590
Block 6	940 (64)	1.770
Gemeinsames BE-Becken	6.375	6.840

In den ersten Tagen nach dem Erdbeben war die Wärmeabfuhr aus den Brennelementlagerbecken der Blöcke 1 – 4 komplett ausgefallen. Die Brennelementlagerbecken wurde dann auf unterschiedliche Arten bespeist. In den ersten Tagen wurde zuerst versucht, die Brennelementlagerbecken der Blöcke 3 und 4, deren Dachstrukturen durch die Explosionen zerstört waren, über Hubschrauber mit Wasser zu versorgen. Im weiteren Verlauf wurden zur Einspeisung Wasserwerfer verwendet.

Zunächst wurden die Brennelementlagerbecken der Blöcke 1, 3 und 4 über eine Auto-betonpumpe bespeist, das Lagerbecken von Block 2 wurde über die Rohrleitungen des Beckenkühl- und -reinigungssystems und einer mobilen Pumpe gefüllt. Ab Ende Mai bestand auch für die Blöcke 1, 3 und 4 eine Einspeisemöglichkeit in die Brennelementlagerbecken über die Rohrleitungen der jeweiligen Brennelementlagerbeckenkühl- und -reinigungssysteme.

Im Verlauf des Ereignisses wurde zuerst Meerwasser zur Einspeisung verwendet. Im späteren Verlauf wurde auf Frischwasser umgestellt. Ab dem 09.05.2011 wurde dem Wasser Hydrazin zugegeben, welches als Korrosionsinhibitor wirkt.

In den Blöcken 2 und 3 wurde eine alternative Kühlung für die Brennelementlagerbecken eingerichtet. Dazu wurden Wärmetauscher mit einem sekundären Kühlkreis installiert.

In den Blöcken 5 und 6 wurde die Kühlung des RDB und der Brennelementlagerbecken ab dem 19.03.2011 mittels einer mobilen Kühlwasserpumpe über das Kühlwassersystem und das notstromgesicherte Nachwärmeabfuhrsystem sichergestellt.

3.8 INES-Einstufung der japanischen Behörde für Fukushima Dai-ichi

Der Unfall in den Blöcken 1 – 3 wurde am 12.03.2011 zunächst von der Behörde als INES 3 eingestuft und dann am 18.03.2011 aufgrund der schweren Schäden am Reaktorkern nach INES 5 hochgestuft. Am 12.04.2011 erfolgte die Einstufung nach INES 7 aufgrund der radiologischen Belastung für die Umwelt.

Das Ereignis in Block 4 wurde von der Behörde am 18.03.2011 nach INES 3 eingestuft.

4 Maßnahmen zur Begrenzung der Unfallfolgen am Standort Fukushima Dai-ichi

Ziel der von TEPCO durchgeführten Maßnahmen ist es, eine stabile Kühlung sowohl der beschädigten Reaktorkerne wie auch der Brennelemente in den Brennelementlagerbecken sicherzustellen und gleichzeitig die Freisetzung weiterer Aktivität zu minimieren.

4.1 Maßnahmen zur Aufrechterhaltung eines stabilen Anlagenzustandes

Trotz des gegenwärtig stabilen Zustandes der Reaktoren und Brennelementlagerbecken sind nach wie vor Maßnahmen erforderlich, um diesen Zustand zu erhalten und die Nachzerfallsleistung abzuführen. Hierzu gehören sowohl die laufende Kühlung der Reaktoren und Brennelementlagerbecken als auch die Inertisierung der Containments zur Vermeidung einer Wasserstoffexplosion. Die zu diesem Zweck eingesetzten Pumpen, Aggregate und elektrischen Anlagen sind (Stand 06.07.2011) größtenteils provisorischer Natur und nur einfach vorhanden.

Es besteht zusätzlich die Möglichkeit, dass durch weitere Einwirkungen von außen, wie z. B. Nachbeben, dadurch ausgelöste Tsunamis oder auch Blitzeinschläge, einzelne oder mehrere Aggregate ausfallen können oder es zu weiteren Zerstörungen an den Gebäuden oder noch intakten Komponenten kommt.

Zur Minimierung dieser Gefahr wurden zunächst Fahrzeuge der Feuerwehr mit Pumpen und Generatoren in der Nähe der Anlage platziert, so dass für ausgefallene Aggregate unmittelbar Ersatz bereitsteht. Der Ort wurde dabei soweit landeinwärts gewählt, dass eine Überflutung nicht möglich ist. Zusätzlich wurde am 30.06.2011 die Errichtung eines provisorischen Hochwasserschutzes abgeschlossen. Zur Stabilisierung der Stromversorgung plant TEPCO neben der vorhandenen externen Hochspannungsleitung und den Dieselgeneratoren den Anschluss einer weiteren Hochspannungsleitung aus dem Netz der Tohoku EPCO.

4.2 Sonstige Maßnahmen auf dem Anlagengelände

Nach der Wiederherstellung von provisorischen Einspeisemöglichkeiten wenige Stunden bzw. Tage nach Ereigniseintritt, ohne dass dadurch gravierende Kernschäden an

allen drei zum Zeitpunkt des Ereignisses in Betrieb befindlichen Blöcken verhindert werden konnten, wurden die Reaktoren und BE-Lagerbecken zunächst ausschließlich von außen mit frischem, nicht kontaminiertem Wasser (zunächst Meerwasser, später Süßwasser) bespeist. Hierdurch entstanden pro Tag mehrere hundert Kubikmeter hochkontaminierten Wassers, insbesondere im RDB.

Unklar ist, welche Wasserstände sich dadurch in der Kondensations- und Druckkammer zwischenzeitlich eingestellt haben und wie viel Wasser als Dampf während der zahlreichen Druckentlastungsvorgänge des Containments verloren ging. Bei einer fortwährenden Bespeisung des RDB von außen mit Frischwasser oder auch wieder aufbereitetem Wasser sammelt sich das eingespeiste Wasser zunächst im Containment an. Bekannt ist, dass es seit Wochen keine Druckentlastung des Containments mehr gab. Unklar ist, in welcher Form die Nachwärmeabfuhr aus dem Containment stattgefunden hat. In dieser Zeit konnten sich große Mengen kontaminierten Wassers in den Gebäuden ansammeln. Da eine Wiederinbetriebnahme der Notkühlsysteme im Umlauf gescheitert ist, wird sich die Menge kontaminierten Wassers, die durch die Einspeisung in den RDB von außen bedingt ist, weiter erhöhen.

Bekannt ist auch, dass sich große Mengen kontaminierten Wassers in den Gebäuden in tieferliegenden Stockwerken und außerhalb der Gebäude in Gräben und Schächten ansammelten. Durch Radionuklidfreisetzungen aus dem Containment werden abgelagerte Radionuklide mit dem Wasser teils mitgetragen und gelangen so in andere Gebäudeteile. Dies ist in Folge der Zerstörungen an den Gebäuden kaum zu verhindern. Über Undichtigkeiten im Bereich der Kühlwassereinläufe kam es mehrfach zu Einträgen von hochkontaminiertem Kühlwasser in den Pazifik, die jedoch mittlerweile durch Barrieren minimiert werden konnten. Mit Stand vom 06.07.2011 befinden sich nach Angaben von JAIF etwa 100.000 m³ kontaminiertes Wasser mit einer Aktivität von 720.000 TBq auf dem Anlagengelände.

Um eine mit einer erheblichen Aktivitätsfreisetzung verbundene regenbedingte Auswaschung dieser Abwässer zu verhindern, wurden von TEPCO zunächst provisorische Lagerkapazitäten eingerichtet (bis zum 06.07.2011 ca. 30.000 m³). Am 17.06.2011 nahm eine Abwasser-Dekontaminationsanlage den Testbetrieb auf, am 27.06.2011 erfolgte erstmalig eine Bespeisung der Reaktoren mit aufbereitetem Wasser. Die Dekontaminationsanlage verfügt über eine Kapazität von 1.200 m³/d, die jedoch aufgrund diverser technischer Schwierigkeiten (zugesetzte Filter, Leckagen etc.) bis zum 06.07.2011 noch nicht erzielt wurde. Die tatsächliche Kapazität ist jedoch ausreichend,

um den Bedarf der Reaktoren mit Kühlwasser zu decken. Dies ist ein erster Schritt um zu verhindern, dass durch die Kühlung mit nicht aufbereitetem Frischwasser weiterhin hochkontaminierte Abwassermengen entstehen. Langfristiges Ziel ist es, durch geeignete Aufbereitungsmaßnahmen die Aktivität eines Großteils der Abwässer soweit zu reduzieren, dass eine Abgabe an die Umgebung möglich ist.

Die Etablierung eines geschlossenen Kühlkreislaufs für die Reaktoren ohne zwischengeschaltete externe Wasseraufbereitung ist vorgesehen, gestaltet sich aber aufgrund der unbekanntenen Leckagen an den Containments sowie der ebenfalls unklaren Position der Reaktorkerne bzw. der Informationen zur Integrität der Reaktordruckbehälter als schwierig.

Für die Kühlung der BE-Lagerbecken werden für die Blöcke 2 – 3 geschlossene Kühlkreisläufe verwendet (Stand 06.07.2011), bei den Blöcken 1 und 4 werden Maßnahmen zu Errichtung solcher Kühlkreisläufe unternommen.

Durch das Versprühen von Bindemitteln auf dem Anlagengelände sollen Auswaschungen fester abgelagerter radioaktiver Substanzen außerhalb des Containments und die Verbreitung radioaktiven Staubes durch Witterungseinflüsse möglichst reduziert werden. Langfristig sollen Einhausungen über den Reaktorgebäuden errichtet werden und einen weiteren Aktivitätsaustrag verhindern. Die Bauarbeiten hierfür begannen am 28.06.2011.

Aufgrund des nach wie vor instabilen Anlagenzustandes ist es nicht möglich, verlässliche Zeitpläne für die Durchführung der einzelnen Maßnahmen anzugeben. Die Zeitspanne für eine Überführung aller Blöcke in einen Zustand mit geschlossenem Kühlkreislauf beträgt nach Angaben von TEPCO noch mindestens 6 Monate bis zum Ende des Jahres 2011. Weitere Verzögerungen sind u. a. durch Nachbeben wie auch durch Korrosionsschäden aufgrund des anfänglich zur Kühlung eingesetzten (salzhaltigen) Meerwassers vorstellbar.

5 Fukushima Dai-ni

5.1 Standort

Am Standort Fukushima Dai-ni Nuclear Power Station, der ca. 10 km südlich von Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Station liegt, befinden sich vier SWR-Anlagen der Bauart BWR 5 mit einfachem oder verbessertem Mark-II-Containment, deren Betrieb ab 1982 begann, mit einer installierten Leistung von zusammen 4.400 MWe (siehe Tab. 5.1). Der Standort liegt ca. 200 km nördlich von Tokio direkt am Meer. Die Anlagen werden von TEPCO betrieben.

Tab. 5.1 Daten zu Fukushima Dai-ni [1], [11]

Block	Jahr der Inbetriebnahme	Leistung in MWe	Typ	Hersteller
1	1982	1.100	SWR	Toshiba
2	1984	1.100	SWR	Hitachi
3	1985	1.100	SWR	Toshiba
4	1987	1.100	SWR	Hitachi



Abb. 5.1 Fukushima Dai-ni nach dem Tsunami [3]

5.2 Erdbeben und Tsunami

Der Standort Fukushima Dai-ni Nuclear Power Station war ebenfalls vom Tohoku-Erdbeben am 11.03.2011 und dem nachfolgenden Tsunami betroffen.

Die Flutwellen des Tsunami erreichten die Anlage ca. 1 Stunde nach dem Erdbeben. Die Flutwellen erreichten im Bereich der Blöcke 1 bis 4 eine Höhe von etwa 10 m über dem normalen Meeresniveau. Infolgedessen wurden die Einrichtungen an den Kühlwassereinläufen der Blöcke 1 bis 4 bis zu 3 m hoch überflutet. Im Umfeld der Maschinenhäuser und der Reaktorgebäude der Blöcke 1 und 2 sowie im südlichen Bereich des Blocks 3 kam es zu Überflutungen bis ca. 3 m.

Infolge der Flutwellen fielen 9 der 12 mit Meerwasser gekühlten Notstromdieselgeneratoren aus. Zwei Notstromdieselgeneratoren des Blocks 3 und ein Notstromdieselgenerator in Block 4 waren jedoch weiterhin funktionsfähig und blieben in Betrieb [24]. Zur Stromversorgung war darüber hinaus noch eine der vier Netzanbindungen (Tomioka Line 1) verfügbar. Mit dieser Netzanbindung war eine Stromversorgung aller vier Blöcke möglich. Es kam durch die Flutwellen auch zum Ausfall von sieben der acht Nebenkühlwassersysteme (jeder Block verfügt über zwei Nebenkühlwassersysteme). Die Nebenkühlwasserversorgung erfolgte damit nur noch im Block 3 über das einzige verfügbare Nebenkühlwassersystem (Redundanz 1).

5.3 Fukushima Dai-ni, Block 1, 2 und 4

Die Blöcke befanden sich zum Zeitpunkt des Tohoku-Erdbebens im Leistungsbetrieb. Die Auslösung der automatischen Abschaltung erfolgte am 11.03.2011 um 14:48 Uhr unmittelbar nachdem das Erdbeben registriert wurde. Alle Steuerstäbe wurden eingefahren und die Blöcke zunächst im Zustand unterkritisch heiß gehalten. Die Dampfabfuhr erfolgt über Sicherheits- und Entlastungsventile in die jeweiligen Kondensationskammern. Zur Füllstandshaltung wurde in allen drei Blöcken das dampfgetriebene RCIC-System zur Bespeisung der Reaktordruckbehälter mit Kühlmittel aus dem Kondensatvorratsbehälter verwendet. Infolge der Erdbebeneinwirkung und der Einwirkung des Tsunami fiel die Nebenkühlwasserversorgung in den drei Blöcken aus und damit war die Nachwärmeabfuhr aus den Kondensationskammern zunächst nicht mehr möglich. Dadurch stieg die Temperatur des Wasserinventars in den Kondensationskammern an. Eine Druckentlastung der Containments wurde nach TEPCO-Informationen vorbereitet. Sie wurde allerdings nicht durchgeführt.

Nachdem die Motoren für die Nebenkühlwasserpumpen repariert worden waren, konnten die Nachkühlketten der Blöcke in Betrieb genommen werden. Die Blöcke 1 und 2 erreichten am 14.03.2011 den Zustand unterkritisch-kalt, Block 4 erreichte diesen Zustand am 15.03.2011.

5.4 Fukushima Dai-ni, Block 3

Block 3 befand sich zum Zeitpunkt des Tohoku-Erdbebens im Leistungsbetrieb. Die Auslösung der automatischen Abschaltung erfolgte am 11.03.2011 um 14:48 Uhr unmittelbar nachdem das Erdbeben registriert wurde. Alle Steuerstäbe wurden eingefahren. Infolge der Überflutung durch den Tsunami kam es zur Unverfügbarkeit einer der beiden Nachkühlketten (Redundanz A). Mit der verfügbaren Nachkühlkette (Redundanz B) und deren Stromversorgung über Notstromdieselgeneratoren konnte der Block den kalten, unterkritischen Zustand am 12.03.2011 erreichen. Seitdem befindet sich der Block in einem stabilen Zustand.

5.5 INES-Einstufung der japanischen Behörde für Fukushima Dai-ni

Das Ereignis in Block 1 wurde von der Behörde am 12.03.2011 nach INES 3 eingestuft.

Das Ereignis in den Blöcken 2 und 4 wurde von der Behörde am 18.03.2011 nach INES 3 eingestuft.

6 Radiologische Situation

6.1 Radiologische Situation am Standort Fukushima Dai-ichi

Die verfügbaren Messdaten zur Ortsdosisleistung (ODL) auf dem Anlagengelände wurden durch den Betreiber ermittelt und regelmäßig veröffentlicht.

Durch den Verlust der externen Stromversorgung am 11.03.2011 waren nach Aussagen von TEPCO keine automatisierten Messungen an den vorgesehenen Messpunkten auf dem Anlagengelände möglich. Diese waren erst nach Wiederherstellung der Stromversorgung verfügbar, die am 25.03.2011 erfolgte. Als Ersatz wurden vom Betreiber mobile Messstationen verwendet, die im Verlauf des Unfallgeschehens mehrfach ihre Position wechselten. In der Folge liegen keine zeitlich vollständigen Datenreihen für alle Messstellen vor. Zur Orientierung ist in Abb. 6.1 die ungefähre Lage der verschiedenen Messpunkte zur Bestimmung der Ortsdosisleistung eingetragen.



Abb. 6.1 Überblick über die ungefähre Lage der verschiedenen Messpunkte zur Ortsdosisleistung am Standort Fukushima Dai-ichi

Am 28.05.2011 stellte TEPCO weitere, bis zu diesem Zeitpunkt unveröffentlichte Messwerte für den Zeitraum vom 11. bis 17.03.2011 zur Verfügung. Die folgenden Abbildungen (Abb. 6.2, Abb. 6.3 und Abb. 6.4) zeigen den Verlauf der Ortsdosisleistung für die 10. und 11. Kalenderwoche 2011 sowie einen Gesamtüberblick zwischen dem 11.03.2011 und Mitte Mai 2011.

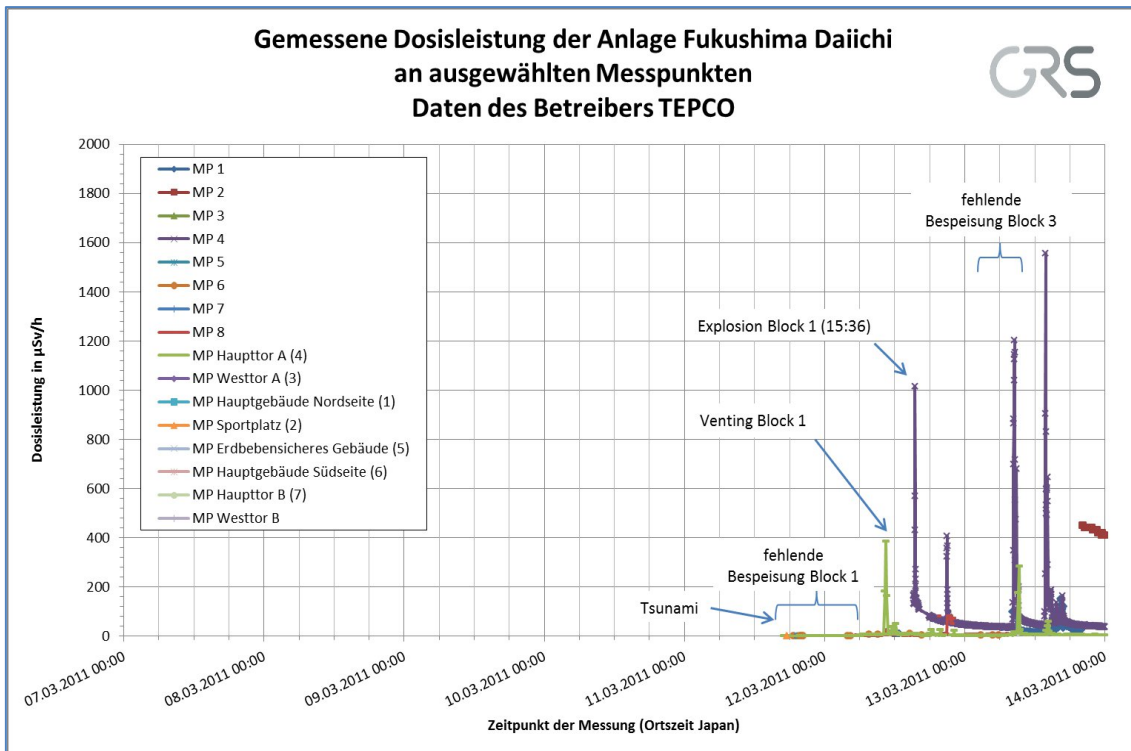


Abb. 6.2 Übersicht der Ortsdosisleistung am Standort Fukushima Dai-ichi in der 10. Kalenderwoche

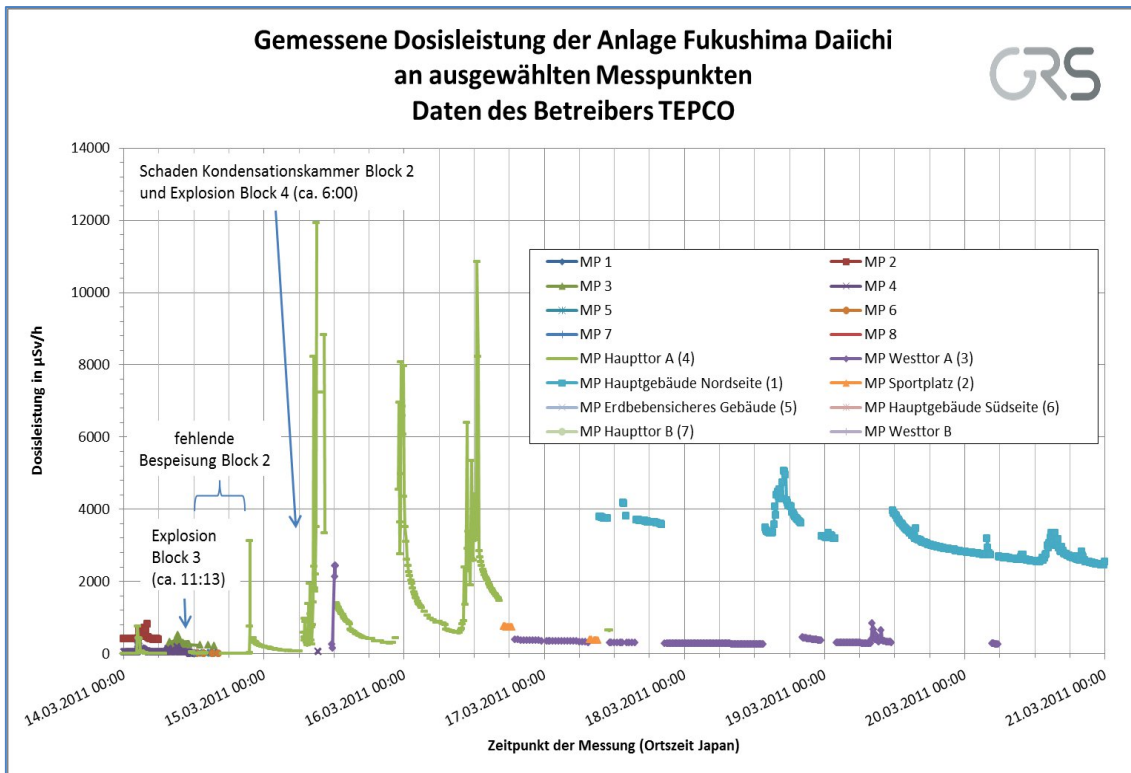


Abb. 6.3 Übersicht der Ortsdosisleistung am Standort Fukushima Dai-ichi in der 11. Kalenderwoche

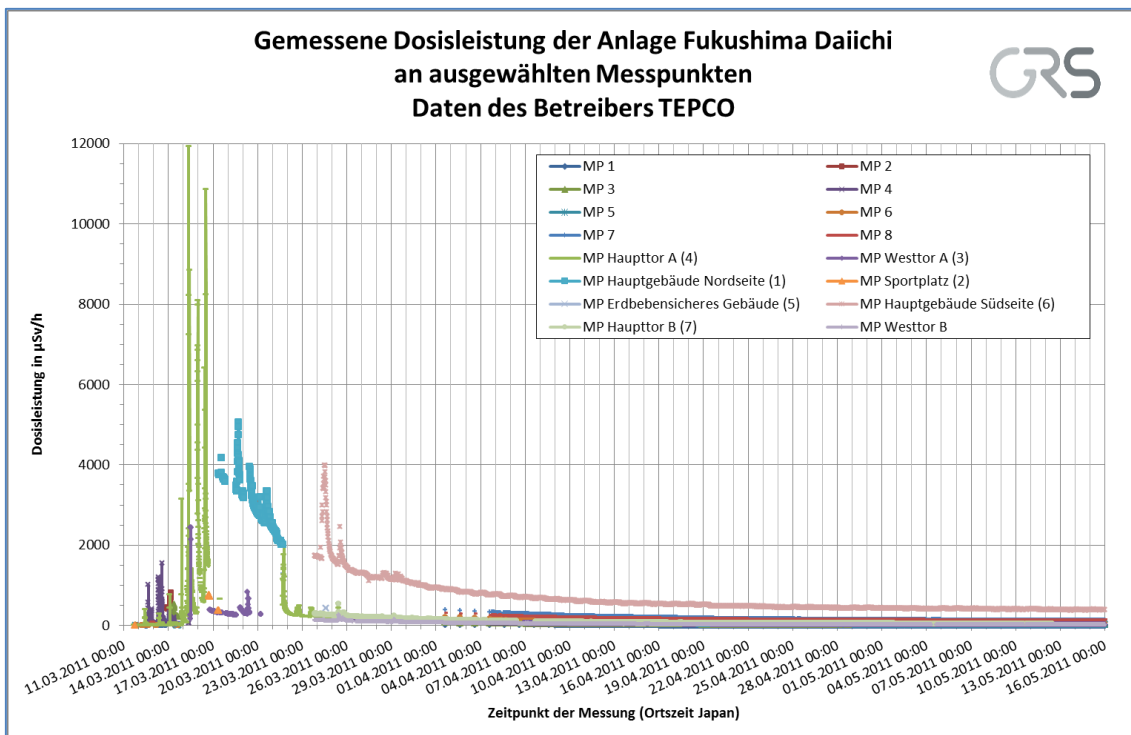


Abb. 6.4 Gesamtübersicht der Ortsdosisleistung am Standort Fukushima Dai-ichi

Am Verlauf der Ortsdosisleistung sind deutlich zwei Unfallphasen zu unterscheiden. In der ersten Phase vom 11. bis etwa 27.03.2011 sind mehrere Einzelmaxima ersichtlich, die einzelnen Ereignissen zugeordnet worden sind. Dabei wurden Spitzenwerte in der Ortsdosisleistung von bis zu 12.000 $\mu\text{Sv/h}$ ermittelt. Die darauffolgende Phase ist gekennzeichnet durch eine Stabilisierung der ODL-Verläufe, die nun hauptsächlich durch allmählich abnehmende Direktstrahlung des auf dem Boden abgelagerten Materials verursacht werden. Ende Juni lag die maximale Ortsdosisleistung der automatisch betriebenen Messstationen bei etwa 350 $\mu\text{Sv/h}$, gemessen am Messpunkt „Hauptgebäude Südseite“. Nach wie vor muss allerdings davon ausgegangen werden, dass geringe Mengen radioaktiver Stoffe mit dem verdampfenden Wasser aus den Blöcken 1 bis 3 freigesetzt werden.

In unmittelbarer Nähe und innerhalb der Blöcke 1 bis 4 wurden und werden z. T. noch deutlich höhere Ortsdosisleistungen gemessen. Die Werte lagen hier bei einigen Millisievert pro Stunde mit Einzelwerten bis zu 1.000 mSv/h . Der Betreiber veröffentlicht regelmäßig Übersichtskarten mit Messungen der Ortsdosisleistung auf dem Anlagengelände und der vorgefundenen Situation innerhalb der Reaktorblöcke. Allgemein werden die Arbeiten in der Anlage durch die Strahlungsfelder auf dem Gelände nach wie vor erschwert.

Das in Bodenproben vorgefundene Nuklidspektrum zeigt hauptsächlich Ablagerungen von Jod-131 und Cäsium-137 sowie Cäsium-134. Durch die vergleichsweise kurze Halbwertszeit des Jods-131 von 8 Tagen, wird die Ortsdosisleistung inzwischen durch den Cäsium-Anteil dominiert. Die Halbwertszeiten liegen für Cäsium-137 bei 30,2 Jahren und für Cäsium-134 bei 2,1 Jahren.

In Bodenproben, die am 21. bzw. 22.03.2011 auf dem Anlagengelände genommen wurden, sind geringe Mengen Plutonium nachgewiesen worden. Die gemessenen Plutonium-Konzentrationen lagen nur wenig über dem Aktivitätsbereich, wie er aktuell in Böden der nördlichen Hemisphäre gemessen wird. Allerdings wich das Aktivitätsverhältnis von Pu-238 zu Pu-239/240 an zwei der fünf Proben mit im Mittel etwa 1,5 deutlich von dem sich aus dem Kernwaffenfallout ergebenden Aktivitätsverhältnis (0,025) ab. Ein Zusammenhang der Messergebnisse mit einer geringfügigen Freisetzung aus den beschädigten Reaktoren ist nicht auszuschließen. Der Betreiber hat in den darauffolgenden Wochen regelmäßig Wiederholungsmessungen durchgeführt. Die einzelnen Messergebnisse liegen in der gleichen Größenordnung bzw. unterhalb der Nachweisgrenze.

In Bodenproben vom 28.03.2011 wurden zudem geringe Konzentrationen von Uran nachgewiesen, die sich laut TEPCO auf natürlichem Niveau befinden. Darüber hinaus wurden in mehreren Proben vom 18.04.2011 deutlich erhöhte Werte von Strontium-89 (bis zu 4.400 Bq/kg) und Strontium-90 (bis zu 570 Bq/kg) auf dem Anlagengelände nachgewiesen. Allerdings liegen diese weit unterhalb von radiologisch bedenklichen Wertebereichen.

6.2 Abschätzung der luftgetragenen Freisetzung

Durch den Verlust der externen Stromversorgung am 11.03.2011 fiel laut TEPCO das Ventilationssystem aus und eine Messung der Freisetzungen radioaktiver Stoffe mit den dafür vorgesehenen Systemen konnte nicht durchgeführt werden.

Am 12.04.2011 veröffentlichte die Nuclear and Industrial Safety Agency (NISA) zwei Abschätzungen des Gesamtbetrages der luftgetragenen Freisetzungen radioaktiver Stoffe vom Standort Fukushima Dai-ichi, durchgeführt von NISA und der Nuclear Safety Commission of Japan (NSC), die zeitgleich zu einer Erhöhung der INES-Einstufung auf INES 7 führte. Laut NISA entsprach die abgeschätzte Freisetzung mit $1,3 \times 10^{17}$ Bq Jod-131 und $6,1 \times 10^{15}$ Bq Cäsium-137 in etwa 10 % der durch den Unfall in Tschernobyl freigesetzten Menge radioaktiver Stoffe (Jodäquivalent).

Anfang Juni veröffentlichte die japanische Regierung einen Bericht an die Internationale Atomenergie-Organisation (IAEO), in dem die Abschätzungen der luftgetragenen Freisetzung radioaktiver Stoffe aktualisiert wurden. Das Ergebnis ist in Tab. 6.1 aufgeführt und enthält ein breites Nuklidspektrum. Insbesondere die abgeschätzten Freisetzungen bzgl. Cäsium-137 wurden im Vergleich zur vorhergehenden Abschätzung um einen Faktor zwei nach oben korrigiert.

Tab. 6.1 Vorläufige Berechnung der luftgetragenen Freisetzung radioaktiver Stoffe in der frühen Phase des Unfalls

			Unit 1	Unit 2	Unit 3	Total
Xe-133	5.2	d	3.4×10^{18}	3.5×10^{18}	4.4×10^{18}	1.1×10^{19}
Cs-134	2.1	y	7.1×10^{14}	1.6×10^{16}	8.2×10^{14}	1.8×10^{16}
Cs-137	30.0	y	5.9×10^{14}	1.4×10^{16}	7.1×10^{14}	1.5×10^{16}
Sr-89	50.5	d	8.2×10^{13}	6.8×10^{14}	1.2×10^{15}	2.0×10^{15}
Sr-90	29.1	y	6.1×10^{12}	4.8×10^{13}	8.5×10^{13}	1.4×10^{14}
Ba-140	12.7	d	1.3×10^{14}	1.1×10^{15}	1.9×10^{15}	3.2×10^{15}
Te-127m	109.0	d	2.5×10^{14}	7.7×10^{14}	6.9×10^{13}	1.1×10^{15}
Te-129m	33.6	d	7.2×10^{14}	2.4×10^{15}	2.1×10^{14}	3.3×10^{15}
Te-131m	30.0	h	9.5×10^{13}	5.4×10^{10}	1.8×10^{12}	9.7×10^{13}
Te-132	78.2	h	7.4×10^{14}	4.2×10^{11}	1.4×10^{13}	7.6×10^{14}
Ru-103	39.3	d	2.5×10^{09}	1.8×10^{09}	3.2×10^{09}	7.5×10^{09}
Ru-106	368.2	d	7.4×10^{08}	5.1×10^{08}	8.9×10^{08}	2.1×10^{09}
Zr-95	64.0	d	4.6×10^{11}	1.6×10^{13}	2.2×10^{11}	1.7×10^{13}
Ce-141	32.5	d	4.6×10^{11}	1.7×10^{13}	2.2×10^{11}	1.8×10^{13}
Ce-144	284.3	d	3.1×10^{11}	1.1×10^{13}	1.4×10^{11}	1.1×10^{13}
Np-239	2.4	d	3.7×10^{12}	7.1×10^{13}	1.4×10^{12}	7.6×10^{13}
Pu-238	87.7	y	5.8×10^{08}	1.8×10^{10}	2.5×10^{08}	1.9×10^{10}
Pu-239	24065	y	8.6×10^{07}	3.1×10^{09}	4.0×10^{07}	3.2×10^{09}
Pu-240	6537	y	8.8×10^{07}	3.0×10^{09}	4.0×10^{07}	3.2×10^{09}
Pu-241	14.4	y	3.5×10^{10}	1.2×10^{12}	1.6×10^{10}	1.2×10^{12}
Y-91	58.5	d	3.1×10^{11}	2.7×10^{12}	4.4×10^{11}	3.4×10^{12}
Pr-143	13.6	d	3.6×10^{11}	3.2×10^{12}	5.2×10^{11}	4.1×10^{12}
Nd-147	11.0	d	1.5×10^{11}	1.3×10^{12}	2.2×10^{11}	1.6×10^{12}
Cm-242	162.8	d	1.1×10^{10}	7.7×10^{10}	1.4×10^{10}	1.0×10^{11}
I-131	8.0	d	1.2×10^{16}	1.4×10^{17}	7.0×10^{15}	1.6×10^{17}
I-132	2.3	h	4.5×10^{14}	9.6×10^{11}	1.8×10^{13}	4.7×10^{14}
I-133	20.8	h	6.5×10^{14}	1.4×10^{12}	2.6×10^{13}	6.8×10^{14}
I-135	6.6	h	6.1×10^{14}	1.3×10^{12}	2.4×10^{13}	6.3×10^{14}
Sb-127	3.9	d	1.7×10^{15}	4.2×10^{15}	4.5×10^{14}	6.4×10^{15}
Sb-129	4.3	h	1.6×10^{14}	8.9×10^{10}	3.0×10^{12}	1.6×10^{14}
Mo-99	66.0	h	8.1×10^{07}	1.0×10^{04}	6.7×10^{06}	8.8×10^{07}

6.3 Radiologische Situation in der Umgebung

Im Zeitraum vom 11. bis 27.03.2011 herrschte an den meisten Tagen eine Luftströmung aus westlichen Richtungen vor, so dass ein großer Teil der Freisetzungen auf den offenen Pazifik geweht wurden. Insbesondere am 15.03.2011 herrschte zwischenzeitlich eine Situation mit Winden aus südöstlichen Richtungen in Verbindung mit Niederschlag vor. In diesem Zeitraum gingen größere Mengen an radioaktiven Stoffen in einem Streifen nieder, der sich vom Standort in nordwestliche Richtung in eine Entfernung von bis zu einigen Dutzend Kilometern erstreckt. Die Kontamination der Gebiete wird durch eine große Zahl von Messungen belegt.

Außerhalb des 30-km Ringes ist hiervon insbesondere Iitate, eine Dorfgemeinde in der Präfektur Fukushima, betroffen. Als höchster ODL-Wert wurde an einem Messpunkt in 30 km Entfernung in nordöstlicher Richtung am 17.03.2011 eine ODL von 180 $\mu\text{Sv/h}$ gemessen. Zudem liegt in einigen Gebieten bis etwa 30 km Entfernung der Pegel der Bodenstrahlung so hoch, dass bei Daueraufenthalt im Freien Dosen von mehr als 100 mSv im ersten Jahr nicht ausgeschlossen werden können. Hier wurde an einem Messpunkt in etwa 20 km Entfernung ein Maximalwert von 330 $\mu\text{Sv/h}$ am 15.03.2011 gemessen.

In der weiteren Umgebung wurden mit einer vorübergehenden Drehung des Windes auf nördliche Richtung vor allem in der Provinz Ibaraki südlich von Fukushima ebenfalls radioaktive Partikel abgelagert. Die Messwerte der japanischen nationalen Umgebungs-Radioaktivitätsüberwachung (SPEEDI), wie sie für ausgewählte Präfekturen in Abb. 6.5 für den Zeitraum vom 17.03.2011 bis etwa Mitte April dargestellt sind, zeigen für die Präfektur Ibaraki am 21.03.2011 einen kurzzeitigen Anstieg der Bodenstrahlung auf bis zu 3 $\mu\text{Sv/h}$. Weitere, seitens der Präfektur Ibaraki veröffentlichte Messwerte im Nordosten der Präfektur (etwa 70 km südlich von Fukushima Dai-ichi) zeigen für den 15.03.2011 einen Spitzenwert von 5,5 $\mu\text{Sv/h}$ und 15,8 $\mu\text{Sv/h}$ für den 16.03.2011. Im weiteren Verlauf gingen die Strahlungswerte in der Präfektur kontinuierlich zurück; Ende Juni lagen die veröffentlichten Maximalwerte bei etwa 0,2 $\mu\text{Sv/h}$.

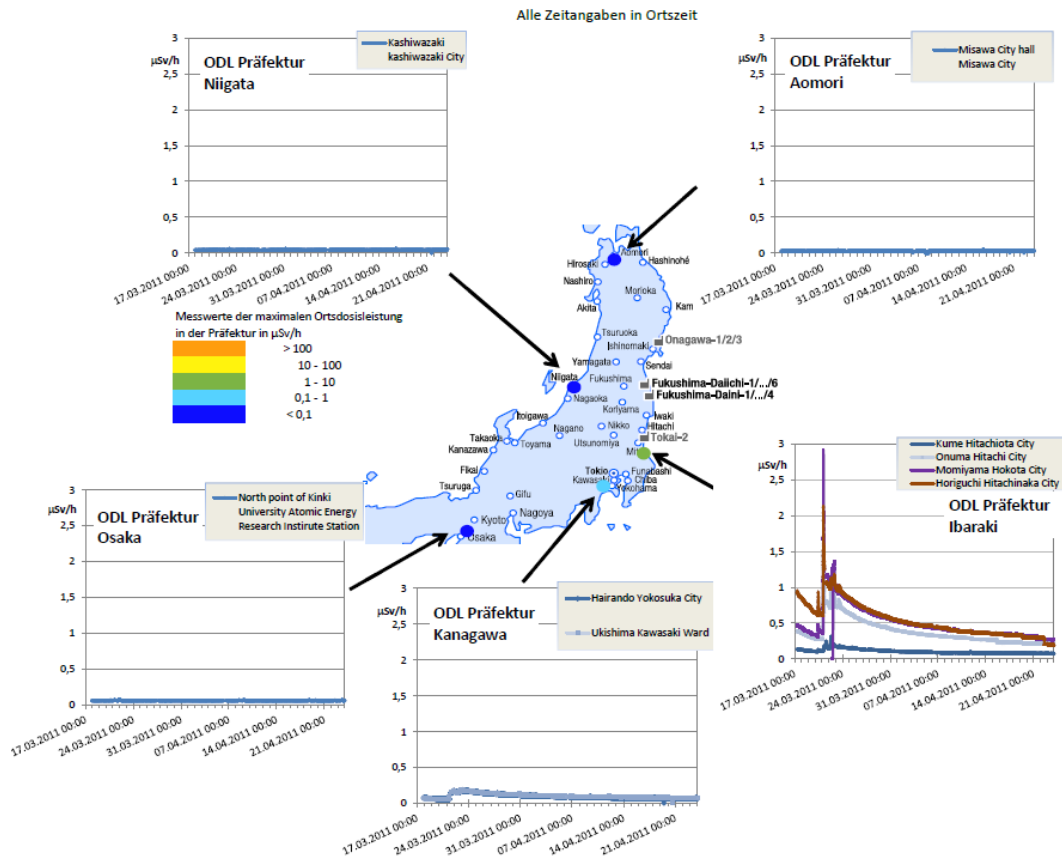


Abb. 6.5 Übersicht der Ortsdosisleistung in ausgewählten Präfekturen

Analysen von Bodenproben zeigen hauptsächlich Ablagerungen von Jod-131 und Cäsium-134 sowie Cäsium-137, wobei die Ortsdosisleistung aufgrund der vergleichsweise kurzen Halbwertszeit von Jod-131 inzwischen durch den Cäsium-Anteil dominiert wird.

In Bodenproben, die am 21. und 22.03.2011 vom Ministry of Education, Culture, Sports Science and Technology (MEXT) an drei Stellen genommen wurden, die erhöhte Ortsdosisleistungen um etwa $50 \mu\text{Sv/h}$ aufwiesen, lagen die Konzentrationen der Plutoniumisotope Pu-238, Pu-239 und Pu-240 unterhalb der Nachweisgrenze. Das vorgefundene Uran-Verhältnis (U-235/U-238) entsprach laut MEXT dem natürlichen Vorkommen.

Darüber hinaus wurden in drei Bodenproben vom 16.03.2011 aus der Dorfgemeinde Iitate in der Präfektur Fukushima die Nuklide Strontium-89 (bis zu 260 Bq/kg) und Strontium-90 (bis zu 32 Bq/kg) nachgewiesen, wobei die vorgefundene Konzentration weit

unterhalb von radiologisch bedenklichen Wertebereichen liegt. Gleiches gilt für Pflanzenproben, die am 19.03.2011 in vier weiteren Dörfern genommen wurden.

6.4 Kontamination von Meerwasser

Zur Ermittlung der Kontamination von Meerwasser führen sowohl TEPCO als auch MEXT seit etwa 21.03.2011 regelmäßig nuklidspezifische Messungen der Aktivitätskonzentration von Jod und Cäsium in der Umgebung der Anlagen Fukushima Dai-ichi und Dai-ni durch. Zur Übersicht sind die Orte der einzelnen Messpunkte in Abb. 6.6 graphisch dargestellt.

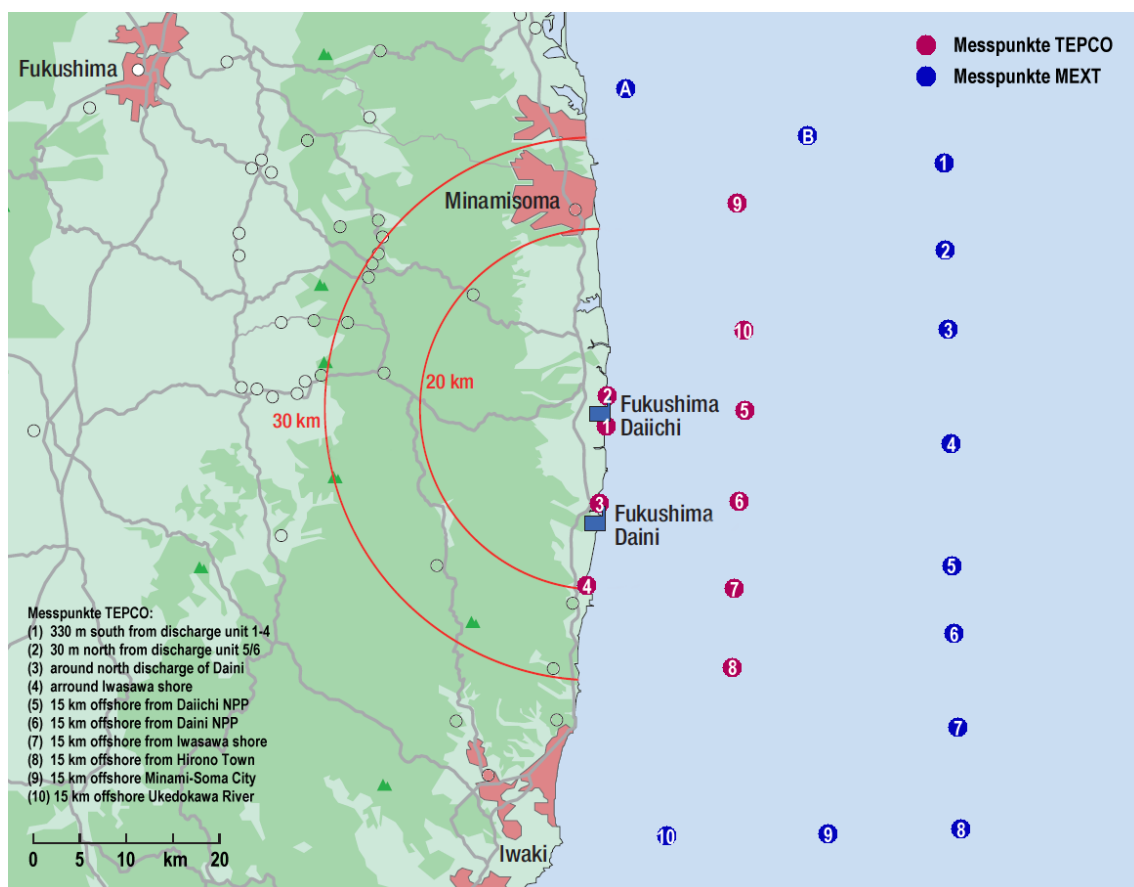


Abb. 6.6 Orte der Messpunkte zur Messung der Kontamination von Meerwasser

Ein Großteil des von außen zur Kühlung der Reaktoren und Brennelement-Lagerbecken eingebrachten Wassers sammelte sich in den Reaktorgebäuden und Maschinenhäusern und zeigte lt. TEPCO Ortsdosisleistungen von bis zu 1000 mSv/h an der Oberfläche. Insgesamt befinden sich in der Anlage geschätzte 100.000 Tonnen hochkontaminiertes Wassers aus der Kühlung der Reaktoren und der Brennelement-

Lagerbecken. Ein Teil des hochkontaminierten Wassers konnte unkontrolliert in den Pazifik austreten. In der Folge stiegen die Konzentrationen von radioaktiven Jod- und Cäsiumisotopen im Meerwasser stark an.

Nach Abschätzungen von TEPCO traten in der Zeit zwischen dem 01. und 06.04.2011 aus Block 2 ca. 500 Tonnen Wasser mit einer Aktivität von insgesamt ca. 5×10^{15} Bq unkontrolliert in den Pazifik aus.

Zudem leitete TEPCO im Zeitraum vom 04. bis 10.04.2011 etwa 10.000 Tonnen kontaminiertes Wasser mit einer Gesamtaktivität von etwa $1,5 \times 10^{11}$ Bq kontrolliert in den Pazifik ein. Das Wasser stammte hauptsächlich aus der zentralen Einrichtung zur Behandlung radioaktiver Abfälle. Laut TEPCO wurde diese Notfallmaßnahme durchgeführt, um Platz für das hochkontaminierte Wasser aus dem Turbinengebäude des Blocks 2 zu schaffen.

Darüber hinaus traten nach Abschätzungen von TEPCO zwischen dem 10.05.2011 und 11.05.2011 etwa 250 Tonnen Wasser mit einer Gesamtaktivität von 2×10^{13} Bq aus dem Maschinenhaus von Block 3 unkontrolliert in den Pazifik aus.

Zur Verhinderung weiterer Kontaminationen des Meerwassers führte TEPCO in Folge eine Reihe von Maßnahmen durch, darunter das Verschließen möglicher Undichtigkeiten. Abschätzungen zur Gesamtmenge der in den Pazifik abgeleiteten Aktivität liegen nicht vor.

Die gemessenen Konzentrationen der Nuklide Jod-131 und Cäsium-137 an den Messpunkten entlang der Küste sind in Abb. 6.7 und Abb. 6.8 dargestellt. Der Zeitraum bis etwa zum 08.04.2011 ist geprägt von einem Anstieg der Konzentrationen radioaktiver Jod- und Cäsiumisotope. Nachdem am 06.04.2011 die massiven Einträge kontaminierten Wassers provisorisch gestoppt werden konnten, gingen bis Anfang Mai die Belastungen des Meerwassers mit radioaktiven Stoffen allmählich zurück. Dieser Trend setzt sich bis zum heutigen Stand fort. Ende Juni lagen die Messwerte an allen Messstationen unterhalb der japanischen Grenzwerte zur Aktivitätskonzentration im Wasser; an den Messpunkten abseits der Küste lagen sie insbesondere unterhalb der Nachweisgrenze.

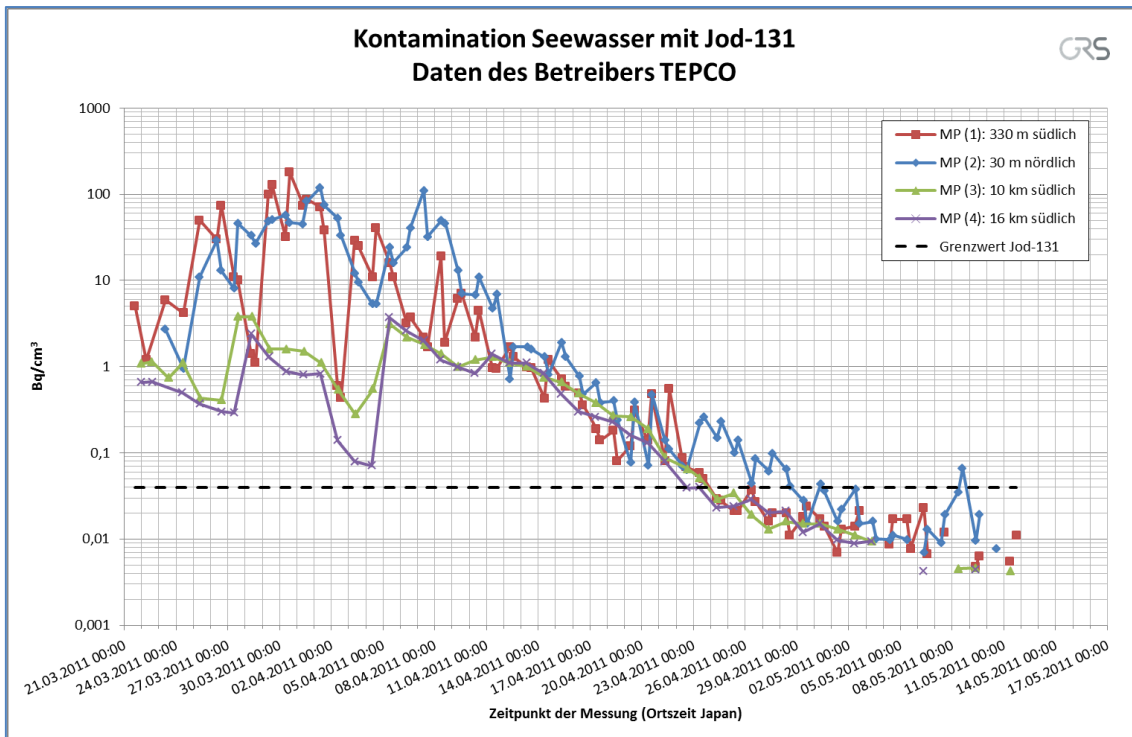


Abb. 6.7 Messdaten zur Kontamination von Seewasser mit Jod-131

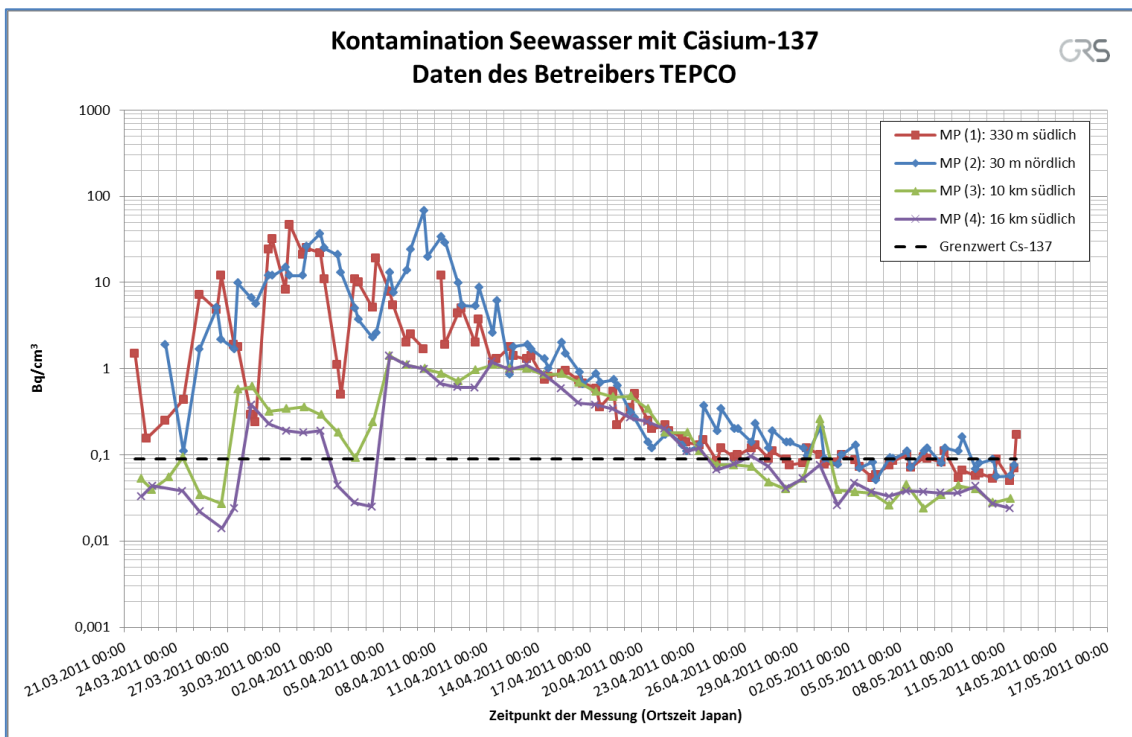


Abb. 6.8 Messdaten zur Kontamination von Seewasser mit Cäsium-137

6.5 Maßnahmen zum Schutz der Bevölkerung

6.5.1 Umgebung des Standorts Fukushima Dai-ichi

Am 11.03.2011 wurde um 20:50 Uhr seitens des Gouverneurs der Präfektur Fukushima eine Evakuierung der Bevölkerung in einem 2 km-Radius um Block 1 veranlasst. Um 21:23 Uhr wurde die Evakuierungszone auf einen Radius von 3 km durch den Premierminister erweitert und die Bevölkerung im Radius von 10 km aufgefordert, im Haus zu verbleiben. Der Evakuierungsradius wurde am 12.03.2011 um 5:44 Uhr auf 10 km und um 18:25 Uhr auf 20 km ausgedehnt.

Am 15.03.2011 11:00 Uhr wurde um die 20 km-Evakuierungszone der Aufenthalt in Gebäuden bis zu einem Radius von 30 km empfohlen. Zudem wurde eine Flugverbotszone im Radius von 30 km um die Anlage eingerichtet. Die japanische Küstenwache hatte darüber hinaus nach Angaben der IAEO für die küstennahen Gewässer Räumungsanordnungen in einem Umkreis von 10 km ausgesprochen.

Als weitere Maßnahme wurden die lokalen Behörden am 16.03.2011 angewiesen, Einwohner bei der Evakuierung aus der 20 km-Zone aufzufordern, Jodpräparate mit stabilem Jod einzunehmen, um die Aufnahme von radioaktivem Jod zu unterbinden. Tatsächlich wurden von den Einwohnern keine Jodpräparate eingenommen, da die Evakuierung zum Zeitpunkt der Anweisung bereits abgeschlossen war. Die Maßnahme wurde trotzdem ausgesprochen, da zu diesem Zeitpunkt nicht klar war, ob sich noch Einwohner in der 20 km-Zone befanden.

Am 17.03.2011 wurden vorläufige Kontaminations-Grenzwerte zur Einschränkung des Verzehrs von Nahrungsmitteln und Getränken veröffentlicht. Zudem wurden am 21.03.2011 Maßnahmen ergriffen, um die Verbreitung und den Verkauf von Nahrungsmitteln zu unterbinden. Am 25.03.2011 wurde den in der 30 km-Zone verbliebenen Personen empfohlen, ein Verlassen der Zone in Erwägung zu ziehen.

Die japanische Regierung beschloss am 10.04.2011, die 20 km-Evakuierungszone zu erweitern, so dass auch Gebiete erfasst wurden, in denen eine jährliche Strahlenexposition von über 20 mSv erwartet wird (Abb. 6.9). In der sogenannten „Planned Evacuation Area“, die die Städte Kutsurao, Namie, Iitate und Teile von Kawamata und Minami Souma einschloss, wurden die Einwohner aufgefordert, das Gebiet bis Ende Mai zu

verlassen. Die „Planned Evacuation Area“ schließt sich im Nordwesten an die bestehende Evakuierungszone an.

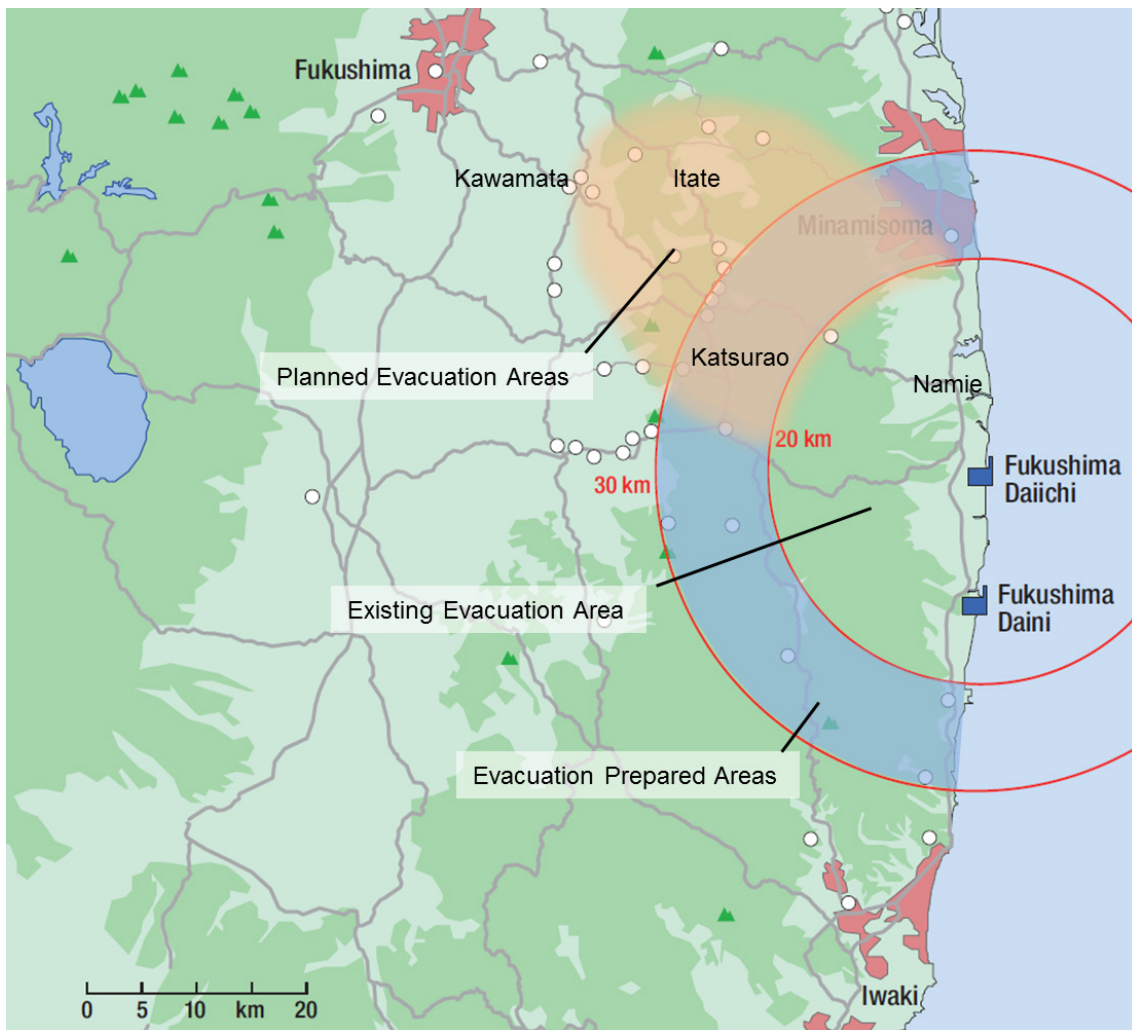


Abb. 6.9 Evakuierungszonen um Fukushima Dai-ichi

In der „Evacuation Prepared Area“, die den 30 km-Umkreis um das KKW Fukushima Dai-ichi mit Ausnahme der „Planned Evacuation Area“ umfasst, gelten Einschränkungen bezüglich der Lebensgewohnheiten. Schwangere, Kinder und Kranke sollten sich nicht in der Zone aufhalten. Kindergärten und Schulen wurden geschlossen. Ein freiwilliges Verlassen dieser Zone wurde empfohlen.

Am 22.04.2011 wurde im 20 – 30 km-Ring die Empfehlung zum „Aufenthalt in Gebäuden“ aufgehoben. Gleichzeitig ist die 20 km-Zone seitens der japanischen Regierung zum Sperrgebiet erklärt worden. Der betroffenen Bevölkerung wurde die Möglichkeit eingeräumt, das Sperrgebiet für kurze Zeit zu betreten. Die Zone innerhalb des 3 km-Radius war von dieser Möglichkeit ausgenommen.

Darüber hinaus wurden lageabhängig Maßnahmen zur Unterbindung einer Strahlenexposition durch den Verzehr kontaminierter Lebensmittel ergriffen.

6.5.2 Umgebung des Standorts Fukushima Dai-ni

Am 12.03.2011 um 07:45 Uhr wurden Evakuierungsmaßnahmen in einem 3 km-Radius veranlasst und die Bevölkerung in der Zone zwischen 3 und 10 km Radius aufgefordert, im Haus zu verbleiben. Aufgrund der erfolgten Explosion in Block 1 der Anlage Fukushima Dai-ichi wurde um 17:39 Uhr der Evakuierungsradius auf 10 km um die Anlage Fukushima Dai-ni erweitert. Die Evakuierungszone wurde am 21.04.2011 auf einen 8 km-Radius verringert.

Die japanische Küstenwache hatte nach Angaben der IAEO für die küstennahen Gewässer am 15.03.2011 Räumungsanordnungen in einem Umkreis von 3 km um Dai-ni ausgesprochen.

7 Lessons Learned nach NISA und IAEA Fact-Finding Mission

Die im Folgenden dargestellten Schlussfolgerungen, Erkenntnisse und Konsequenzen basieren auf dem zum Zeitpunkt der Erstellung vorliegenden Informationsstand und sind daher als vorläufig zu betrachten. Eine abschließende Zusammenstellung der „Lessons Learned“ kann erst erfolgen, wenn eine vollständige Bewertung des Ereignisablaufs unter Einbeziehung aller Faktoren erfolgt ist. Hierfür sind weitere Informationen hinsichtlich des genauen Unfallablaufs, der Personalhandlungen auf der Anlage sowie der durchgeführten Notfallmaßnahmen erforderlich.

Im Folgenden werden die Konsequenzen aus dem Unfall, basierend auf dem im Juni 2011 veröffentlichten Bericht der japanischen Regierung an die Ministerkonferenz der IAEA, sowie dem im Rahmen dieser Ministerkonferenz vom 20.06.2011 bis zum 24.06.2011 veröffentlichten Mission-Reports der IAEA dargestellt.

7.1 Report of Japanese Government to the IAEA Ministerial Conference on Nuclear Safety – The Accident at TEPCO's Fukushima Nuclear Power Stations

Basierend auf den zum jetzigen Zeitpunkt vorliegenden Informationen ergeben sich für NISA folgende Erkenntnisse aus den Ereignissen nach dem Erdbeben vom 11.03.2011:

- Bei der Auslegung der Anlage muss das gesamte Spektrum möglicher externer Einwirkungen auf die Anlage erfasst werden. Hierfür sind sämtliche verfügbaren Quellen und Methoden heranzuziehen, was in Hinblick auf die Gefährdung durch Tsunamis für die Anlage Fukushima Dai-ichi nicht in ausreichendem Maße geschehen ist. Der für die Erfassung des Spektrums gewählte Betrachtungszeitraum ist hinreichend lang zu wählen.
- Eine der wesentlichen Ursachen für die Schwere des Unfalls war der nahezu vollständige, langfristige Ausfall der Stromversorgung. Zur Vermeidung eines solchen Ausfalls soll sowohl die Erdbebensicherheit der externen Stromversorgung gestärkt werden, die Batterielebensdauer erhöht werden als auch eine hinreichend diversifizierte Notstromversorgung sichergestellt sein.

- Die Schnittstellen für die Einbindung von zusätzlichen Notstromquellen müssen so ausgestaltet sein, dass sie auch nach erheblichen Einwirkungen von außen noch zugänglich und funktionsfähig sind.
- Auch nach einem Ausfall der Stromversorgung muss die Nachwärmeabfuhr des gesamten Brennstoffinventars – sowohl im RDB wie auch im Brennelementlagerbecken – durch robuste Notfallmaßnahmen sichergestellt sein. Auch die hierfür notwendigen Schnittstellen sind zugänglich und hinreichend robust auszuführen.
- Die Beeinträchtigung sicherheitstechnisch wichtiger Einrichtungen durch sekundäre Einwirkungen wie Wasserstoffexplosionen oder Überflutungen müssen im Vorfeld ausgeschlossen werden.
- Es ist sicherzustellen, dass für die Bewertung der Anlagensituation wichtige Instrumentierung auch unter Notfallbedingungen funktioniert und abgelesen werden kann.
- Für Armaturen, die notwendig sind zur Durchführung von Notfallprozeduren, wie z. B. einer Druckentlastung des Containments oder Reaktordruckbehälters, ist sicherzustellen, dass sie auch während eines Störfalls von der Warte bzw. Notstandswarte zu bedienen sind.
- Bei Mehrblockanlagen sind die Effekte von Ereignissen in einem Block auf die Nachbarblöcke zu untersuchen. Dies gilt sowohl für die technische Verfügbarkeit von Sicherheits- und Notfallsystemen wie auch für die Arbeitsbedingungen auf der Anlage.
- Bei der Planung von Notfallmaßnahmen sind sowohl Schäden am Kraftwerk, der umgebenden Infrastruktur, wie auch radiologische Belastungen hinsichtlich aller Konsequenzen für Arbeiten auf der Anlage, den Transport von Material und Fachkräften sowie für die Kommunikation zu berücksichtigen.
- In Zukunft sind daher Notfallmaßnahmen nicht als freiwillige Vorsorge der Betreiber, sondern als integraler, von den Aufsichtsbehörden überwachter Bestandteil des Sicherheitskonzeptes zu betrachten.
- Die Zusammenarbeit und Kommunikation aller an Katastrophenschutz- bzw. Notfallmaßnahmen beteiligten Institutionen (Kraftwerkspersonal, Feuerwehr, Polizei, Armee, unterschiedliche Behörden etc.) sind für den Erfolg derartiger Maßnahmen von entscheidender Bedeutung und müssen daher im Vorfeld umfassend geplant werden. Im vorliegenden Fall erwies sich die Kompetenzverteilung der beteiligten

Behörden als unzureichend, weshalb die behördliche Kompetenzverteilung daher im Vorfeld klar zu regeln ist.

- Sämtliche vorbereiteten technischen wie organisatorischen Maßnahmen sollten regelmäßig im Rahmen von Übungen trainiert und auf ihre Wirksamkeit überprüft werden. Hierbei ist auch zu unterstellen, dass staatliche Kräfte aufgrund übergreifender Ereignisse anderweitig gebunden sein können.
- Es muss sichergestellt werden, dass neben dem zur Bewältigung eines auslegungsüberschreitenden Ereignisses nötigen Material auch entsprechende Fachkräfte bei allen beteiligten Institutionen vorhanden sind.
- Die japanische Regierung sah sich aufgrund fehlender Strukturen nicht in der Lage, auf ausländische Hilfsangebote angemessen zu reagieren. Es sollten daher internationale Kooperationen auf dem Gebiet des nuklearen Notfallmanagements angestrebt werden, die, sofern sie im Vorfeld des Ereignisses geplant und erprobt wurden, eine sinnvoller Ergänzung der nationalen Maßnahmen sein können. Sie können diese aber aufgrund des im Katastrophenfall i. d. R. sehr engen Zeitfensters nicht ersetzen.
- Bei der Unfallanalyse von NISA ergaben sich mehrere Schwachstellen bei der im Rahmen der periodischen Sicherheitsüberprüfung erstellten PSAs der Blöcke am Standort Fukushima. Weder in der normalen noch in der Erdbeben-PSA wurden alle Auswirkungen eines Tsunami auf die Anlage berücksichtigt. Des Weiteren wurde kein Langzeit-Station-Blackout unterstellt, da die Wiederherstellung der externen Stromversorgung, eine Blockstützung oder eine hohe Verfügbarkeit der Dieselgeneratoren angenommen wurde.

7.2 IAEA International Fact-Finding Expert Mission of the Fukushima Dai-ichi NPP Accident following the Great East Japan Earthquake and Tsunami

Vom 24.05.2011 bis zum 02.06.2011 besuchte ein aus 12 Experten der IAEA bestehendes Team die Anlagen in Fukushima, Tokai sowie die mit der Bewältigung und Auswertung der Ereignisse beschäftigten japanischen Organisationen. Im Rahmen der vom 20.06.2011 bis zum 24.06.2011 stattfindenden Ministerkonferenz der IAEA wurde der Abschlussbericht dieser Fact-Finding-Mission (Weightman-Report) vorgestellt, der eine Reihe von Empfehlungen zur zukünftigen Verbesserung der Sicherheit kerntechnischer Anlagen enthält.

- Zukünftig sollen auch seltene Ereignisse bzw. die Überlagerung mehrerer Ereignisse bei Sicherheitsbewertungen berücksichtigt werden. Die Bewertung des möglichen Ereignisspektrums soll periodisch wiederholt werden.
- Gemeinsame Ausfälle (durch externe Einwirkungen) sollen auch für Mehrblockanlagen bzw. für gleichzeitige Ereignisse in mehreren Anlagen berücksichtigt werden.
- Zur Aufrechterhaltung der vitalen Anlagenfunktionen Strom und Kühlung sollten robuste und einfache alternative Aggregate vorgehalten werden. Diese Aggregate sind an sicheren Orten zu deponieren, ihr Transport und ihre Benutzung ist regelmäßig zu üben.
- Es sind hinreichend widerstandsfähige Gebäude (Emergency Response Centres) an den Kraftwerksstandorten vorzubereiten, die als zentrale Steuerungs- und Operationsbasis im Krisenfall dienen können.
- Notfallmaßnahmen sollten die Auswirkungen von eingeschränkter Instrumentenverfügbarkeit, fehlendem Licht, Strom, oder den Einfluss hoher Dosisleistungen berücksichtigen.
- Die Verfügbarkeit von hinreichend qualifiziertem Einsatzpersonal zur Bewältigung von Unfällen in kerntechnischen Anlagen ist sicherzustellen, auch wenn durch externe Ereignisse mehrere Anlagen gleichzeitig betroffen sind.
- Geeignete Systeme und Prozeduren zur Verhinderung von Wasserstoffexplosionen sind zu implementieren.
- Das Risiko des Ausfalls von Sicherheitseinrichtungen durch gemeinsame Ursache soll durch konsequente Anwendung der Konzepte Diversität, Redundanz und räumliche Trennung minimiert werden.
- Die Verfügbarkeit von Daten über den Anlagenzustand muss auch in Notfallsituationen gewährleistet sein.
- Strahlenschutzmaßnahmen für Arbeiten auf der Anlage im Katastrophenfall sollten vorbereitet und geübt werden.

8 Offene Punkte

Auch einige Monate nach dem Unfall im Kernkraftwerk Fukushima Dai-ichi liegen der GRS nur unvollständig Informationen zum Unfallhergang insbesondere zu den im Einzelnen ausgefallenen Systemen oder Funktionen, durchgeführten Handlungen und Auslegungsbasis des Kernkraftwerks und einzelner Systeme vor. Trotzdem lässt sich aus den vorliegenden Informationen ein Bild des prinzipiellen Unfallherganges zeichnen, das für die betroffenen Blöcke 1 – 3 sehr viele Gemeinsamkeiten zeigt. Dies wurde in den Kapiteln 3 bis 6 wiedergegeben. Belastbare Aussagen zum genauen Kernschadensumfang und dem Zustand von RDB und Containment können allerdings nicht getroffen werden.

Um Erkenntnisse zur Erhöhung des Sicherheitsniveaus der deutschen Kernkraftwerke ableiten zu können, sind noch weitere umfangreiche Auswertungen sowie begleitende Nachrechnungen und Forschungsarbeiten notwendig. Punkte, die weiterhin verfolgt und analysiert werden, sind im Folgenden aufgeführt.

8.1 Wasserstoffexplosion auf dem Beckenflur von Block 4

Am 15.03.2011 kam es um 06:14 Uhr auf dem Beckenflur von Block 4 zu einer Explosion. Die GRS geht zur Zeit davon aus, dass die Ursache der Explosion, wie auch bei den Blöcken 1 und 3, die Detonation eines Wasserstoff-Luft-Gemischs war, da keinerlei Hinweise auf das Vorhandensein hinreichend großer Mengen anderer explosiver Gase vorliegen.

Als Quelle des Wasserstoffs wurde zunächst eine Zirkon-Wasser-Reaktion der Brennelemente in Block 4 vermutet. In Anbetracht der aktuell vorliegenden Daten ist diese Annahme jedoch unwahrscheinlich, da eine Zirkon-Wasser-Reaktion Beschädigungen an den betroffenen Brennelementen voraussetzt, was wiederum eine starke Kontamination des Wassers im Brennelementlagerbecken zur Folge gehabt hätten. Die Messdaten zeigten jedoch nur eine leichte Kontamination des Kühlwassers im Brennelementlagerbecken von Block 4 [26], welche durch einen Eintrag von Nukliden aus den havarierten Blöcken erklärbar ist. Die aus dem Brennelementlagerbecken vorliegenden Bilder und Videos geben ebenfalls keine Hinweise auf Schäden durch einen Zirkonbrand.

Als weitere Wasserstoffquellen in Block 4 kommt Radiolyse im Wasser des Brennelementlagerbeckens in Betracht. Auch wenn weitere Untersuchungen zu diesen Thema nötig sind, ist die GRS nach ersten Abschätzungen der Ansicht, dass aufgrund der dabei erzeugten, vergleichsweise geringen Wasserstoffmengen einerseits und des großen Luftvolumens im Bereich des Beckenflurs andererseits nur durch Radiolyse innerhalb des gegebenen Zeitraums kein zündfähiges Gemisch entstehen konnte.

Wasserstoff könnte auch von außen in das Reaktorgebäude von Block 4 eingetragen worden sein. Als möglicher Weg hierfür kommt das Notfall-Abgasfiltersystem in Betracht. Dieses System besteht im Wesentlichen aus einer Reihe von Filtern in den zum Venting verwendeten Leitungen und bindet dann in den Abgaskamin ein. Sowohl Block 3 als auch Block 4 verfügen über ein derartiges System. Die Systeme beider Blöcke binden in denselben Abgaskamin ein, so dass eine direkte Verbindung zwischen beiden Blöcken besteht. Von TEPCO veröffentlichte Daten zeigen [27], dass die Ortsdosisleistung an den Filtern des Notfall-Abgasfiltersystems in Block 4 vom Kamin in Richtung Reaktor geringer wird. Dies ist ein deutlicher Hinweis auf eine Durchströmung des Systems mit einem aktivitätsführenden Medium entgegen der vorgesehenen Richtung. Ein Eintrag von Wasserstoff aus Block 3 über diesen Weg in den Block 4 erscheint somit plausibel.

Sofern weitere Untersuchungen den oben beschriebenen Unfallablauf bestätigen, stellt die mögliche Übertragung von explosiven Gasen ein Beispiel für eine blockübergreifende Einwirkung dar. Weitergehende Untersuchungen zu blockübergreifenden Einwirkungen und der möglichen Übertragbarkeit auf deutsche Anlagen sind Gegenstand eines Forschungsvorhabens der GRS.

8.2 Rekritikalität

Aus den vorliegenden Unterlagen geht hervor, dass die durch das Erdbeben ausgelöste Schnellabschaltung bei allen Blöcken auslegungsgemäß funktionierte und sämtliche Steuerelemente in die Kerne eingefahren wurden. Da es sich bei allen fraglichen Anlagen um Siedewasserreaktoren handelt, kann – solange sich die Steuerelemente im Kern befinden – eine Rekritikalität unabhängig von allen sonstigen Bedingungen wie Brennstoff bzw. Kühlmitteltemperatur oder Xenongehalt sicher ausgeschlossen werden, solange die Geometrie des Gesamtkerns erhalten bleibt.

Da die Schmelztemperatur des Strukturmaterials der Steuerelemente unter der des Brennstoffs liegt, sind theoretisch Szenarien denkbar, bei denen es in einem trocken-gefallenen bzw. dampfgefüllten Kern zu einem Abschmelzen der Steuerelemente kommt, während gleichzeitig die Geometrie des Brennstoffes zumindest kurzfristig erhalten bliebe. Würde in dieser Phase der RDB wieder mit Wasser bespeist, könnte es aufgrund des nun wieder zur Verfügung stehenden Moderators zu einer Rekritikalität kommen.

Belastbare Hinweise darauf, dass sich in irgendeinem der Blöcke in Fukushima ein solches Szenario ereignet haben könnte liegen der GRS derzeit nicht vor. In einer Veröffentlichung der NISA vom 26.03.2011 [28] wird das Vorhandensein von kurzlebigen Nukliden (Chlor-38) erwähnt, was als Indiz für eine mögliche, kurzfristige Rekritikalität gewertet werden könnte. Diese Messung wurde von TEPCO am 20.04.2010 [29] unter Verweis auf ein falsches Messverfahren redigiert. Der neuen Messung bzw. Auswertung zufolge lag der Cl-38-Gehalt in der Probe unter der Messgrenze. Weitere Veröffentlichungen [30] in der Fachliteratur sind Gegenstand laufender Diskussionen.

Die genaue Klärung der hinsichtlich einer möglichen Rekritikalität aufgeworfenen Fragen und der möglichen Übertragbarkeit auf deutsche Anlagen sind Gegenstand eines Forschungsvorhabens der GRS.

8.3 Explosion in Block 2

Am 15.03.2011 kam es gegen 06:00 Uhr zu einer Explosion im unteren Bereich des Reaktorgebäudes von Block 2. Der genaue Ort der Explosion konnte bis jetzt noch nicht ermittelt werden. Da eine Begehung des Erdgeschosses im Reaktorgebäude am 19.05.2011 aber keine Hinweise darauf ergab, dass es dort zu einer Explosion gekommen war, ist es wahrscheinlich, dass sich die Explosion unterhalb des Erdgeschosses ereignete.

TEPCO und NISA geben übereinstimmend die Zündung eines Wasserstoff-Luft-Gemischs als Ursache der Explosion an. In diesem Fall hätte der mittels Zirkon-Wasser-Reaktion entstandene Wasserstoff durch Undichtigkeiten aus dem Containment in die umgebenden, nicht mit Stickstoff inertisierten Räumlichkeiten gelangen müssen und wäre dort nach einer Durchmischung mit Luft detoniert. Eine Wasserstoffexplosion in der Druck- oder Kondensationskammer ist nach derzeitigem Kenntnisstand auszuschließen, da beide zunächst mit Stickstoff inertisiert waren und ein

Eindringen von Umgebungsluft gegen den von Wasserdampf und Wasserstoff aufgeprägten Überdruck nicht möglich ist. Ob es tatsächlich Undichtigkeiten gab, ist anhand der vorliegenden unvollständigen und in sich widersprüchlichen Daten [31] (z. B. Druckkammerdruck mehr als 3 bar über Kondensationskammerdruck, wobei beide Räume unmittelbar miteinander verbunden sind) nicht abzuschätzen. Andere Ursachen für das Explosionsgeräusch, wie z. B. eine Wasserdampfexplosion infolge von abstürzendem geschmolzenem Kerninventars in eine Wasservorlage sind nicht auszuschließen, es existieren aber keinerlei Hinweise, die auf solche Phänomene hindeuten würden.

Unmittelbar nach der Explosion zeigte die Druckmessung der Kondensationskammer einen Absolutdruck von 0 bar an. In diesem Zusammenhang geht die GRS von einem Ausfall der Messung aus. Dies entspricht einem Szenario einer angenommenen Explosion im Bereich der Kondensationskammer mit Beschädigungen an Messleitungen. Von einer größeren Leckage an der Kondensationskammer infolge der Explosion ist nicht auszugehen, da der Druck in der Druckkammer ca. 1 h nach der Explosion über 7 bar betrug und erst danach abfiel. Ein solcher Druck kann nur bei sehr kleinen Leckagen aufrechterhalten werden. Für einen Ausfall oder eine deutliche Missweisung der Druckkammerdruckmessung liegen keine Hinweise vor, ihr Verhalten ist im weiteren Verlauf des Störfalls plausibel.

Die genaue Auswertung der Ursachen und Folgen der Explosion in Block 2 einschließlich einer Bewertung der Übertragbarkeit von aufgetretenen Phänomenen auf deutsche Anlagen sind Gegenstand eines Forschungsvorhabens der GRS.

8.4 Krisenmanagement und Kommunikation

Der Ereignisablauf wirft Fragen hinsichtlich des anlageninternen und anlagenexternen Notfallmanagements auf.

Aus dem Ereignisablauf lässt sich erkennen, dass die vorhandenen Notfallpläne und Notfallorganisation für den Standort Fukushima die aufgetretene Situation nicht im ausreichenden Maße berücksichtigten. Insbesondere ist offensichtlich eine massive Zerstörung der Infrastruktur am Standort und in der Umgebung nicht berücksichtigt worden. Ebenso wurde die Bindung von nationalen Katastrophenkräften, wie sie aufgrund der Verwüstungen durch den Tsunami vorlagen, nicht betrachtet. Hierdurch wurden ex-

terne und interne Hilfsmaßnahmen für die havarierten Blöcke erschwert, da die Vorgehensweisen teilweise erst entwickelt und Material besorgt werden musste.

Hinsichtlich der Kommunikation zwischen Aufsichtsbehörde, Notfallstab und Verantwortlichen auf der Anlage kann anhand der vorliegenden Unterlagen auf erhebliche Defizite geschlossen werden, die den Informationsfluss und Verantwortlichkeiten betreffen. Es bleibt zu klären, inwiefern es aufgrund mangelnder Kommunikation zu Verzögerungen bei der Einleitung von Maßnahmen, zum Beispiel bei der Meerwasserbespeisung oder der Druckentlastung der Containments der Blöcke gekommen ist oder ob für die späte Wirksamkeit der Maßnahmen technische Probleme, wie ein zu hoher Druck im RDB für die Bespeisung oder das Fehlen von Antriebsmedium für die druckluftgetriebenen Ventile der Ventingsysteme, verantwortlich sind.

Bis heute sind den vorliegenden Quellen wesentliche Informationen nicht zu entnehmen. Es bleibt unklar, ob die Kommunikation zwischen verschiedenen Instanzen nicht funktioniert hat oder benötigte Kräfte und Material nicht zur Verfügung standen. Die Beschaffung und Installation von Notstromaggregaten zählt hierzu. Ohne weitere Information bleibt auch der Zustand der elektrischen Versorgung der Anlage während der ersten Tage unklar. Weiterhin fehlen Informationen über die Einleitung und Durchführung von Maßnahmen zur Einspeisung durch den Isolation Condenser in Block 1. Die Gründe für die Handlungsweise der Verantwortlichen sind anhand der vorliegenden Information nicht nachzuvollziehen.

Die genaue Auswertung des Krisenmanagements und der Kommunikation einschließlich einer Bewertung der Übertragbarkeit von aufgetretenen Problemen auf deutsche Anlagen bedarf umfangreicher weiterer Untersuchungen, diese sind Gegenstand eines Forschungsvorhabens der GRS.

8.5 Füllstandsmessung

Der Füllstand in einem SWR wird anhand eines Druckvergleichs zwischen zwei wassergefüllten mit dem RDB verbundenen Säulen ermittelt, der Mess- und der Vergleichssäule. Beide Säulen sind mit dem RDB-Druck beaufschlagt, so dass eine Differenzdruckmessung zwischen beiden Säulen die Differenz der geodätischen Drücke beider Säulen erfasst. Die Messsäule ist hydraulisch mit dem RDB verbunden, so dass in ihr derselbe Füllstand wie im RDB vorliegt. Die Vergleichssäule wird durch ein Kondensationsgefäß mit Überlauf immer konstant gefüllt gehalten, so dass eine Änderung

des Füllstands in der Messsäule zu einer Änderung der Druckdifferenz zwischen beiden Säulen führt. Diese Druckdifferenz bildet den Füllstand in der Messsäule und damit im RDB ab, wobei eine hohe Druckdifferenz einem kleinen Füllstand und eine geringe Druckdifferenz einem hohen Füllstand entspricht. Die Vergleichssäulen befinden sich im Containment und das Kühlmittelinventar in diesen Säulen ist während des Normalbetriebs unterkühlt.

Eine Bedingung dafür, dass das Messverfahren funktioniert, ist ein konstanter geodätischer Druck in der Vergleichssäule. Eine Erwärmung oder ein Ausdampfen der Vergleichssäule würde den geodätischen Druck dort reduzieren, die Druckdifferenz zwischen Mess- und Vergleichssäule würde kleiner werden und somit würde fälschlich ein steigender Füllstand angezeigt. Für die längerfristige Verfügbarkeit der Messung ist somit die Unterkühlung des Wassers der Messsäulen unbedingt erforderlich.

Mit dem Ausfall des Nebenkühlwassers fiel in Fukushima beim Eintreffen der Tsunami u. a. auch die Kühlung des Reaktorgebäudes aus, wodurch es dort zu einem Temperaturanstieg kam. Da der GRS weder Informationen über den exakten Einbauorte der Vergleichssäulen noch hinsichtlich der Temperaturentwicklung in den Reaktorgebäuden vorliegen, ist es nicht möglich quantitative Aussagen bezüglich des Ausmaßes oder Zeitpunktes von Abweichungen an einzelnen Messstellen zu treffen. Bei einem Druckausgleich zwischen Containment und RDB ist die Unterkühlung des Säuleninventars nicht mehr gewährleistet und ein Ausdampfen der Vergleichssäule nicht zu verhindern. Spätestens von diesem Zeitpunkt an sind die Absolutwerte der Füllstandsmessungen als nicht mehr zuverlässig zu betrachten.

Eine Rekalibrierung der Füllstandsmessung durch manuelles Befüllen der Vergleichssäule wurde bis heute (Stand 31.08.2011) nur für den RDB von Block 1 durchgeführt, mit dem Ergebnis, dass anstelle des vorher angezeigten Füllstandes von -1650 mm, was einer Kernbedeckung von ca. 50 % entsprochen hätte, der tatsächliche Füllstand unterhalb des Messbereichs lag, und die ursprüngliche Position des Kerns somit komplett freigelegt war. Da das manuelle Befüllen der Vergleichsleitungen Arbeiten von mehreren Mannstunden in unmittelbarer Nähe des Containments erfordert und somit mit einer hohen Personendosis verbunden ist, wurde zunächst auf vergleichbare Rekalibrierungen bei den Blöcken 2 und 3 verzichtet.

9 Erkenntnisse für deutsche Anlagen

Die Reaktor-Sicherheitskommission (RSK) hat eine Sicherheitsüberprüfung der deutschen Kernkraftwerke durchgeführt und dabei deren Auslegungsgrenzen überprüft und die Robustheit deutscher Kernkraftwerke gegenüber auslegungsüberschreitenden Ereignissen untersucht. Bei einem direkten Vergleich mit den Ursachen und Folgen der Unfälle in Fukushima Dai-ichi mit deutschen Kernkraftwerken wurde festgestellt, dass derartige initiierende Ereignisse für Deutschland praktisch ausgeschlossen sind und deutsche Anlagen hinsichtlich ihrer elektrischen Versorgung durchgehend robuster sind als die Blöcke am Standort Fukushima. Die Reaktor-Sicherheitskommission hat weitere Untersuchungspunkte identifiziert und wird diese weiter verfolgen.

Im Rahmen eines europäischen Stresstests werden alle Kernkraftwerke der EU hinsichtlich der Auswirkung von natürlichen und zivilisatorischen „Einwirkungen von Außen“ auf die Anlagen untersucht.

Nach Meinung der GRS haben die Ereignisse in den betroffenen japanischen Kernkraftwerken gezeigt, dass die Auslegungsgrenzen dieser japanischen Kernkraftwerke gegen Erdbeben und Tsunami überschritten wurden. Die unzureichende Bestimmung der Auslegungsgrenzen der japanischen Kernkraftwerke gegen Erdbeben hatte sich schon früher, beispielsweise im Jahr 2007 beim auslegungsüberschreitenden Erdbeben am japanischen Kernkraftwerksstandort Kashiwazaki-Kariwa, gezeigt. Eine detaillierte Aufarbeitung, welche Faktoren zu der nicht sachgerechten Ermittlung der Standortgefährdung im Hinblick auf Erdbeben und Tsunami geführt hat, ist weiterhin erforderlich. Sowohl am Standort Fukushima, als auch am Standort Kashiwazaki-Kariwa zeigten anlageninterne Strukturen und Gebäude erhebliche Reserven gegenüber den auslegungsüberschreitenden Erdbeben. Bislang liegen keine Informationen über erdbebenbedingte Schäden an Sicherheitssystemen vor.

Nach derzeitigem Kenntnisstand der GRS waren im Kernkraftwerk Fukushima Dai-ichi zahlreiche Notfallmaßnahmen vorhanden. Die Frage, welche Gründe im Einzelnen dazu führten, dass vorhandene Notfallmaßnahmen nicht erfolgreich umgesetzt werden konnten, um einen Kernschaden zu vermeiden oder die Folgen eines Kernschadens und insbesondere die Freisetzung von Radioaktivität aus dem Containment zu minimieren, ist im Rahmen dieses Berichts aufgrund der derzeit vorliegenden Informationen nicht vollständig zu beantworten. Wichtige Aspekte hierbei sind sicherlich der Aus-

fall der Gleichstromversorgung in zwei Blöcken und die erheblichen Zerstörungen am Standort und in der Umgebung durch Erdbeben und Tsunami. Insbesondere sollten aufgetretene Probleme bei der langfristigen externen Bespeisung im Rahmen von Notfallmaßnahmen untersucht werden.

Pauschal lässt sich für deutsche Kernkraftwerke feststellen, dass zum Beispiel durch die vorhandene Auslegung mit räumlich getrennten und gegen äußere Einwirkungen geschützten Notstromerzeugungsanlagen eine direkte Übertragbarkeit von in der Anlage Fukushima deutlich gewordenen Auslegungsmängeln nicht gegeben ist. Dennoch sind anlagenspezifische Untersuchungen in deutschen Kernkraftwerken durchzuführen. Im Hinblick auf die Ableitung generischer Empfehlungen wird von der GRS eine Weiterleitungsnachricht erstellt.

Ein Schwerpunkt der Empfehlungen dieser Weiterleitungsnachricht wird die Durchführbarkeit und Wirksamkeit von Notfallmaßnahmen bei einem langfristigen Station-Blackout und/bzw. einem Ausfall der Nebenkühlwasserversorgung unter naturbedingten „Einwirkungen von Außen“ darstellen.

Des Weiteren werden Empfehlungen aus dem Erdbeben von Kashiwazaki-Kariwa abgeleitet. Diese betreffen beispielsweise Empfehlungen im Hinblick auf mögliche Auswirkungen des Erdbebens auf sonstige sicherheitstechnisch wichtige Systeme, wie Brandschutzeinrichtungen.

Quellen

- [1] Convention on Nuclear Safety National Report Japan, September 2010
- [2] Report of Japanese Government to the IAEA Ministerial Conference on Nuclear Safety, Juni 2011
- [3] Allgemeine Informationen des Betreibers zu Fukushima Dai-ichi und Fukushima Dai-ni, 2011, www.tepco.co.jp
- [4] Japanischer Bericht zu den Ereignissen in Fukushima „Über die Bewertung der Auswirkungen, Unfallprotokoll und Bedienprotokoll des AKW Fukushima Dai-ichi in der Tōhoku-Region zur Zeit des Erdbebens im pazifischen Ozean“, TEPCO vom 23.05.2011
- [5] Quicklook Report Fukushima Dai-ichi 1, OECD Data Collection, before 1995
- [6] Quicklook Report Fukushima Dai-ichi 2, OECD Data Collection, before 1995
- [7] Quicklook Report Fukushima Dai-ichi 3, OECD Data Collection, before 1995
- [8] Quicklook Report Fukushima Dai-ichi 4, OECD Data Collection, before 1995
- [9] Quicklook Report Fukushima Dai-ichi 5, OECD Data Collection, before 1995
- [10] Quicklook Report Fukushima Dai-ichi 6, OECD Data Collection, before 1995
- [11] World nuclear industry handbook 2010, Nuclear Engineering international, 2010

- [12] The 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Pacific Earthquake and the Seismic Damage to the NPPs, Nuclear and Industrial Safety Agency, Japan Nuclear Energy Safety Organization, JAPAN, April 2011
- [13] Fukushima Daiichi NPP Accident, Plant Design and Preliminary Observations, K. Moriya und K. Sato, Hitachi-GE Nuclear Energy, Ltd., 3. Mai 2011
- [14] Effects of the Earthquake and Tsunami on the Fukushima Daiichi and Daini Nuclear Power Stations, Tokyo Electric Power Company, Mai 2011
- [15] G.E. Technical Managers Manual
- [16] Standard Technical Specifications, General Electric Plants, BWR/4
- [17] Fukushima Accident: An Overview, Icapp2011, Akira Omoto, University of Tokyo, JAPAN, 3. Mai 2011
- [18] JNES activities on Fukushima accident, ETSON Workshop on the Fukushima accident, Japan Nuclear Safety Organization, Juli 2011
- [19] National Police Agency of Japan: Damage Situation and Police Countermeasures associated with 2011 Tohoku district - off the Pacific Ocean Earthquake. In: npa.go.jp. National Police Agency of Japan, 15. Juli 2011, abgerufen am 15. Juli 2011 (PDF, englisch)
http://www.npa.go.jp/archive/keibi/biki/higaijokyo_e.pdf
- [20] NIED (National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention): 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku earthquake, Strong Ground Motion
- [21] JICA (Japan International Cooperation Agency): Project Study on the Effective Countermeasures against Earthquake and Tsunami Disasters, May, 20, 2011
- [22] JMA (Japan Meteorological Agency): The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake Observed Tsunami, http://www.jma.go.jp/jma/en/2011_Earthquake/2011_Earthquake_Tsunami.pdf

- [23] TEPCO: The Great East Japan Earthquake and Current Status of Nuclear Power Stations. Updated May 31, 2011
http://www.tepco.co.jp/en/nu/fukushima-np/f1/images/f12np-gaiyou_e_1.pdf
- [24] Effects of the Earthquake and Tsunami on the Fukushima Daiichi and Daini Nuclear Power Stations, TEPCO vom 25.05.2011
- [25] Fukushima Nuclear Accident Interim Report: Effects of the Earthquake and Tsunami on the Fukushima Daiichi and Daini Nuclear Power Stations, especially on electric and I&C systems and equipments, TEPCO vom 27.07.2011
- [26] Analysis Results of Spent Fuel Pool Water in Unit 1 to 4, TEPCO vom 25.08.2011, http://www.tepco.co.jp/en/nu/fukushima-np/images/handouts_110825_02-e.pdf
- [27] Result of Radioactive Dose Measurement at Unit 4 Emergency Gas Treatment System in Fukushima Daiichi Nuclear Power Station, TEPCO vom 27.08.2011, http://www.tepco.co.jp/en/nu/fukushima-np/images/handouts_110827_02-e.pdf
- [28] Regarding the result of concentration measurement in the stagnant water on the basement floor of the turbine building of Unit 1 of Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Station, NISA vom 26.03.2011
<http://www.nisa.meti.go.jp/english/files/en20110325-6.pdf>
- [29] Fukushima Daiichi Unit 1 Results of nuclide analysis of accumulated water in the basement floor of turbine building, TEPCO vom 20.04.2011
http://www.tepco.co.jp/en/press/corp-com/release/betu11_e/images/110420e11.pdf
- [30] Antra Priyadarshi, Gerardo Dominguez, and Mark H. Thiemens, Evidence of neutron leakage at the Fukushima nuclear plant from measurements of radioactive S-35 in California. Proceedings of the national Academy of Sciences, PNAS 2011 : 1109449108v1-4.

- [31] Readings of pressures, water level, and CAMS radiation for reactor #2, TEPCO vom 31.08.2011, http://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/f1/images/syusei_level_pr_data_2u.pdf
- [32] Additional Report of the Japanese Government to the IAEA, September 2011

Abbildungen

Abb. 3.1	Lage von Fukushima Dai-ichi [1].....	8
Abb. 3.2	Fukushima Dai-ichi vor dem Erdbeben [12]	9
Abb. 3.3	Mark I (links) und Mark II (rechts) Containment im Schnittbild [3].....	9
Abb. 3.4	Höhenschema am Standort Fukushima Dai-ichi Block 1 [2].....	13
Abb. 3.5	Reactor Shutdown Cooling System [2].....	14
Abb. 3.6	Hochdruckeinspeisesystem (HPCI) [2].....	15
Abb. 3.7	Kernsprühsystem (CS) [5].....	16
Abb. 3.8	Isolation Condenser [2].....	17
Abb. 3.9	Lage der Diesel und Batterien im Maschinenhaus [2]	18
Abb. 3.10	Ventingsystem des Containments [2].....	19
Abb. 3.11	Temperatur am Eingang der Treibwasserschleife [4].....	21
Abb. 3.12	RDB-Druck [2]	22
Abb. 3.13	Druckkammer-Druck (rot), Differenzdruck Druckkammer- Kondensationskammer (grün) [2].....	23
Abb. 3.14	RDB-Füllstand (grün), Nahbereich (rot) [2].....	24
Abb. 3.15	Alternative Bespeisung über Feuerlöschwasserleitungen [2]	26
Abb. 3.16	Nachzerfallsleistung [3].....	27
Abb. 3.17	Hochdruckeinspeisesystem (HPCI) [2].....	30
Abb. 3.18	Kernsprühsystem (CS) [6], [7], [8].....	31
Abb. 3.19	Nachwärmeabfuhrsystem (RHR) [2]	32
Abb. 3.20	Nachspeisesystem (RCIC) [2].....	33
Abb. 3.21	Lage der Diesel und Batterien, Block 2 [2]	34
Abb. 3.22	Lage der Diesel und Batterien, Block 3 [2]	35
Abb. 3.23	Lage der Diesel und Batterien, Block 4 [2]	35
Abb. 3.24	Ventingsystem des Containments [2].....	36

Abb. 3.25	RDB-Füllstand (rot), RDB-Druck (grün) [4].....	38
Abb. 3.26	RDB-Füllstand (rot), RDB-Druck (grün) [4].....	44
Abb. 3.27	RDB-Füllstand (rot), RDB-Druck (grün) [4].....	46
Abb. 3.28	RDB-Füllstand (rot), RDB-Druck (grün) [4].....	47
Abb. 3.29	Vermutete Wasserstoffroute von Block 3 nach Block 4 [3].....	52
Abb. 5.1	Fukushima Dai-ni nach dem Tsunami [3].....	59
Abb. 6.1	Überblick über die ungefähre Lage der verschiedenen Messpunkte zur Ortsdosisleistung am Standort Fukushima Dai-ichi	63
Abb. 6.2	Übersicht der Ortsdosisleistung am Standort Fukushima Dai-ichi in der 10. Kalenderwoche	64
Abb. 6.3	Übersicht der Ortsdosisleistung am Standort Fukushima Dai-ichi in der 11. Kalenderwoche	65
Abb. 6.4	Gesamtübersicht der Ortsdosisleistung am Standort Fukushima Dai- ichi.....	65
Abb. 6.5	Übersicht der Ortsdosisleistung in ausgewählten Präfekturen.....	70
Abb. 6.6	Orte der Messpunkte zur Messung der Kontamination von Meerwasser	71
Abb. 6.7	Messdaten zur Kontamination von Seewasser mit Jod-131	73
Abb. 6.8	Messdaten zur Kontamination von Seewasser mit Cäsium-137.....	73
Abb. 6.9	Evakuierungszonen um Fukushima Dai-ichi	75

Tabellen

Tab. 3.1	Daten zu Fukushima Dai-ichi [1], [11]	7
Tab. 3.2	Gelagerte Brennelemente und Lagerkapazitäten der Brennelement- lagerbecken [2]	53
Tab. 5.1	Daten zu Fukushima Dai-ni [1], [11]	59
Tab. 6.1	Vorläufige Berechnung der luftgetragenen Freisetzung radioaktiver Stoffe in der frühen Phase des Unfalls	68

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

Schwertnergasse 1
50667 Köln

Telefon +49 221 2068-0

Telefax +49 221 2068-888

Forschungszentrum

85748 Garching b. München

Telefon +49 89 32004-0

Telefax +49 89 32004-300

Kurfürstendamm 200

10719 Berlin

Telefon +49 30 88589-0

Telefax +49 30 88589-111

Theodor-Heuss-Straße 4

38122 Braunschweig

Telefon +49 531 8012-0

Telefax +49 531 8012-200

www.grs.de

ISBN 978-3-939355-70-0