

Sicherheits- und Risikofragen im Nachgang zu den nuklearen Stör- und Unfällen in Japan - Vertiefte Ereignisanalyse zur Anlage Fukushima-Daini

Durchgeführt im Auftrag der
Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH
im Rahmen des Vorhabens UM11R01560 des Bundesministeriums
für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB).

Autorinnen und Autoren

Dr. Christoph Pistner
Dr. Matthias Englert
Öko-Institut e.V.

Darmstadt, 25.02.2015

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

Geschäftsstelle Freiburg

Postfach 17 71
79017 Freiburg

Hausadresse

Merzhauser Straße 173
79100 Freiburg
Telefon +49 761 45295-0

Büro Berlin

Schicklerstraße 5-7
10179 Berlin
Telefon +49 30 405085-0

Büro Darmstadt

Rheinstraße 95
64295 Darmstadt
Telefon +49 6151 8191-0

info@oeko.de
www.oeko.de

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	5
Tabellenverzeichnis	6
Abkürzungsverzeichnis	7
1 Einleitung	9
2 Die Anlage Fukushima Daini	10
2.1 Standortbeschreibung	10
2.2 Wesentliche verfahrenstechnische Einrichtungen	13
2.2.1 Hochdruck-Nachspeisesystem (RCIC)	14
2.2.2 Notkühlsystem (ECCS)	16
2.2.3 Alternative Einspeisesysteme	24
2.2.4 Sicherheitsbehälter und Ventingsystem	25
2.2.5 Brennelement-Lagerbecken (SFP) und Brennelementbeckenkühl- und - Reinigungssystem (FPC)	27
2.3 Wesentliche elektrotechnische Einrichtungen	28
2.3.1 Externe Stromversorgung	28
2.3.2 Notstromversorgung	28
2.4 Personal	30
3 Darstellung des Ereignisablaufs am Standort Fukushima Daini	30
3.1 Anlagenzustand zum Zeitpunkt des Erdbebens	30
3.2 Auswirkungen des Erdbebens	30
3.2.1 Auswirkungen auf die externe Stromversorgung	32
3.2.2 Auswirkungen auf das Sicherheitssystem	33
3.3 Auswirkungen des Tsunami	33
3.3.1 Auswirkungen auf die Stromversorgung	34
3.3.2 Beeinträchtigung der Kühlsysteme	37
3.4 Kurzfristige Maßnahmen des Betriebspersonals	38
3.4.1 Blöcke 1 und 2	39
3.4.2 Blöcke 3 und 4	41
3.5 Druck- und Temperaturentwicklung in den Sicherheitsbehältern	43
3.6 Wiederherstellung der Nachkühlsysteme in den Blöcken 1, 2 und 4	45
3.6.1 Herstellung einer provisorischen Stromversorgung	46
3.6.2 Wiederinbetriebnahme der Nachwärmeabfuhr	47
3.7 Brennelement-Lagerbecken	49

3.8	Zusammenfassung wesentlicher Anlagenparameter im Verlauf des Ereignisses	49
4	Vergleichende Analyse des Ereignisablaufs zum Standort Fukushima Daiichi	50
4.1	Die Auslegung der Anlagen	50
4.1.1	Containment	50
4.1.2	Erdbebenauslegung	51
4.1.3	Tsunamiauslegung	51
4.1.4	Verfahrenstechnische Systeme	51
4.1.5	Anlageninterne Notfallmaßnahmen	52
4.1.6	Externe Stromversorgung	52
4.1.7	Notstromversorgung	52
4.1.8	Fazit zu Unterschieden in der Auslegung	53
4.2	Auswirkungen des Erdbebens	54
4.2.1	Fazit zu den Auswirkungen des Erdbebens	55
4.3	Auswirkungen des Tsunami	55
4.3.1	Fazit zu den Auswirkungen des Tsunami	56
4.4	Maßnahmen des Betriebspersonals	56
4.4.1	Kontinuierliche Verfolgung und Bewertung der jeweiligen Anlagensituation	56
4.4.2	Inbetriebnahme einer Niederdruck-Einspeisung	58
4.4.3	Wiederherstellung einer Wärmeabfuhrmöglichkeit aus dem Sicherheitsbehälter	59
4.4.4	Fazit zu den Maßnahmen des Betriebspersonals	60
5	Zusammenfassung	60
6	Anhang	62
6.1	Auslegungsdaten der Reaktordruckbehälter (RPV)	62
6.2	Von Block 1 abweichende Systemkonfigurationen	62
6.2.1	Druckbegrenzungs- und Entlastungssystem (ADS)	62
6.2.2	Hochdruck-Kernsprühsystem (HPCS)	63
6.2.3	Nachwärmeabfuhrsystem (RHR)	63
6.2.4	Niederdruck-Kernsprühsystem (LPCS)	68
6.2.5	Alternative Einspeisesysteme	68
	Literaturverzeichnis	69

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1:	Luftbild der Anlage Fukushima Daini	10
Abbildung 2-2:	Wesentliche Einrichtungen am Standort Fukushima Daini	11
Abbildung 2-3:	Systemübersicht Fukushima Daini Blöcke 1-4	13
Abbildung 2-4:	Systemübersicht RCIC, Fukushima Daini Block 1-4	15
Abbildung 2-5:	Systemübersicht HPCS, Fukushima Daini Block 1 und 3	16
Abbildung 2-6:	Systemübersicht SRV, Fukushima Daini Block 1	18
Abbildung 2-7:	Systemübersicht LPCS, Fukushima Daini Block 1 und 3	19
Abbildung 2-8:	Systemübersicht RHR, RHRC und RHRs, Fukushima Daini Block 1	20
Abbildung 2-9:	Systemübersicht SCS, Fukushima Daini Block 1	22
Abbildung 2-10:	Systemübersicht CCS, Fukushima Daini Blöcke 1 und 3	22
Abbildung 2-11:	Alternative Einspeisesysteme, Fukushima Daini Blöcke 1, 3 und 4	25
Abbildung 2-12:	Systemübersicht Druckentlastung des Sicherheitsbehälters, Fukushima Daini Block 1-4	27
Abbildung 2-13:	Elektrotechnische Einrichtungen der Anlage Fukushima Daini	29
Abbildung 3-1:	Überflutungshöhen auf dem Standort Fukushima Daini	34
Abbildung 3-2:	Aufbau einer provisorischen Stromversorgung der Nebenkühlwassergebäude	47
Abbildung 6-1:	Systemübersicht ADS, Fukushima Daini Block 2-4	62
Abbildung 6-2:	Systemübersicht HPCS, Fukushima Daini Block 2 und 4	63
Abbildung 6-3:	Systemübersicht RHR, RHRC und RHRs, Fukushima Daini Block 2	63
Abbildung 6-4:	Systemübersicht RHR, RHRC und RHRs, Fukushima Daini Block 3	64
Abbildung 6-5:	Systemübersicht RHR, RHRC und RHRs, Fukushima Daini Block 4	64
Abbildung 6-6:	Systemübersicht SCS, Fukushima Daini Blöcke 2 und 4	65
Abbildung 6-7:	Systemübersicht SCS, Fukushima Daini Block 3	66
Abbildung 6-8:	Systemübersicht CCS, Fukushima Daini Blöcke 2 und 4	67
Abbildung 6-9:	Systemübersicht LPCS, Fukushima Daini Block 2 und 4	68
Abbildung 6-10:	Alternative Einspeisesysteme, Fukushima Daini Block 2	68

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1:	Anlagendaten des Standorts Fukushima Daini	11
Tabelle 2-2:	Übersicht zu wesentlichen verfahrenstechnischen Systemen der Anlage Fukushima Daini und deren Hilfs- und Versorgungsfunktionen	14
Tabelle 2-3:	Daten des RCIC der Blöcke 1-4, Fukushima Daini	15
Tabelle 2-4:	Daten des HPCS der Blöcke 1-4, Fukushima Daini.	17
Tabelle 2-5:	Daten der SRV der Blöcke 1-4, Fukushima Daini.	17
Tabelle 2-6:	Daten des LPCS, Fukushima Daini Block 1 und 3.	19
Tabelle 2-7:	Daten des RHR der Blöcke 1-4, Fukushima Daini	21
Tabelle 2-8:	Daten des RHRC der Blöcke 1-4, Fukushima Daini	23
Tabelle 2-9:	Daten des RHRS der Blöcke 1-4, Fukushima Daini	24
Tabelle 2-10:	Daten zum Sicherheitsbehälter der Blöcke 1-4, Fukushima Daini	26
Tabelle 2-11:	Daten des SGTS der Blöcke 1-4, Fukushima Daini	26
Tabelle 2-12:	Daten der Brennelement-Lagerbecken der Blöcke 1-4, Fukushima Daini	27
Tabelle 3-1:	Vergleich der gemessenen maximalen Bodenbeschleunigungen (PGA) mit den Auslegungswerten der Anlage Fukushima Daini in (g)	31
Tabelle 3-2:	RPV-Füllstände und ausgelöste Maßnahmen	32
Tabelle 3-3:	Verfügbarkeit der Notstromdiesel ED/G in Fukushima Daini nach dem Tsunami	35
Tabelle 3-4:	Verfügbarkeit der Notstrom-Schaltanlagen M/C in Fukushima Daini nach dem Tsunami	35
Tabelle 3-5:	Verfügbarkeit der Notstrom-Elektronikschränke P/C in Fukushima Daini nach dem Tsunami	36
Tabelle 3-6:	Verfügbarkeit der Einrichtungen in den Nebenkühlwasserbauwerken Hx/B in Fukushima Daini nach dem Tsunami	38
Tabelle 3-7:	Temperaturanstieg in den Kondensationskammern (S/C) der Blöcke 1, 2 und 4 des Standorts Fukushima Daini	43
Tabelle 3-8:	Druckentwicklung nach Sieden in der S/C und Inbetriebnahme von D/W- bzw. S/C-Sprühen in Block 1 und 2	44
Tabelle 3-9:	Wichtige Anlagenparameter im Verlauf des Ereignisses	50
Tabelle 6-1:	Daten des Reaktordruckbehälters der Blöcke 1-4, Fukushima Daini	62

Abkürzungsverzeichnis

ADS:	Automatisches Druckentlastungssystem (Automatic Depressurization System)
AM:	Anlageninterner Notfallschutz (Accident Management)
AOP:	Ereignisorientiertes Betriebshandbuch, Störfall-BHB (Abnormal Operating Procedures (Event base))
BWR:	Siedewasserreaktor (Boiling Water Reactor)
C/B:	Wartengebäude (Control Building)
CCS:	Sicherheitsbehälter-Kühlsystem (Containment Cooling System)
CRD:	Steuerstabantriebssystem (Control Rod Drive System)
CST:	Kondensatvorratsbehälter (Condensate Storage Tank)
D/DFP:	Dieselgetriebene Feuerlöschpumpe (Diesel-driven Fire Pump)
D/W:	Druckkammer des Sicherheitsbehälters (Drywell)
ECCS:	Notkühlsysteme (Emergency Core Cooling Systems)
ED/G:	Notstromdiesel (Emergency Diesel Generator)
EECW:	Sicherheitskomponenten-Kühlsystem (Emergency Equipment Cooling Water System)
EOP:	Zustandsorientiertes Betriebshandbuch, Notfallhandbuch (Emergency Operating Procedures (symptom-base))
FCS:	Wasserstoffüberwachungs- und Abbausystem (Flammability Control System)
FP:	Feuerlöschsystem (Fire Protection System)
FPC:	Brennelementbeckenkühl- und -Reinigungssystem (Fuel Pool Cooling and Cleanup System)
HPCS:	Hochdruck-Kernsprühsystem (High Pressure Core Spray System)
HPCSC:	Zwischenkühlsystem des Hochdruck-Kernsprühsystems (High Pressure Core Spray Cooling System)
HPCSS:	Nebenkühlwassersystem des Hochdruck-Kernsprühsystems (High Pressure Core Spray Seawater System)
Hx/B:	Nebenkühlwassergebäude (Seawater Heatexchanger Building)
IA:	Druckluftsystem (Instrument Air System)
IC:	Notkondensationssystem (Isolation Condenser)
INES:	Internationale Bewertungsskala für nukleare und radiologische Ereignisse (International Nuclear and Radiological Event Scale)

LPCS:	Niederdruck-Kernsprühsystem (Low Pressure Core Spray System)
M/C:	Schaltanlage, metall-gekapselte (Metal-Clad Switch Gear)
MSIV:	Frischdampfabschlussventile (Main Steam Isolation Valves)
MUWC:	Zusatzwasser-Kondensatsystem (Make-Up Water Condensate System)
P/C:	Elektronikschränke (Power Center)
PCIS:	Durchdringungsabschluss des primären Containments (Primary Containment Isolation System)
PCV:	Sicherheitsbehälter (Primary Containment Vessel)
PGA:	maximale Bodenbeschleunigung (Peak Ground Acceleration)
RCIC:	Hochdruck-Nachspeisesystem (Reactor Core Isolation Cooling System)
R/G:	Reaktorgebäude (Reactor Building)
RHR:	Nachwärmeabfuhrsystem (Residual Heat Removal System)
RHRC:	Zwischenkühlsystem (Residual Heat Removal Cooling System)
RHRS:	Nebenkühlwassersystem (Residual Heat Removal Seawater System)
RPV:	Reaktordruckbehälter (Reactor Pressure Vessel)
RW/B:	Gebäude für radioactive Abfälle (Radioactive Waste Building)
SBO:	Vollständiger Ausfall der Wechselstromversorgung (Station Black Out)
S/C:	Kondensationskammer (Suppression Chamber/Wetwell)
SCS:	Betriebliches Nachwärmeabfuhrsystem (Reactor Shutdown Cooling System)
SFP:	Brennelement-Lagerbecken (Spent Fuel Pool)
SGTS:	Abgassystem (Standby Gas Treatment System)
SLC:	Vergiftungssystem (Standby Liquid Control System)
SRV:	Sicherheits- und Entlastungsventil (Safety Relief Valve)
TAF:	Kernoberkante (Top of active Fuel)
T/B:	Maschinenhaus (Turbine Building)
TEPCO:	Tokyo Electric Power Company

1 Einleitung

Am 11. März 2011 um 14:46 Uhr Ortszeit (6:46 Uhr MEZ) ereignete sich nordwestlich der japanischen Hauptinsel Honshu ein schweres Erdbeben der Stärke 9 mit darauf folgendem Tsunami. In diesem Küstenbereich befinden sich vier Kernkraftwerksstandorte (Fukushima-Daiichi, Fukushima-Daini, Onagawa und Tokai) an denen sich jeweils mehrere Reaktorblöcke befinden. Diese Standorte wurden von dem Ereignis in unterschiedlichem Umfang betroffen. Während es am Standort Fukushima-Daiichi zu einem katastrophalen Unfall (Stufe 7 der internationalen Bewertungsskala für nukleare und radiologische Ereignisse, INES) kam, wurde das Ereignis in den übrigen Reaktoren maximal als schwerer Störfall (Stufe 3 der INES-Skala) eingestuft.

Die Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit (GRS) führt im Rahmen des Eigenforschungsvorhabens UM11R01560 „Sicherheits- und Risikofragen im Nachgang zu den nuklearen Stör- und Unfällen in Japan“ Untersuchungen durch, um die Unfallabläufe in den betroffenen Kraftwerksblöcken möglichst umfassend und detailliert nachvollziehen zu können. Dazu gehören sowohl der Beginn des Unfalls mit dem Erdbeben, die darauf folgende Überflutung des Anlagengeländes und der Anlagengebäude, der sukzessive Verlust der sicherheitstechnischen Funktionen als auch die daran anschließenden Vorgänge. Die im frühen sowie weiteren Verlauf des Unfalls vorgenommenen Gegenmaßnahmen werden ebenso analysiert bzw. verifiziert.

Das Öko-Institut e.V. hat dazu im Rahmen eines Unterauftrags der GRS den Ereignisablauf am Standort Fukushima-Daini untersucht. Ziel dieser Untersuchung ist es, durch eine detaillierte Analyse des Ablaufs der Ereignisse am Standort Fukushima-Daini im Vergleich zum Unfallablauf am Standort Fukushima-Daiichi einerseits die jeweiligen zentralen Ursachen für Unterschiede im Ereignisablauf und darauf aufbauend wesentliche Erfolgs- sowie Misserfolgskriterien bei der Beherrschung des Ereignisses zu identifizieren.

In Kap. 2 werden hierzu zunächst wesentliche Auslegungsmerkmale der Anlage Fukushima-Daini dargestellt. Dabei werden, soweit für den Ereignisablauf am Standort relevant, Daten über die Anlagen- und Systemtechnik sowie zur elektrischen Versorgung zusammengefasst. Dabei wird auch auf anlageninterne Notfallmaßnahmen eingegangen.

In Kap. 3 werden die zeitlichen Abläufe der Ereignisse am Standort Fukushima Daini dargestellt. Dabei werden zunächst die Auswirkungen des Erdbebens und des Tsunami auf die einzelnen Anlagenblöcke zusammengefasst. Daran anschließend werden die daraus unmittelbar resultierenden Abläufe in der Anlage sowie die in der Folge durchgeführten Arbeiten zur Wiederherstellung der Kühlsysteme bis hin zum Erreichen des kalt unterkritischen Zustands in den vier Reaktorblöcken dargestellt.

In Kap. 4 werden basierend auf diesen Erkenntnissen wesentliche Unterschiede im Ereignisablauf am Standort Fukushima Daini im Vergleich zum Standort Fukushima Daiichi analysiert und bewertet. Eine eigenständige Darstellung des Unfallablaufs am Standort Daiichi erfolgt dabei im Rahmen dieser Untersuchung nicht. Grundlage für die vergleichende Analyse sind neben japanischen Untersuchungen die von der GRS <GRS 2011>, <GRS 2012>, <GRS 2014> und anderen Organisationen wie <BfS 2012> erarbeiteten Darstellungen zum Unfallablauf in der Anlage Fukushima Daiichi. Eine Übersichtsdarstellung hierzu findet sich auch in <Pistner 2013>.

Kapitel 5 fasst die wesentlichen Ergebnisse zusammen.

2 Die Anlage Fukushima Daini

In diesem Kapitel werden die für den Ereignisablauf relevanten Einrichtungen der Anlage Fukushima Daini dargestellt. Dabei werden in Kap. 2.1 zunächst allgemeinere Angaben zum Standort zusammengefasst. Daran anschließend werden in Kap. 2.2 die wichtigsten verfahrenstechnischen Systeme und Einrichtungen beschrieben. Hierbei wird ein Fokus auf Auslegungseigenschaften der Systeme sowie die für deren Betrieb erforderlichen Hilfssysteme (Kühlung, Energieversorgung) gelegt. Daran anschließend werden in Kap. 2.3 Angaben zu elektrischen Einrichtungen und in Kap. 2.4 zur Personalsituation zusammengestellt.

Die in diesem Kapitel gemachten Angaben sind <GoJ 2012> entnommen, soweit dies nicht explizit anderweitig gekennzeichnet ist. Die dort gemachten Angaben basieren wiederum wesentlich auf <TEPCO 2012>.

2.1 Standortbeschreibung

Die Anlage Fukushima Daini befindet sich in der Präfektur Fukushima an der pazifischen Küste, siehe Abbildung 2-1. Sie liegt ca. 12 km südlich der Anlage Fukushima Daiichi. Beide Anlagen werden von der Tokyo Electric Power Company (TEPCO) betrieben.

Abbildung 2-1: Luftbild der Anlage Fukushima Daini



Quelle: TEPCO, <http://www.tepco.co.jp/en/news/gallery/nuclear-e.html>, abgerufen am 20.11.2012

Am Standort befinden sich vier Reaktorblöcke vom Typ Siedewasserreaktor. Der Standort verfügt über eine elektrische Gesamtleistung von 4.400 MWe. Die Inbetriebnahme der Anlagen erfolgte zwischen April 1982 und August 1987, vgl. Tabelle 2-1.

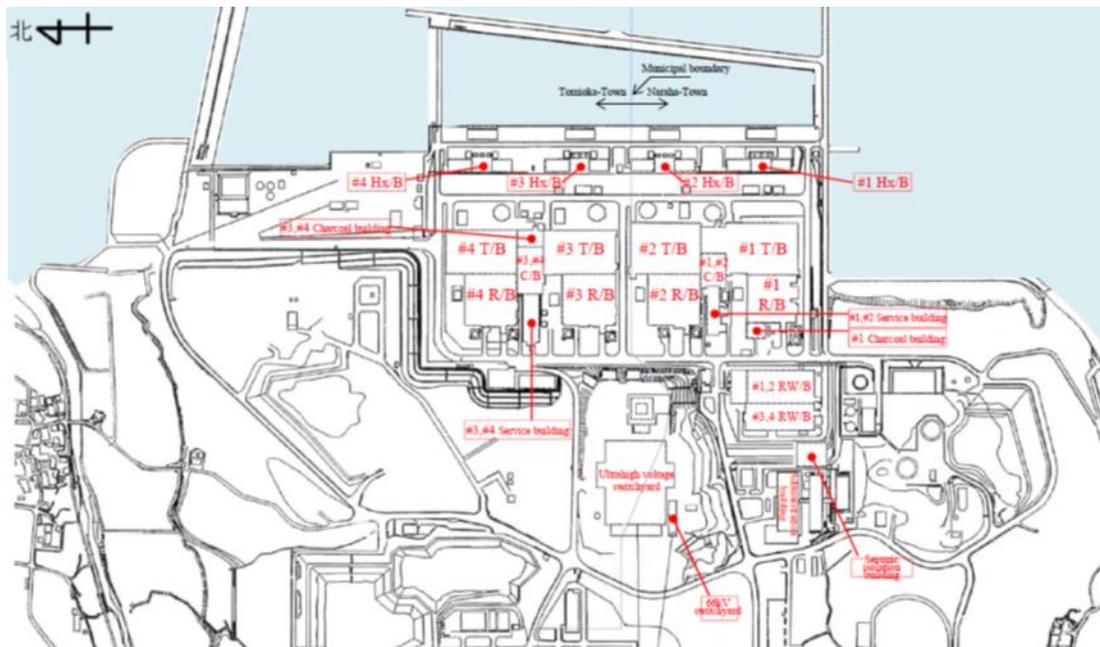
Tabelle 2-1: Anlagendaten des Standorts Fukushima Daini

	Block 1	Block 2	Block 3	Block 4
Elektrische Leistung (MWe)	1.100	1.100	1.100	1.100
Thermische Leistung (MWt)	3.293	3.293	3.293	3.293
Baubeginn	Aug. 1975	Jan. 1979	Nov. 1980	Nov. 1980
Beginn des kommerziellen Leistungsbetriebs	Apr. 1982	Feb. 1984	Jun. 1985	Aug. 1987
Reaktortyp	BWR 5	BWR 5	BWR 5	BWR 5
Sicherheitsbehälter	Mark II	Mark II Improved Version	Mark II Improved Version	Mark II Improved Version

Quelle: <GoJ 2012>, Attachment II-5-2

Die Blöcke erstrecken sich in nord-südlicher Richtung entlang der Küste, Block 1 befindet sich am südlichen, Block 4 am nördlichen Ende, siehe Abbildung 2-2. Jeder Block verfügt u. a. über

- ein Reaktorgebäude (R/B) mit einem Anbau (R/B Annex),
- ein Maschinenhaus (T/B) und
- zwei Nebenkühlwassergebäude (Hx/B).

Abbildung 2-2: Wesentliche Einrichtungen am Standort Fukushima Daini


Quelle: <GoJ 2012>, Attachment II-5-3

Die Blöcke 1 und 2 sowie die Blöcke 3 und 4 teilen sich jeweils ein gemeinsames Wartengebäude (C/B) sowie ein Gebäude für die Behandlung radioaktiver Abfälle (RW/B). Weiterhin gibt es für alle Blöcke ein gemeinsames Gebäude für die Einrichtung der Notfallorganisation (Seismic Isolation Building).

Das Anlagengelände mit den Gebäuden R/B, T/B, C/B und RW/B befindet sich auf einer Höhe von +12 m oberhalb des Onahama Meeresniveaus (O.P.), die Gebäude Hx/B befinden sich auf O.P. +4 m.

Der Reaktordruckbehälter (RPV), der Sicherheitsbehälter (PCV) sowie das Brennelement-Lagerbecken (SFP) sind jeweils im Reaktorgebäude untergebracht. Dort befinden sich auch die Pumpen und die Zwischenkühler des Nachwärmeabfuhrsystems (RHR). Im R/B Annex sind die Notstromdiesel (EDG), metall-gekapselte Schaltanlagen (M/C) sowie Elektronikschränke (P/C) untergebracht. Das Reaktorgebäude und der RG Annex wurden auf einer gemeinsamen Bodenplatte errichtet.

Die Anlage Fukushima Daini verfügt über ein Zwischenkühlsystem (RHRC). Das Zwischenkühlsystem ist für die Abfuhr der Nachzerfallsleistung sowie die Kühlung der Pumpen der verschiedenen Einspeise- und Nachkühlsysteme erforderlich. Ein Sicherheitskomponenten-Kühlsystems (EECW) dient zur Kühlung der Notstromdiesel und verschiedener Lüftungssysteme. Diese Systeme werden mit Frischwasser betrieben. Das Nebenkühlwassersystem (RHRS) führt die Wärme ans Meer ab und wird direkt mit Meerwasser beaufschlagt.

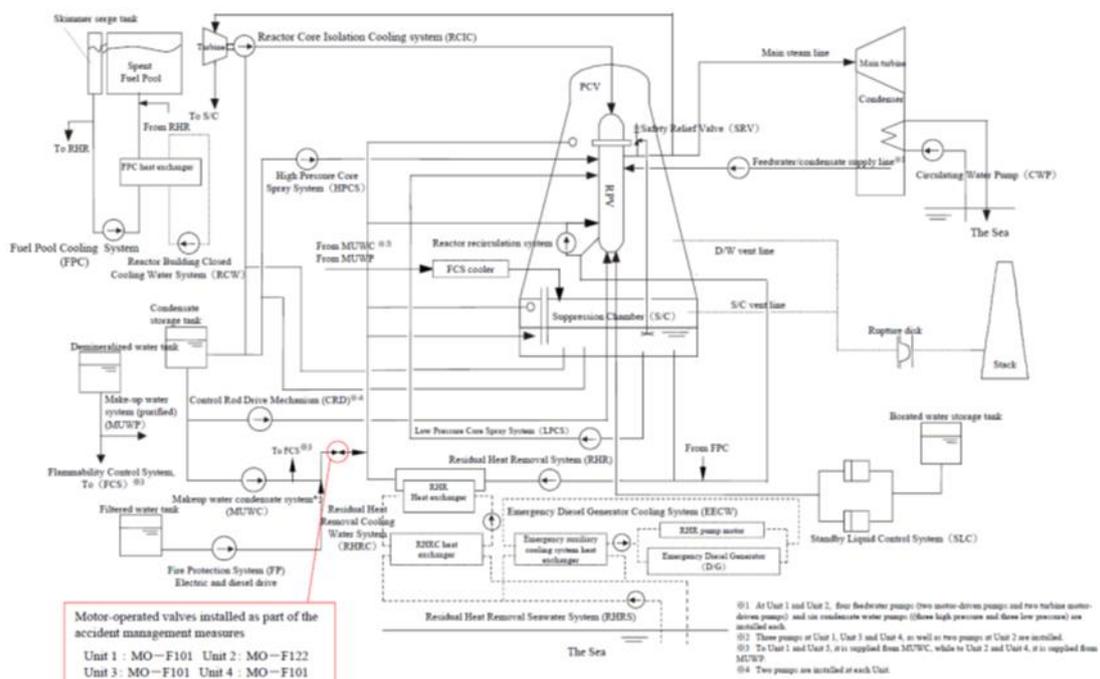
Die Wärmetauscher des Nebenkühlwassersystems sowie die Pumpen des Zwischen- und Nebenkühlwassersystems, des Sicherheitskomponenten-Kühlsystems als auch die Schaltanlagen und Elektronikschränke zur Versorgung dieser Einrichtungen befinden sich in den Nebenkühlwassergebäuden Hx/B. Die Nebenkühlwassergebäude Hx/B sind zweistöckig mit einem zusätzlichen Kellergeschoss.

2.2 Wesentliche verfahrenstechnische Einrichtungen

Eine Übersicht der wichtigsten Systeme gibt Abbildung 2-3. Diese werden in den folgenden Abschnitten im Detail dargestellt. Alle Systeme sind jeweils für jeden Reaktorblock vorhanden, sofern nicht anderweitig dargestellt. Dabei wird in den folgenden Abschnitten jeweils die Konfiguration der Systeme am Beispiel von Block 1 dargestellt. Ggf. abweichende Systemkonfigurationen finden sich in den zugehörigen Abbildungen im Anhang.

In Tabelle 2-2 sind die wesentlichen verfahrenstechnischen Systeme sowie ihre jeweiligen Hilfs- und Versorgungsfunktionen zusammengefasst.

Abbildung 2-3: Systemübersicht Fukushima Daini Blöcke 1-4



Quelle: <GoJ 2012>, Attachment II-5-4

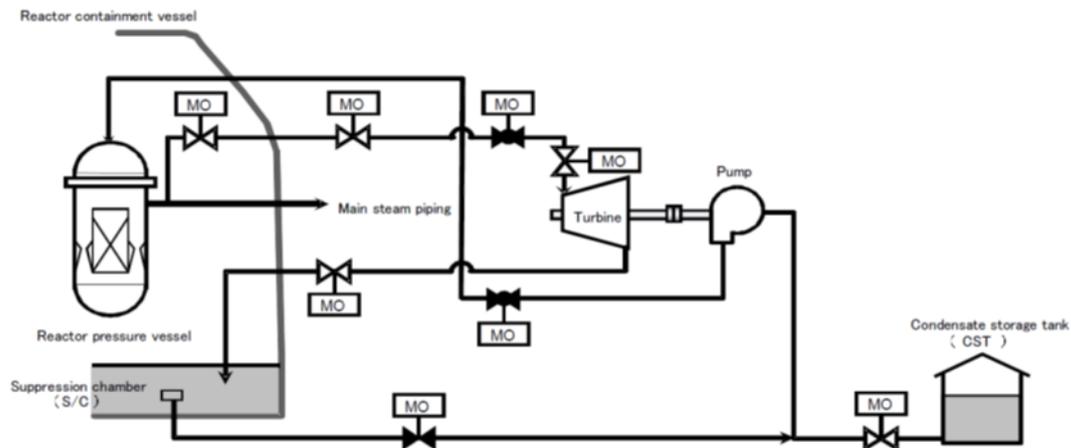
Tabelle 2-2: Übersicht zu wesentlichen verfahrenstechnischen Systemen der Anlage Fukushima Daini und deren Hilfs- und Versorgungsfunktionen

System	Strang	Funktion	Hilfssystem	Versorgung	Vorrat
RCIC	1	Hochdrucknachspeisung		Frischdampf, DC	CST, S/C
HPCS	1	Hochdruckeinspeisung	HPCSC, HPCSS	ED/G H	CST, S/C
LPCS	1	Niederdruck-Einspeisung	RHRC A/C, EECW A	ED/G A	S/C
ADS	18 Ventile	Druckentlastung des RPV		DC	
RHR	A	Niederdruck-Einspeisung, Nachwärmeabfuhr	RHRC A/C, EECW A	ED/G A	RPV, S/C, SFP
	B	Niederdruck-Einspeisung, Nachwärmeabfuhr	RHRC B/D, EECW B	ED/G B	RPV, S/C, SFP
	C	Niederdruck-Einspeisung	RHRC B/D, EECW B	ED/G B	S/C
RHRC	A/C	Zwischenkühlung	RHRS A/C	ED/G A	
	B/D	Zwischenkühlung	RHRS B/D	ED/G B	
RHRS	A/C	Nebenkühlung		ED/G A	Meerwasser
	B/D	Nebenkühlung		ED/G B	Meerwasser
EECW	A	Komponentenkühlung	RHRS A/C	ED/G A	
	B	Komponentenkühlung	RHRS B/D	ED/G B	
MUWC		AM-Niederdruck-Einspeisung		Eigenbedarf	CST
FP		AM-Niederdruck-Einspeisung		Eigenbedarf, Diesel	Frischwassertank
FPC	2	Lagerbeckenkühlung	Betr. Kühlsysteme	ED/G	SFP

2.2.1 Hochdruck-Nachspeisesystem (RCIC)

Das einsträngige Hochdruck-Nachspeisesystem (RCIC) soll bei Transienten nach dem Schließen der Frischdampfabschlussventile (MSIV) verdampfendes Kühlmittel aus dem Reaktordruckbehälter (RPV) ersetzen.

Dazu wird dem RPV Frischdampf entnommen, der eine Dampfturbine antreibt. Der entspannte Dampf wird in die Kondensationskammer (S/C) geführt und dort kondensiert. Die Turbine treibt eine Hochdruckpumpe an. Diese entnimmt im Normalfall Kühlmittel aus dem Kondensatvorratsbehälter (CST) und speist dieses in den Dampfraum des RPV ein, siehe Abbildung 2-4.

Abbildung 2-4: Systemübersicht RCIC, Fukushima Daini Block 1-4


Quelle: <GoJ 2011b>

Die Förderung kann jedoch auch auf die S/C umgeschaltet werden. Für den Betrieb des Systems ist eine Gleichstromversorgung erforderlich. Die wesentlichen Daten für das System sind in Tabelle 2-3 zusammengefasst. Nach Angaben in <GoJ 2012>, S. 167 ist ein Betrieb des RCIC bei einem Druck von etwa 0,34 bis 9,22 MPa(gage) im RPV möglich.

Tabelle 2-3: Daten des RCIC der Blöcke 1-4, Fukushima Daini

	Block 1	Block 2	Block 3	Block 4
Turbine				
Anzahl	1	1	1	1
Reaktordruck	~ 7,86 - ~1,04 MPa[gage]	~ 7,86 - ~1,04 MPa[gage]	80 – 10 kg/cm ² g	80 – 10 kg/cm ² g
Leistung (kW)	~ 541 - ~ 97	~ 660 - ~ 125	~ 541 - ~ 97	~ 660 - ~ 125
Drehzahl (U/min)	~ 4.500 - ~ 2.200	~ 4.200 - ~ 2.200	~ 4.500 - ~ 2.200	~ 4.200 - ~ 2.200
Pumpe				
Anzahl	1	1	1	1
Pumpenleistung (m ³ /h)	~ 142	~ 142	~ 142	~ 142
Förderhöhe (m)	~ 880 - ~ 190	~ 880 - ~ 190	~ 880 - ~ 190	~ 880 - ~ 190

Quelle: : <GoJ 2011b>

Tabelle 2-4: Daten des HPCS der Blöcke 1-4, Fukushima Daini.

	Block 1	Block 2	Block 3	Block 4
Anzahl Stränge	1	1	1	1
Durchsatz (t/h) bzw. Pumpenleistung (t/h)	~ 1.440	~ 350 - ~1.580	~ 350 - ~1.580	~ 350 - ~1.580
Förderhöhe (m)	866-197	~ 860 - ~ 200	~ 860 - ~ 200	~ 860 - ~ 200
Anzahl Pumpen	1	1	1	1

Quelle: <GoJ 2011b>

2.2.2.2 Druckbegrenzungs- und Entlastungssystem (ADS)

Die Druckbegrenzung und Druckentlastung des Reaktordruckbehälters erfolgt über 18 Sicherheitsventile (SRV) pro Block, vgl. Tabelle 2-5 und Abbildung 2-6 sowie Abbildung 6-1, wobei alle Ventile sowohl für die Druckentlastung als auch zur Druckbegrenzung eingesetzt werden. Die Ventile können von Hand von der Warte zur Druckhaltung im RPV angesteuert werden. Weiterhin kann durch Reaktorschutzsignale eine schnelle Druckentlastung des RPV in den Niederdruckbereich ausgelöst werden, vgl. Tabelle 3-2.

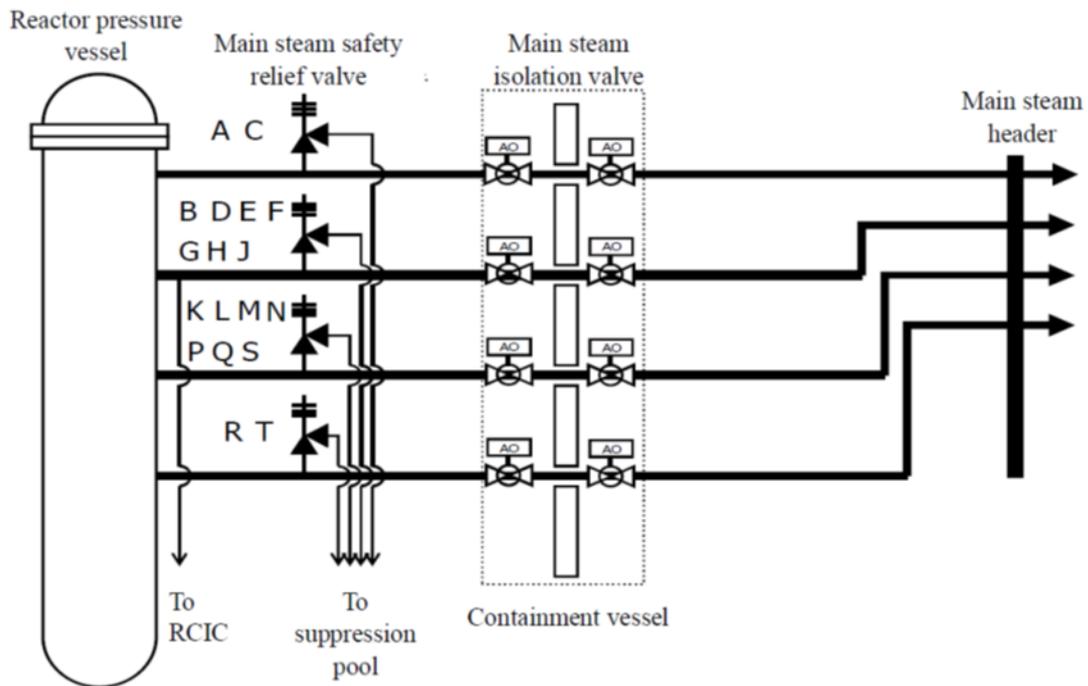
Für die Ansteuerung der SRV ist eine Gleichstromversorgung erforderlich.

Tabelle 2-5: Daten der SRV der Blöcke 1-4, Fukushima Daini.

	Block 1	Block 2	Block 3	Block 4
Anzahl Ventile	18	18	18	18
Abblasekapazität (t/h Einheit)	~ 400	~ 400	~ 400	~ 400
Öffnungsdruck (Entlastungsfunk.) (Block 1: kg/cm ² g) (Blöcke 2-4: MPa[gage])	75,2 (2 x)	7,37 (2 x)	7,37 (2 x)	7,37 (2 x)
	75,9 (4 x)	7,44 (4 x)	7,44 (4 x)	7,44 (4 x)
	76,6 (4 x)	7,51 (4 x)	7,51 (4 x)	7,51 (4 x)
	77,3 (4 x)	7,58 (4 x)	7,58 (4 x)	7,58 (4 x)
	78,0 (4 x)	7,65 (4 x)	7,65 (4 x)	7,65 (4 x)
Öffnungsdruck (Sicherheitsfunkt.) (Block 1: kg/cm ² g): (Blöcke 2-4 MPa[gage])	79,4 (2 x)	7,79 (2 x)	7,79 (2 x)	7,79 (2 x)
	82,6 (4 x)	8,10 (4 x)	8,10 (4 x)	8,10 (4 x)
	83,3 (4 x)	8,17 (4 x)	8,17 (4 x)	8,17 (4 x)
	84,0 (4 x)	8,24 (4 x)	8,24 (4 x)	8,24 (4 x)
	84,7 (4 x)	8,31 (4 x)	8,31 (4 x)	8,31 (4 x)

Quelle: <GoJ 2011b>

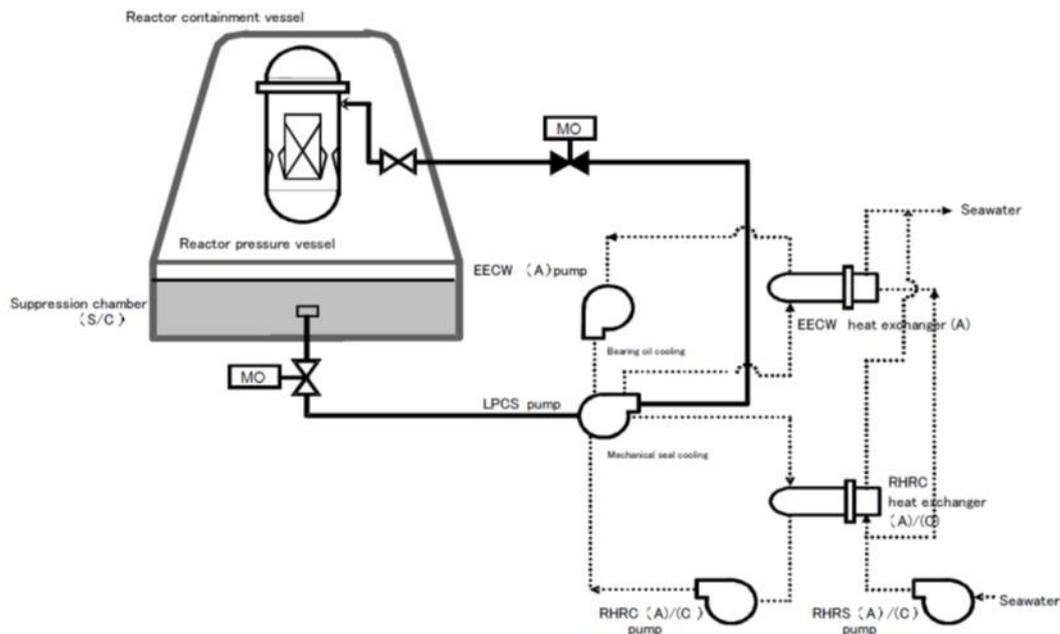
Abbildung 2-6: Systemübersicht SRV, Fukushima Daini Block 1



Quelle: <GoJ 2011b>

2.2.2.3 Niederdruck-Kernsprühsystem (LPCS)

Das einsträngige Niederdruck-Kernsprühsystem (LPCS) fördert Kühlmittel aus der S/C direkt in den Dampfraum des RPV oberhalb des Reaktorkerns, vgl. Abbildung 2-7. Das LPCS kann nicht zur Kühlung der Kondensationskammer eingesetzt werden. Für die Kühlung des LPCS ist ein sowohl ein Strang des RHRC als auch des EECW erforderlich, vgl. Abbildung 2-7.

Abbildung 2-7: Systemübersicht LPCS, Fukushima Daini Block 1 und 3

Quelle: <GoJ 2011b>

Die Energieversorgung der LPCS-Pumpe wird durch den Notstromdiesel ED/G A sichergestellt <JNSI 2012>. Die Daten des LPCS sind in Tabelle 2-6 zusammengefasst.

Tabelle 2-6: Daten des LPCS, Fukushima Daini Block 1 und 3.

	Block 1	Block 2	Block 3	Block 4
Anzahl Stränge	1	1	1	1
Durchsatz (t/h) bzw. Pumpenleistung (t/h)	~ 1.440	~ 1.440	~ 1.440	~ 1.440
Förderhöhe (m)	218	~ 210	~ 210	~ 210
Anzahl Pumpen	1	1	1	1

Quelle: <GoJ 2011b>

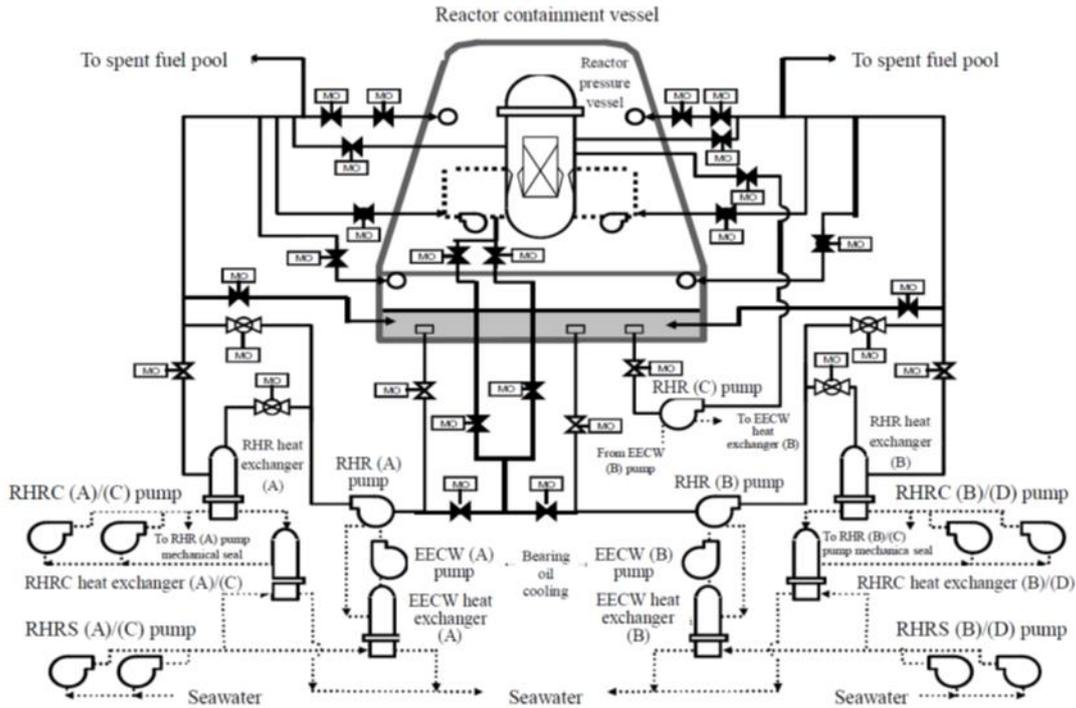
2.2.2.4 Nachwärmeabfuhrsystem (RHR)

Die Nachwärmeabfuhr im Stillstand und bei Störfällen erfolgt über das dreisträngige Nachwärmeabfuhrsystem (RHR), dessen Komponenten sich im Reaktorgebäude (R/B) befinden.

Zwei der Stränge (A und B) verfügen jeweils über eine Pumpe und einen Wärmetauscher sowie über Ansaugleitungen aus der S/C und den Kühlmittelumwälzschleifen des RPV. Von diesen Strängen kann das Kühlmittel durch die Pumpen entweder zurück in die Kühlmittelumwälzschleifen, in die S/C, in den RPV, in die Druckkammer des Sicherheitsbehälters (D/W spray mode) oder zum Brennelement-Lagerbecken gefördert werden. Dabei kann das Kühlmittel entweder über den Wärmetauscher oder unter Umgehung des Wärmetauschers im Kreislauf gefördert werden.

Ein dritter Strang C des RHR umfasst nur eine Pumpe und verfügt nicht über einen Wärmetauscher. Dieser Strang kann aus der Kondensationskammer ansaugen und das Kühlmittel von dort in den Reaktor Druckbehälter fördern, vergleiche Abbildung 2-8, Abbildung 6-3, Abbildung 6-4 und Abbildung 6-5.

Abbildung 2-8: Systemübersicht RHR, RHRC und RHRS, Fukushima Daini Block 1



Quelle: <GoJ 2011b>

Die Leistungsdaten des Systems sind in Tabelle 2-7 zusammengefasst. Die Versorgung der Stränge A bzw. B des Systems wird durch die Notstromdiesel A bzw. B sichergestellt, Strang C wird zusammen mit dem HPCS vom Notstromdiesel H versorgt, vgl. Kap. 2.3.2.

Tabelle 2-7: Daten des RHR der Blöcke 1-4, Fukushima Daini

	Block 1	Block 2	Block 3	Block 4
Pumpen				
Anzahl	3	3	3	3
Durchsatz (m ³ /h/Einheit)	~ 1.690	~ 1.690	~ 1.690	~ 1.690
Förderhöhe (m)	~ 92	~ 86	~ 92	~ 92
Wärmetauscher				
Anzahl	2	2	2	2
Kühlleistung (MW/Strang)	19,3	~17,0	~ 12,3	~ 12,3

Quelle: <GoJ 2011b>

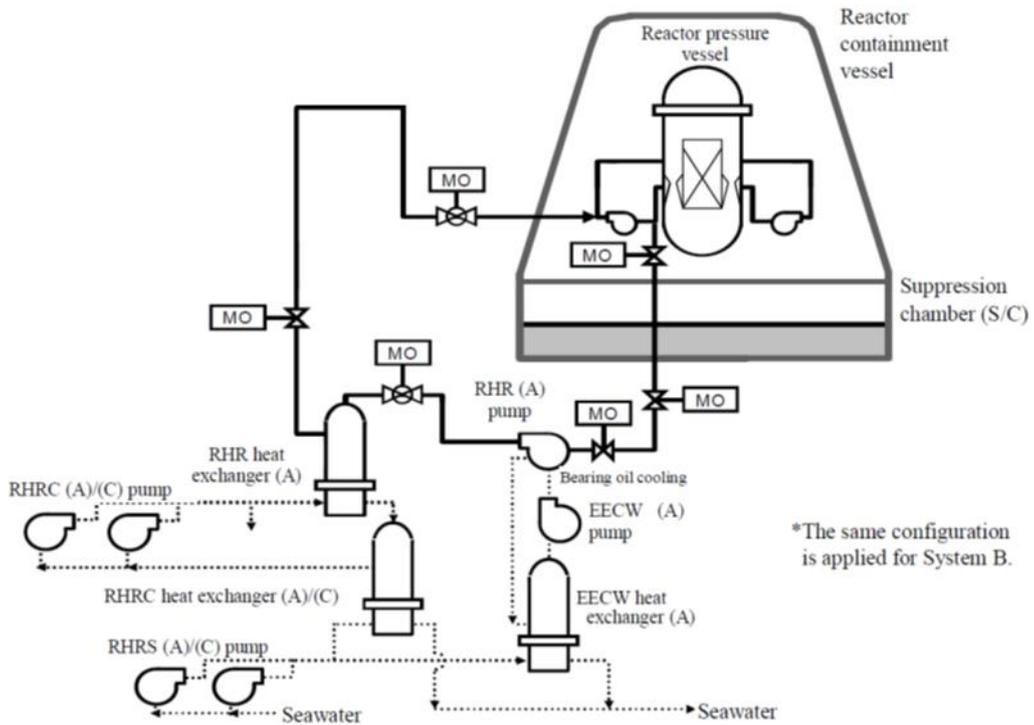
2.2.2.4.1 Einsatz als betriebliches Nachwärmeabfuhrsystem (SCS)

Für die Abfuhr der Nachwärme bei abgeschaltetem Reaktor wird das Nachwärmeabfuhrsystem (RHR) als betriebliches Nachwärmeabfuhrsystem zum Stillstandskühlen (SCS) mit den Redundanzen A und B eingesetzt. Dabei wird Kühlmittel aus den Umwälzschleifen entnommen, durch die Pumpen A und B des RHR-Systems über den Wärmetauscher geführt und wieder in die Umwälzschleifen zurückgefördert, vgl. Abbildung 2-9, Abbildung 6-6 sowie Abbildung 6-7.

2.2.2.4.2 Einsatz als Sicherheitsbehälter-Kühlsystem (CCS)

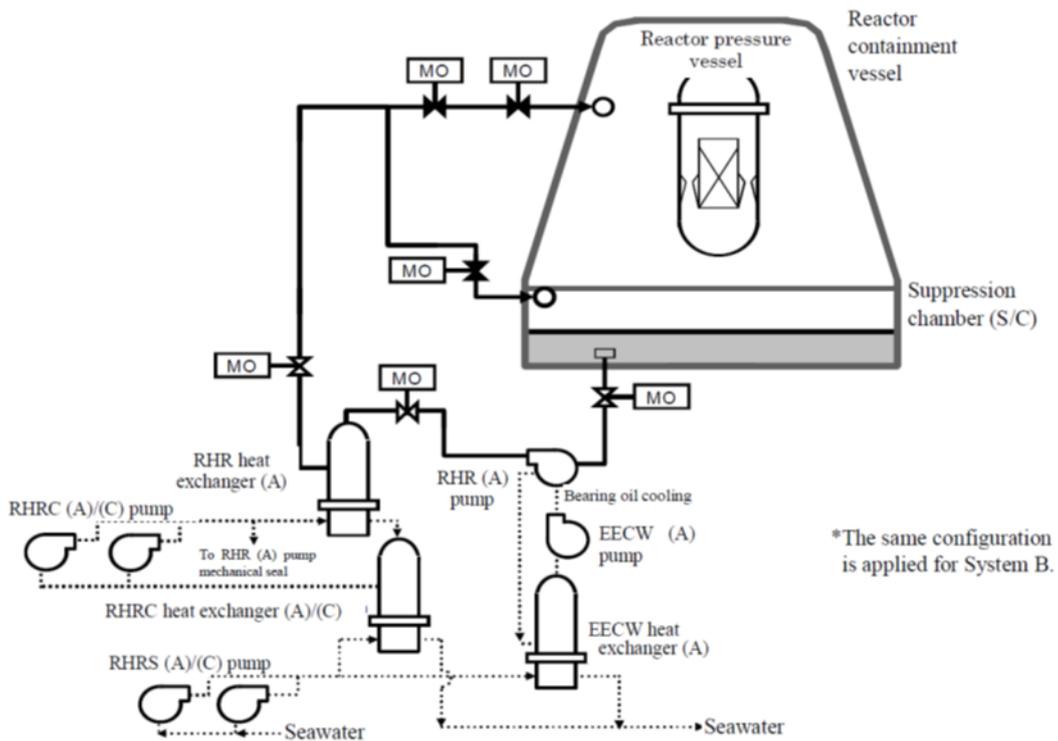
Bei Störfällen kann das Nachwärmeabfuhrsystem in den Redundanzen A und B auch als Sicherheitsbehälter-Kühlsystem (CCS) eingesetzt werden. Dabei wird Kühlmittel aus der S/C entnommen, durch die Pumpen des RHR-Systems über den Wärmetauscher geführt und entweder in den Dampfraum der Kondensationskammer oder in die Druckkammer gesprüht, vgl. Abbildung 2-10 und Abbildung 6-8.

Abbildung 2-9: Systemübersicht SCS, Fukushima Daini Block 1



Quelle: <GoJ 2011b>

Abbildung 2-10: Systemübersicht CCS, Fukushima Daini Blöcke 1 und 3



Quelle: <GoJ 2011b>

2.2.2.5 Zwischen- (RHRC) und Nebenkühlwassersystem (RHRS) sowie Sicherheitskomponenten-Kühlsystem (EECW)

Für den Betrieb des RHR sind das zweisträngige Zwischenkühlsystem (RHRC), das zweisträngige Nebenkühlwassersystem (RHRS) und das zweisträngige Sicherheitskomponenten-Kühlsystem (EECW) erforderlich. Die Komponenten dieser Systeme befinden sich im Hx/B.

Das RHRC umfasst vier Pumpen (A, B, C und D) und vier Wärmetauscher (A/C und B/D), vergleiche Tabelle 2-8. Die Pumpen A und C führen die Wärme aus dem Strang A des RHR ab, die Pumpen B und D aus dem Strang B. Grundsätzlich kann das System auch mit nur einer Pumpe pro Strang betrieben werden.

Das EECW besteht aus zwei Strängen A und B mit jeweils einer Pumpe und einem Wärmetauscher. Strang A des EECW dient zur Kühlung der Pumpe aus Strang A des RHR, Strang B des EECW dient zur Kühlung der Pumpen von Strang B und C des RHR. Nach <GoJ 2012>, S. 147 erfolgt nur die Kühlung der RHR-Motoren durch das EECW, die Kühlung der RHR-Pumpen erfolgt demgegenüber durch das RHRC.

Tabelle 2-8: Daten des RHRC der Blöcke 1-4, Fukushima Daini

	Block 1	Block 2	Block 3	Block 4
Pumpen				
Anzahl	4	4	4	4
Durchsatz (m ³ /h/Einheit)	~ 1.450	~ 1.460	~ 1.150	~ 1.110
Förderhöhe (m)	~ 35	~ 50	~ 40	~ 40
Wärmetauscher				
Anzahl	4	4	4	4
Kühlleistung (kcal/Einheit)	8,4x10 ⁶	8,4x10 ⁶	6,0x10 ⁶	6,0x10 ⁶

Quelle: <GoJ 2011b>

Das zweisträngige RHRS umfasst die vier Pumpen A, B, C und D, vergleiche Abbildung 2-8, wobei die Pumpen A und C (B und D) die Wärme aus den Wärmetauschern A und C (B und D) des RHRC sowie aus Strang A (B) des EECW abführen. Die Daten des Systems sind in Tabelle 2-9 zusammengefasst.

Die elektrische Versorgung dieser Systeme wird nach <JNSI 2012> über die zugehörigen Notstromdiesel A und B sichergestellt, vgl. Kap. 2.3.2.

Tabelle 2-9: Daten des RHRS der Blöcke 1-4, Fukushima Daini

	Block 1	Block 2	Block 3	Block 4
Pumpen				
Anzahl	4	4	4	4
Durchsatz (m ³ /h/Einheit)	~ 2.550	~ 2.450	~ 2.100	~ 2.000
Förderhöhe (m)	~ 30	~ 25	~ 30	~ 30

Quelle: <GoJ 2011b>

2.2.3 Alternative Einspeisesysteme

Im Rahmen der Einführung von anlageninternen Notfallmaßnahmen wurden am Standort Fukushima Daini zusätzliche Einspeisemöglichkeiten in den RPV realisiert.

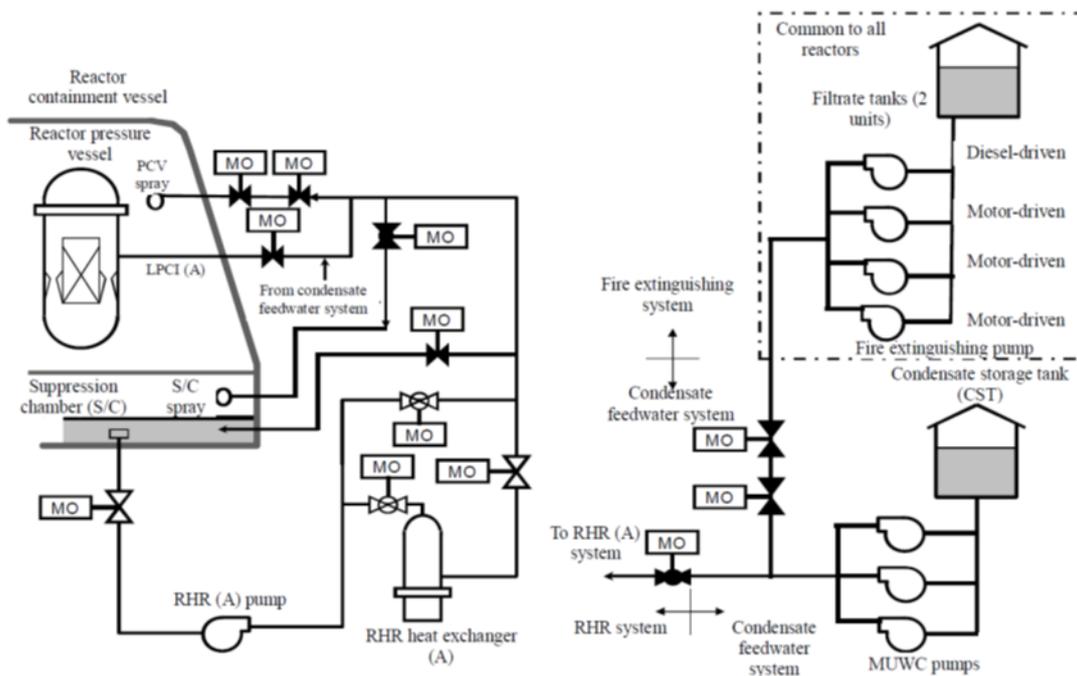
2.2.3.1 Zusatzwasser-Kondensatsystem (MUWC)

Das Zusatzwasser-Kondensatsystem (MUWC) versorgt verschiedene Einrichtungen der Anlage über die Kondensatpumpen mit Kondensat aus dem Kondensatvorratsbehälter (CST). Über eine Armatur kann eine Querverbindung zwischen dem MUWC und dem RHR hergestellt werden. Damit kann Kondensat aus dem CST durch das MUWC über das RHR (Strang A) direkt in den RPV eingespeist werden. Im Rahmen der Einführung von Notfallmaßnahmen wurde eine bis dahin nur manuell zu bedienende Absperrarmatur zwischen dem MUWC und dem RHR bereits vor dem 11.03.2011 durch ein von der Warte aus fernbedienbares Motorventil ausgetauscht, siehe hierzu Abbildung 2-11 und Abbildung 6-10.

In den Blöcken 1, 3 und 4 verfügt das MUWC über drei Pumpen, in Block 2 nur über 2 Pumpen.

Das MUWC ist nicht notstromgesichert und nur als betriebliches System gegen Erdbeben ausgelegt <JNSI 2012>.

Die Förderhöhe der Pumpen des MUWC beträgt ca. 1 MPa(gage), aufgrund der Druckverluste wird in <GoJ 2012>, S. 167 ein effektiver Einspeisedruck von ca. 0,7 MPa(gage) abgeschätzt.

Abbildung 2-11: Alternative Einspeisesysteme, Fukushima Daini Blöcke 1, 3 und 4


Quelle: <GoJ 2011b>

2.2.3.2 Feuerlöschsystem (FP)

Eine weitere Einspeisemöglichkeit besteht über das Feuerlöschsystem (FP), welches sowohl über elektromotorisch betriebene Pumpen wie über dieselgetriebene Pumpen verfügt. Auch von diesem System kann über die Rohrleitungen des MUWC und des RHR eine Einspeisemöglichkeit direkt in den RPV hergestellt werden. Das Feuerlöschsystem greift dabei für alle Blöcke auf einen gemeinsamen Frischwasser-Vorratsbehälter und gemeinsam genutzte Pumpen zurück.

Weitere Einspeisemöglichkeiten in den RPV bestehen grundsätzlich über das Steuerstabantriebssystem (CRD) aus dem CST sowie über das Vergiftungssystem (SLC), das über einen eigenen Vorratsbehälter verfügt. Die Einspeisekapazität bzw. die Vorratsmengen dieser Systeme sind jedoch so gering, dass auf sie im Weiteren nicht eingegangen wird.

2.2.4 Sicherheitsbehälter und Ventingsystem

Block 1 der Anlage Fukushima Daini weist einen Sicherheitsbehälter vom Typ Mark II auf, die übrigen drei Blöcke einen Sicherheitsbehälter vom Typ Mark II (Improved Version), der gegenüber der älteren Version u.a. einen etwas größeren Durchmesser und ein größeres Volumen der Kondensationskammer aufweist, vgl. Tabelle 2-10.

Tabelle 2-10: Daten zum Sicherheitsbehälter der Blöcke 1-4, Fukushima Daini

	Block 1	Block 2	Block 3	Block 4
PCV Typ	Mark II	Mark II Improved Version	Mark II Improved Version	Mark II Improved Version
PCV Durchmesser (m)	~ 26	~ 29	~ 29	~ 29
PCV Höhe (m)	~ 48	~ 48	~ 48	~ 48
PCV Auslegungsdruck (MPa[gage])	~ 0,28	~ 0,28	~ 0,28	~ 0,28
D/W Auslegungstemperatur (°C)	171	171	171	171
S/C Auslegungstemperatur (°C)	104	104	104	104
S/C Wasservolumen (m ³)	3.400	4.000	4.000	4.000

Quelle: <GoJ 2012>, Attachment II-5-2

Wird der Durchdringungsabschluss des Sicherheitsbehälters ausgelöst, so stellt das Abgassystem SGTS die Druckhaltung zwischen Sicherheitsbehälter und Reaktorgebäude sicher, siehe hierzu Tabelle 2-11. Es leitet dazu Abgase gefiltert über den Kamin ab.

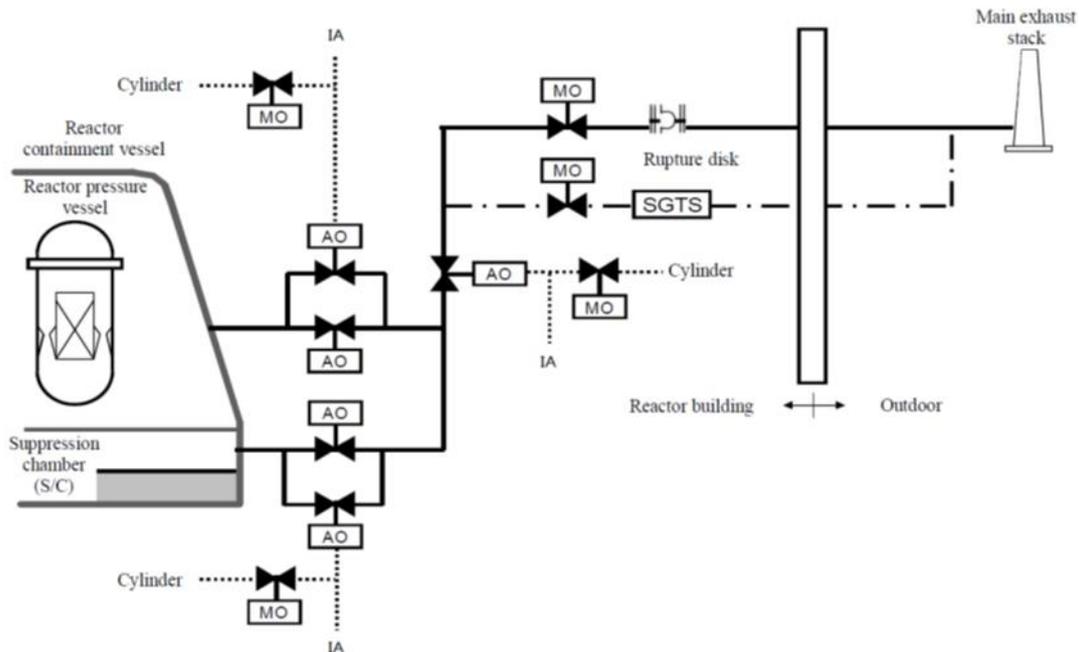
Tabelle 2-11: Daten des SGTS der Blöcke 1-4, Fukushima Daini

	Block 1	Block 2	Block 3	Block 4
Anzahl Stränge	2	2	2	2
Anzahl Ventilatoren	2	2	2	2
Durchsatz (m ³ /h/Einheit)	~ 4.250	~ 5.000	~ 5.000	~ 5.000
Rückhaltevermögen Iod (%)	≥ 99	≥ 99	≥ 99	≥ 99

Quelle: <GoJ 2011b>

Eine Druckentlastung des Sicherheitsbehälters kann unter Nutzung von Rohrleitungen des SGTS über den Kamin vorgenommen werden. Dabei kann eine Druckentlastung entweder ausgehend von der Kondensationskammer (S/C) oder von der Druckkammer (D/W) erfolgen. Hierzu müssen zwei druckluftgetriebene Armaturen sowie eine motorgetriebene Armatur vor einer Berstscheibe geöffnet werden, siehe Abbildung 2-12. Die Ansteuerung dieser Armaturen kann von der Warte aus erfolgen. Hierzu ist neben dem Druckluftsystem (IA) auch eine Gleichstromversorgung erforderlich.

Abbildung 2-12: Systemübersicht Druckentlastung des Sicherheitsbehälters, Fukushima Daini Block 1-4



Quelle: <GoJ 2011b>

2.2.5 Brennelement-Lagerbecken (SFP) und Brennelementbeckenkühl- und -Reinigungssystem (FPC)

Die Brennelement-Lagerbecken (SFP) der Blöcke am Standort Fukushima Daini sind im jeweiligen Reaktorgebäude außerhalb des Sicherheitsbehälters untergebracht. Wesentliche Angaben zur Auslegung und der Belegung der Lagerbecken zum Zeitpunkt des Ereignisses sind in Tabelle 2-12 zusammengefasst.

Tabelle 2-12: Daten der Brennelement-Lagerbecken der Blöcke 1-4, Fukushima Daini

	Block 1	Block 2	Block 3	Block 4
Kapazität SFP (in % einer Kernbeladung)	350	360	360	360
Kapazität SFP (in BE)	2.662	2.769	2.740	2.769
SFP Auslegungstemperatur (°C)	≤ 65	≤ 65	≤ 65	≤ 65
SFP Abmessungen (L x B x T in m)	~12,2 x ~ 10,4 x ~ 11,8	~12,2 x ~ 13,6 x ~ 11,9	~12,2 x ~ 13,6 x ~ 11,8	~12,2 x ~ 13,6 x ~ 11,8
SFP Wasservolumen (m ³)	~ 1.450	~ 1.620	~ 1.749	~ 1.670
Anzahl abgebrannter BE (Stand Dez. 2010)	1.570	1.638	1.596	1.672
Anzahl frischer BE (Stand Dez. 2010)	200	80	184	80

Quelle: <GoJ 2012>, Attachment II-5-2

Das Brennelementbeckenkühl- und -reinigungssystem (FPC) entnimmt dem Brennelementlagerbecken das Kühlmittel und führt dieses über Beckenkühpumpen und Beckenkühler wieder ins Lagerbecken zurück, vgl. Abbildung 2-1. Die Wärme aus dem Beckenkühler wird über betriebliche Kühlsysteme ans Meer abgeführt. Daneben besteht eine Querverbindung zum Nachwärmeabfuhrsystem RHR, so dass unter Umgehung der Beckenkühpumpen und der Beckenkühler das Lagerbecken direkt mit dem Nachwärmeabfuhrsystem gekühlt werden kann.

Nach Angaben in <JNSI 2012> ist das FPC notstromversorgt.

2.3 Wesentliche elektrotechnische Einrichtungen

Die elektrische Energieversorgung der verfahrenstechnischen Einrichtungen kann bei abgeschalteten Reaktoren über eine externe Stromversorgung oder durch die Notstromversorgung sichergestellt werden.

2.3.1 Externe Stromversorgung

Die externe Netzanbindung der Standorts Fukushima Daini erfolgt über vier verschiedene Leitungen, Tomioka 1 und 2 sowie Iwaido 1 und 2. Alle vier Leitungen erreichen das Anlagengelände über die externe Umspanneinrichtung in Shin-Fukushima, ca. 7 km vom Standort entfernt.

Die beiden Linien des 500 kV Hauptnetzes Tomioka 1 und 2 verbinden alle vier Blöcke über eine gemeinsame 500 kV Schaltanlage mit dem externen Netz.

Die beiden Linien des 66 kV Reservenetzes Iwaido 1 und 2 binden in eine 66 kV Schaltanlage ein, von der aus die Eigenbedarfsversorgung sowie die unterlagerten Notstromschienen aller vier Blöcke versorgt werden können. Zwischen der 500 kV Schaltanlage und der 66 kV Schaltanlage besteht eine Querverbindung über einen entsprechenden Transformator, vgl. Abbildung 2-13.

Die Auslegungsgrundlagen der Netzanbindung des Standorts Fukushima Daini unterscheiden sich dabei nicht grundlegend von derjenigen des Standort Fukushima Daiichi <JNSI 2012>. Für beide Anlagen entspricht nach <TEPCO 2012> die Netzanbindung dem Industriestandard JEAG 5003 "Seismic Design Guide for Electrical Facilities at Substations and Other Facilities".

2.3.2 Notstromversorgung

Jeder Block am Standort Fukushima Daini verfügt über drei Notstromdiesel A, B und H die in den Untergeschossen der Annexe zum Reaktorgebäude (R/B Annex) untergebracht sind.

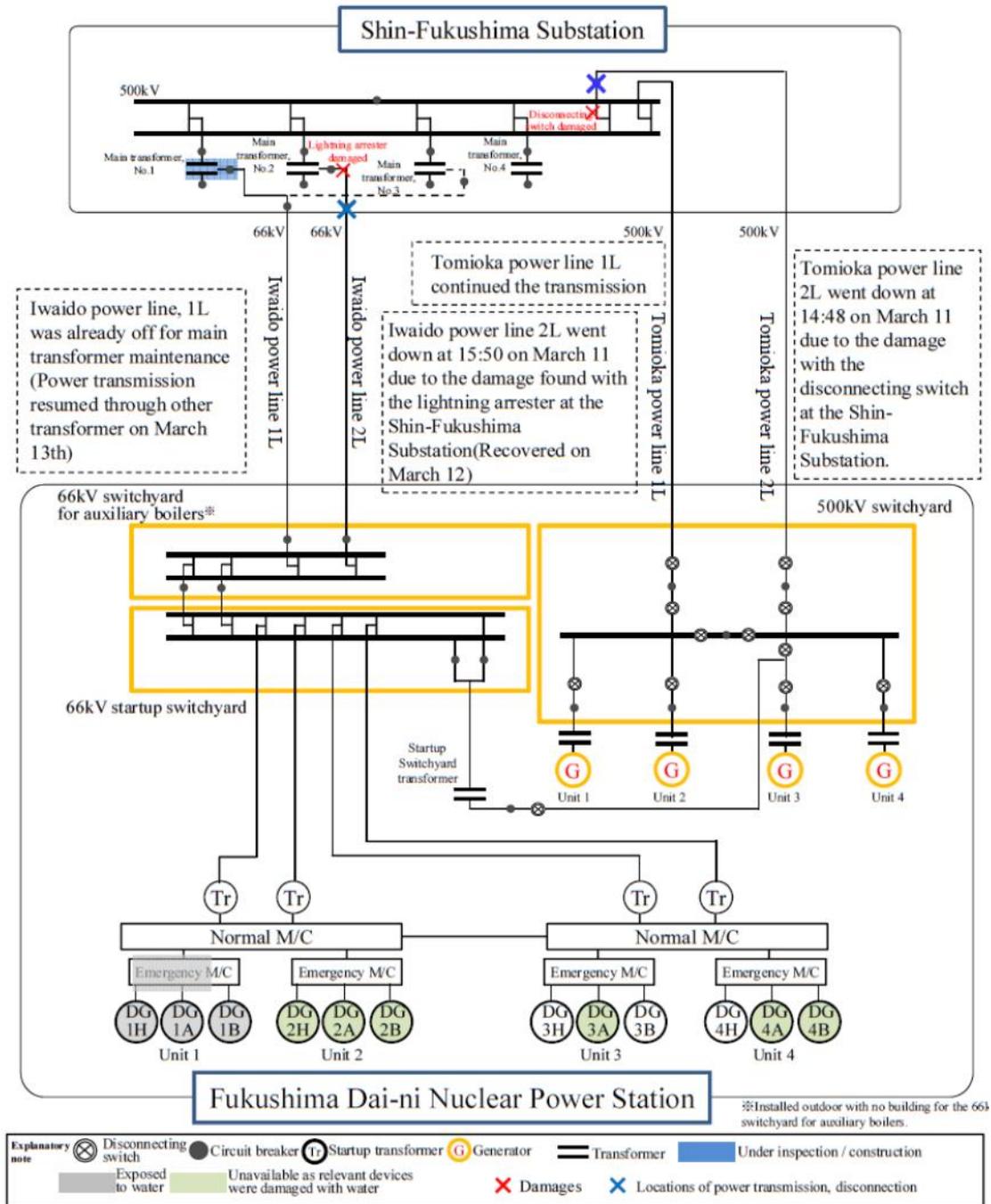
Die Notstromdiesel A und B versorgen die entsprechenden Stränge des Nachwärmeabfuhrsystems RHR und die zugehörigen Zwischen- und Nebenkühlwassersysteme sowie das Niederdruck-Kernsprühsystem LPCS. Der Notstromdiesel H versorgt das jeweilige Hochdruck-Kernsprühsystem HPCS sowie dessen Zwischen- und Nebenkühlwassersysteme <JNSI 2012>. Alle Notstromdiesel am Standort Fukushima Daini sind wassergekühlt <JNTI 2011>.

Zu den drei Notstromdieseln eines Blocks gehören jeweils drei metall-gekapselte Schaltanlagen (M/Cs) C, D und H sowie vier Elektronikschränke (P/Cs) C-1, C-2, D-1 und D-2. Die Schaltanlagen und die Elektronikschränke C-1 und D-1 befinden sich im R/G Annex und dienen der Versorgung der Einrichtungen im Reaktorgebäude. Die Elektronikschränke C-2 (Stränge A und C) und D-2 (Stränge B und D) befinden sich in den Nebenkühlwassergebäuden und dienen der Versorgung der dortigen Einrichtungen.

Die Schaltanlagen und Elektronikschränke der Eigenbedarfsversorgung befinden sich im Wartengebäude C/B.

Zwischen jeweils zwei benachbarten Blöcken wurde zusätzlich im Rahmen des anlageninternen Notfallschutzes eine elektrische Blockstützung auf der 480 V Ebene realisiert <JNSI 2012>.

Abbildung 2-13: Elektrotechnische Einrichtungen der Anlage Fukushima Daini



Quelle: <GoJ 2012>, Attachment II-5-5

2.4 Personal

Die Reaktoren in Fukushima Daini weisen jeweils einen gemeinsamen Kontrollraum für zwei Reaktorblöcke auf (Block 1 und 2 sowie Block 3 und 4).

Als verantwortliches Personal waren in der Anlage Fukushima Daini zur Zeit des Unfalls jeweils ein Schichtleiter und ein stellvertretender Schichtleiter, zwei Reaktorfahrer, sowie sechs weitere Techniker für jeweils zwei Blöcke im Dienst, vgl. <NDoJ 2012>. Maßnahmen zur Erhöhung der Personalstärke wurden seit 2008 geplant, waren jedoch zur Zeit des Unfalls noch nicht eingeführt.

Daneben wurde am Standort Fukushima Daini ein Krisenstab gebildet, der im Seismic Isolation Building untergebracht war. Die jeweiligen Schichtleiter standen mit dem Krisenstab in Kontakt und tauschten Informationen aus.

Die Notfallplanungen der Anlage sehen den Aufbau von technischen und organisatorischen Teams mit einem Personalbestand von ca. 250 Personen vor. Hierzu wurden die ca. 400 zum Zeitpunkt des Ereignisses auf dem Anlagengelände anwesenden TEPCO-Mitarbeiter des technischen Personals eingebunden. Diese arbeiteten in der Folge in Schichten und verblieben bis mindestens zum Morgen des 15.03. auf dem Anlagengelände. Weiterhin wurden in der Folge ca. 1900 Fremdfirmenmitarbeiter bei den Wiederherstellungsarbeiten mit herangezogen <JNSI 2012>.

3 Darstellung des Ereignisablaufs am Standort Fukushima Daini

Untersuchungen zum Ereignisablauf am Standort Fukushima Daini wurden von der japanischen Aufsichtsbehörde zunächst mit <GoJ 2011a> vorgelegt und durch <GoJ 2011b> ergänzt. Vom Betreiber TEPCO wurden mit <TEPCO 2011> und <TEPCO 2012> ebenfalls detaillierte Analysen zum Ereignisablauf vorgelegt. Diese Berichte stellten auch eine Grundlage für die Arbeit einer durch die japanische Regierung eingesetzten Expertenkommission dar, welche mit <GoJ 2011c> einen Zwischenbericht und mit <GoJ 2012> ihren Endbericht vorgelegt hat. Weitere Untersuchungen wurden durch eine vom japanischen Parlament eingesetzte Untersuchungskommission durchgeführt <NDoJ 2012>. Soweit nicht explizit anderweit gekennzeichnet, beruhen die folgenden Darstellungen auf Angaben in <GoJ 2012>, hier speziell Kapitel II.5. Sofern die dort gemachten Angaben für die hier durchgeführte Untersuchung nicht ausreichend waren, wurden entsprechende Angaben aus den weiteren genannten Berichten herangezogen.

3.1 Anlagenzustand zum Zeitpunkt des Erdbebens

Zum Zeitpunkt des Erdbebens befanden sich alle vier Blöcke des Standorts Fukushima Daini im ungestörten Leistungsbetrieb.

Von vier externen Stromanschlüssen waren drei Linien verfügbar. Die Linie Iwaido 1 war aufgrund einer wiederkehrenden Prüfung abgeschaltet.

3.2 Auswirkungen des Erdbebens

Um 14:45 Uhr japanischer Ortszeit am 11.03.2014 ereignete sich vor der Küste von Sanriku bei 38,1° N, 142,9° E in einer Tiefe von 24 km ein Erdbeben der Magnitude 9 auf der Momenten-Magnituden Skala. Der Standort Fukushima Daini befindet sich in einer Entfernung von 183 km vom Epizentrum und 185 km vom Hypozentrum <JNSI 2012>. Das Erdbeben wurde am Standort mit einer Intensität von 6 (stark) auf der JMA-Skala eingestuft.

Die ursprüngliche Auslegung der Anlage Fukushima Daini erfolgte zu einer Zeit, als noch keine expliziten regulatorischen Vorgaben bzgl. der erforderlichen Erdbebenauslegung existierten. Erst im Jahr 1981 wurde von der japanischen Aufsichtsbehörde der „Regulatory Guide for Reviewing Seismic Design of Nuclear Power Reactor Facilities“ verabschiedet. Dieser wurde im Jahr 2006 überarbeitet. Im Anschluss daran hatten alle japanischen Betreiber eine Nachbewertung der Erdbebenauslegung durchzuführen und erforderlichenfalls Nachrüstungen zu implementieren. In einer Studie von TEPCO vom 28.02.2011 wurde für die Anlage Fukushima Daiichi Nachrüstungsbedarf identifiziert. Entsprechende Berichte für die Anlage Fukushima Daini liegen nur in japanischer Sprache vor, vgl. <NDoJ 2012>.

Nach Angaben in <EPRI 2011> lagen der ursprünglichen Auslegung der Blöcke Spektren mit einer maximalen Bodenbeschleunigung (PGA) von $3,7 \text{ m/s}^2$ zugrunde. Im Rahmen der Nachbewertung im Jahr 2006 wurden demnach neue Auslegungsspektren für die Anlage definiert, die PGA-Werte von bis zu $6,1 \text{ m/s}^2$ aufwiesen.

Die am Standort gemessenen maximalen Bodenbeschleunigungen (PGA) waren geringer als die der Auslegung der Anlage zugrundeliegenden Werte, allerdings überstiegen in einigen Spektralbereichen die gemessenen Beschleunigungswerte diejenigen des Auslegungsspektrums, vgl. <TEPCO 2012> und <JNSI 2012>. Als maximale Beschleunigung am Standort Fukushima Daini wurde im zweiten Untergeschoss des Reaktorgebäudes in Block 1 eine PGA von $3,05 \text{ m/s}^2$ gemessen <JNTI 2011>. Ein Vergleich der in Fukushima Daini gemessenen Bodenbeschleunigungen mit den Auslegungswerten zeigt Tabelle 3-1.

Tabelle 3-1: Vergleich der gemessenen maximalen Bodenbeschleunigungen (PGA) mit den Auslegungswerten der Anlage Fukushima Daini in (g)

	Ost/West		Nord/Süd		Vertikal	
	Gemessen	Auslegung	Gemessen	Auslegung	Gemessen	Auslegung
Block 1	0,234	0,442	0,259	0,442	0,311	0,522
Block 2	0,200	0,437	0,248	0,436	0,236	0,514
Block 3	0,220	0,438	0,282	0,436	0,212	0,514
Block 4	0,209	0,423	0,214	0,423	0,293	0,514

Quelle: <EPRI 2011>

Um 14:48 Uhr wurde die Leistungserzeugung durch eine automatische Reaktorschnellabschaltung in allen vier Blöcken unterbrochen. Die Betriebsmannschaft bestätigte das vollständige Einfahren der Steuerstäbe.

In Folge der automatischen Reaktorschnellabschaltung fiel der Füllstand in den RPVs der Blöcke 1-4 kurzzeitig auf einen Füllstand L-3 ab, vgl. Tabelle 3-2. Dadurch wurden unter anderem der Durchdringungsabschluss des primären Containments (PCIS) und das Abgassystem (SGTS) gestartet, und stellten den Abschluss des Sicherheitsbehälters und die erforderliche Druckstaffelung sicher. Beide Systeme arbeiteten fehlerfrei <JNTI 2011>.

Tabelle 3-2: RPV-Füllstände und ausgelöste Maßnahmen

Füllstand (mm, Wide range water level Indication)	Reaktorschutz-Signal	Maßnahme
+1.410	L-8	RCIC Abschaltung, HPCS Schließen Einspeiseventil
+1.029	L-7	Alarm „Hoher Wasserstand“
	L-5, 6	Normalwasserstand
+800	L-4	Alarm „Niedriger Wasserstand“
+321	L-3	RESA, SGTS Auslösung
-966	L-2	MSIV Schließen RCIC/HPCS Starten
-3.785	L-1	LPCS Starten ED/G Starten ADS Starten
-4.196		TAF

Quelle: <GoJ 2012>, Attachment II-5-9

3.2.1 Auswirkungen auf die externe Stromversorgung

Unmittelbar nach dem Erdbeben, um etwa 14:48 Uhr wurde die Linie Tomioka 2 unterbrochen. Ursache waren Schäden in der Umschalteneinrichtung in Shin-Fukushima, etwa 7 km nordwestlich des Standorts. Aufgrund der instandhaltungsbedingten Abschaltung der Linie Iwaido 1 standen damit zunächst noch zwei Leitungen des externen Stromnetzes zur Verfügung.

Bei einer Überprüfung in der Umschalteneinrichtung Shin-Fukushima wurden weitere Schäden an der Linie Iwaido 2 entdeckt, was gegen 15:50 Uhr zur Abschaltung dieser Anbindung durch das Netzmanagement des Betreibers TEPCO führte. Diese Linie wurde erst am 12.03.2011 gegen 13:38 Uhr wieder verfügbar. Am 13.03 um 5:15 Uhr wurde auch die Linie Iwaido 1 wieder verfügbar gemacht.

Ab 15:50 Uhr am 11.03.2011 bis 13:38 Uhr am 12.03.2011 stand daher nur die Linie Tomioka 1 zur externen Versorgung der Anlage mit Strom zur Verfügung. Auch diese Versorgung war relativ instabil, es kam gelegentlich zu kurzen Unterbrechungen, die sich beispielsweise im Verlust der Beleuchtung der Wartenräume bemerkbar machte.

In allen vier Blöcken des Standorts konnte damit jedoch die Eigenbedarfsversorgung über das externe Netz aufrechterhalten werden. Dadurch kam es nicht zu einem Ausfall der Hauptwärmesenke. Nach dem Erdbeben wurde bis zum Eintreffen des Tsunami die Wärme aus dem Reaktor über die Frischdampfleitungen und die Frischdampfumleitstation in den Hauptkondensator abgeführt, die Bespeisung des RPV zur Füllstandshaltung erfolgte über das Hauptspeisewassersystem.

3.2.2 Auswirkungen auf das Sicherheitssystem

In Block 1 fiel durch das Erdbeben ein Umformer zur Versorgung der gesicherten 120 V Wechselstromschiene durch die Batterien aus <GoJ 2012>. Darüber hinaus funktionierten die Einrichtungen des Sicherheitssystems auslegungsgemäß.

3.3 Auswirkungen des Tsunami

Ab ca. 15:22 Uhr erreichte der Tsunami den Standort Fukushima Daini. In der Folge überschwemmten mehrere Wellen das Anlagengelände. Es erreichten bis 17:44 Uhr an diesem Tag Tsunamis das Anlagengelände <JNSI 2012>.

Die ursprüngliche Auslegung der Anlage Fukushima Daini erfolgte auf der gleichen Basis wie diejenige der Anlage Fukushima Daiichi. Basierend auf dem größten historisch aufgezeichneten Wasserstand beim durch das Chile Erdbeben von 1960 ausgelösten Tsunami war als Auslegungswert ein Wasserstand von O.P. +3,1 m festgelegt worden <TEPCO 2012>.

Dieser Wert war für die Anlage Fukushima Daini auf Basis von Empfehlungen der japanischen Society of Construction Engineers im Jahr 2002 auf einen Tsunami mit einer Höhe von O.P. +5,2 m angehoben worden <JNTI 2011>. Hierzu wurden unter anderem eine Nachrüstung von wasserdichten Türen und eine Abdichtung von Durchdringungen in den Nebenkühlwassergebäuden vorgenommen <JNSI 2012>.

Während sich die Nebenkühlwassergebäude Hx/B auf einer Höhe von O.P. +4 m befinden, befinden sich die Reaktorgebäude auf einer Höhe von O.P. +12 m.

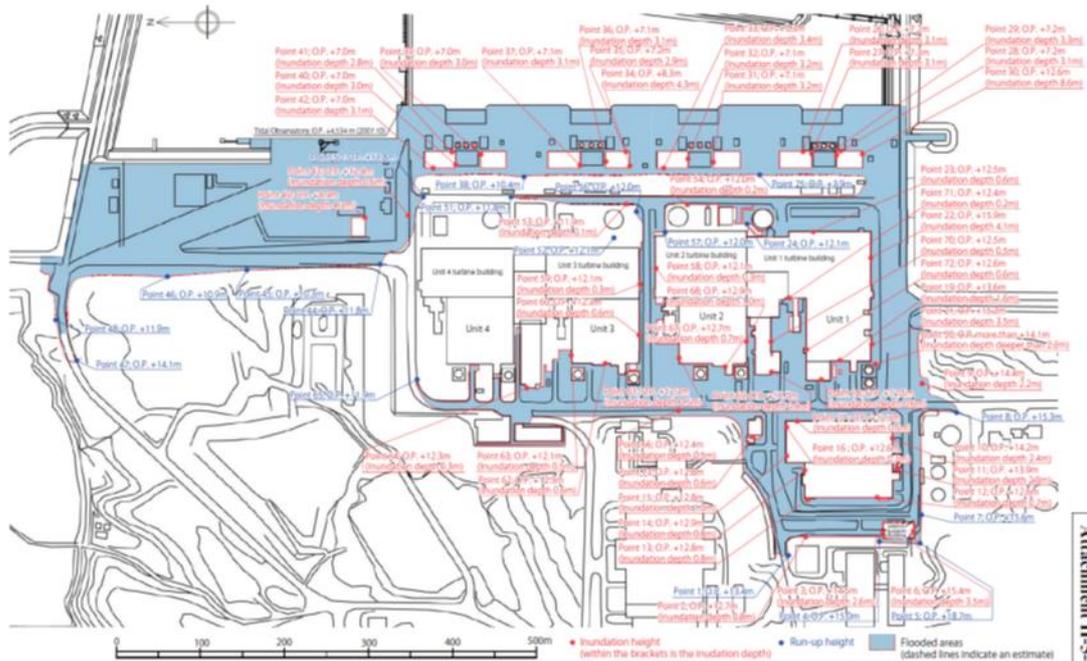
Die maximale Höhe der einlaufenden Tsunamiwellen vor der Küste am Standort Fukushima Daini wurde mit O.P. +9,1 m abgeschätzt <GoJ 2011b>.

Die unmittelbar an der Küste gelegenen Bereiche der Nebenkühlwassergebäude mit einer Höhe von O.P. +4 m wurden überflutet, vergleiche Abbildung 3-1. Für diesen Bereich wurden die Überflutungshöhen mit Werten zwischen O.P. +7 und +8,9 m abgeschätzt.

Dies führte zu einer Überflutung fast aller Nebenkühlwassergebäude Hx/B. Lediglich eines der beiden Hx/B von Block 3 wurde nicht überflutet <EPRI 2011>.

Alle Kellergeschosse der übrigen Hx/B wurden geflutet, die Erdgeschosse dieser Gebäude wurden bis ca. 2 m Wasserhöhe überschwemmt. Im Bereich des südlichen Nebenkühlwassergebäudes von Block 1 wurden auch Überflutungsspuren im ersten Stock des Gebäudes festgestellt.

Abbildung 3-1: Überflutungshöhen auf dem Standort Fukushima Daini



Quelle: <GoJ 2012>, Attachment II-5-6

Das eigentliche Anlagengelände mit einer Höhe von O.P. +12 m wurde durch den Tsunami nicht direkt überschwemmt. Im südlichen Bereich der Anlage kam es jedoch über eine in Ost-West-Richtung führende Straße zu einem erheblichen Anstieg des auflaufenden Wassers, so dass über die Rückseite von Block 1 schließlich auch das Anlagengelände überschwemmt wurde. Dies führte im Bereich von Block 1 zu Wasserständen von bis zu O.P. +15,9 m, entsprechend einer Überflutungshöhe von bis zu 4,1 m, im Bereich der Blöcke 2 bis 4 von bis zu 1 m. Auch das Erdgeschoss des Gebäudes des Krisenstabs (Seismic Isolation Building) im südlichen Bereich des Anlagengeländes wurde überflutet.

3.3.1 Auswirkungen auf die Stromversorgung

Die im zweiten Untergeschoß des R/B Annex untergebrachten drei Notstromdiesel (1A, 1B und 1H) des Blocks 1 wurden aufgrund eindringenden Wassers unverfügbar. Die Notstromdiesel der übrigen Reaktorblöcke waren nicht unmittelbar von der Überflutung betroffen. Aufgrund des Ausfalls der jeweiligen Notstromdiesel-Kühlsysteme (siehe Kap. 3.3.2) standen jedoch die drei Notstromdiesel von Block 2, einer von Block 3 und zwei von Block 4 nicht zur Verfügung, vergleiche Tabelle 3-3.

Tabelle 3-3: Verfügbarkeit der Notstromdiesel ED/G in Fukushima Daini nach dem Tsunami

Block 1		Block 2		Block 3		Block 4	
Einheit	Lage	Einheit	Lage	Einheit	Lage	Einheit	Lage
1A	R/B Ann. 2 UG	2A	R/B Ann. 2 UG	3A	R/B Ann. 2 UG	4A	R/B Ann. 2 UG
1B	R/B Ann. 2 UG	2B	R/B Ann. 2 UG	3B	R/B Ann. 2 UG	4B	R/B Ann. 2 UG
1H	R/B Ann. 2 UG	2H	R/B Ann. 2 UG	3H	R/B Ann. 2 UG	4H	R/B Ann. 2 UG

Quelle: <GoJ 2012>, Attachment II-5-7

Rot: durch Überflutung direkt geschädigt, Orange: aufgrund fehlender Kühlung unverfügbar

Die zu den jeweiligen Notstromschienen zugehörigen Notstrom-Schaltanlagen M/Cs befinden sich im ersten Untergeschoss im R/G Annex. Von den zugehörigen Elektronikschränken (P/Cs) befinden sich zwei ebenfalls im ersten Untergeschoss des R/G Annex, zwei weitere im Erdgeschoss der Nebenkühlwassergebäude Hx/B.

In Block 1 waren zwei der M/Cs durch die Überflutung unverfügbar, die übrigen Blöcke waren nicht betroffen, vergleiche Tabelle 3-4.

Tabelle 3-4: Verfügbarkeit der Notstrom-Schaltanlagen M/C in Fukushima Daini nach dem Tsunami

Block 1		Block 2		Block 3		Block 4	
Einheit	Lage	Einheit	Lage	Einheit	Lage	Einheit	Lage
1C	R/B Ann. 1 UG	2C	R/B Ann. 1 UG	3C	R/B Ann. 1 UG	4C	R/B Ann. 1 UG
1D	R/B Ann. 1 UG	2D	R/B Ann. 1 UG	3D	R/B Ann. 1 UG	4D	R/B Ann. 1 UG
1H	R/B Ann. 1 UG	2H	R/B Ann. 1 UG	3H	R/B Ann. 1 UG	4H	R/B Ann. 1 UG

Quelle: <GoJ 2012>, Attachment II-5-7

Rot: durch Überflutung direkt geschädigt.

Von den in den R/G Annexen untergebrachten P/Cs wurde lediglich in Block 1 einer unverfügbar, vergleiche Tabelle 3-5. Dagegen wurden bis auf einen Elektronikschrank des Blocks 3 alle P/Cs in den Nebenkühlwassergebäuden durch Überschwemmung unverfügbar.

Tabelle 3-5: Verfügbarkeit der Notstrom-Elektroniksschränke P/C in Fukushima Daini nach dem Tsunami

Block 1		Block 2		Block 3		Block 4	
Einheit	Lage	Einheit	Lage	Einheit	Lage	Einheit	Lage
Versorgung der Einrichtungen im Reaktorgebäude							
1C-1	R/B Ann. 1 UG	2C-1	R/B Ann. 1 UG	3C-1	R/B Ann. 1 UG	4C-1	R/B Ann. 1 UG
1D-1	R/B Ann. 1 UG	2D-1	R/B Ann. 1 UG	3D-1	R/B Ann. 1 UG	4D-1	R/B Ann. 1 UG
Versorgung der Einrichtungen in den Nebenkühlwassergebäuden							
1C-2	Hx/B EG.	2C-2	Hx/B EG.	3C-2	Hx/B EG.	4C-2	Hx/B EG.
1D-2	Hx/B EG.	2D-2	Hx/B EG.	3D-2	Hx/B EG.	4D-2	Hx/B EG.

Quelle: <GoJ 2012>, Attachment II-5-7

Rot: durch Überflutung direkt geschädigt.

Die in den Wartengebäuden C/B untergebrachten Schaltanlagen und Elektroniksschränke der Eigenbedarfsversorgung wurden durch den Tsunami nicht beeinträchtigt.

Auch waren die Eigenbedarfstransformatoren vom Tsunami nicht beeinträchtigt und damit für die gesamte Zeit des Unfallablaufs verfügbar <JNSI 2012>.

Obwohl viele Notstromdiesel des Standorts entweder direkt oder indirekt durch den Tsunami un verfügbar wurden, konnte die elektrische Energieversorgung der Verbraucher damit durch das externe Netz weitgehend aufrechterhalten werden.

Die Wechselstromversorgung der Einrichtungen in Strang A des Blocks 1 wurden aufgrund des Ausfalls der Schaltanlagen 1C und des Elektroniksschranks 1C-1 un verfügbar, siehe Tabelle 3-4 und Tabelle 3-5. In diesem Strang war damit für die sicherheitstechnisch wichtigen Verbraucher nur die batteriegestützte Versorgung vorhanden. Da, wie in Kap. 3.2.2 festgestellt, ein Umformer zur Versorgung der gesicherten 120 V Wechselstromschiene erdbebenbedingt ausgefallen war, wurde diese Schiene der Redundanz A des Blocks 1 damit ebenfalls Stromlos.

Die Versorgung der 125 V Gleichstromschiene der Redundanz A durch die Batterien wurde um 17:35 Uhr durch ein Reserve-Batterieladegerät abgelöst, diejenige der 250 V Gleichstromschiene gegen 18:05 Uhr.

Weiterhin fiel die Versorgung der Einrichtungen in den Nebenkühlwassergebäuden Hx/B von Block 1, 2 und 4 vollständig und von Block 3 in Redundanz C aus, siehe Tabelle 3-5.

Die Wechselstromversorgung und die Gleichstromversorgung aller übrigen Stränge der Blöcke 1-4 blieben ohne Unterbrechung verfügbar.

Aufgrund der Überflutung des Seismic Isolation Building fiel weiterhin die elektrische Energieversorgung des Krisenstabs aus. Davon war auch ein von einer Gasturbine getriebener Notfallgenerator betroffen <JNSI 2012>. Zur Wiederherstellung der elektrischen Energieversorgung des Krisenstabs wurde ein Kabel vom Administrationsgebäude zum Seismic

Isolation Building geführt. So konnte zwischen 18:00 und 19:00 Uhr die Stromversorgung des Krisenstabs wiederhergestellt werden.

3.3.2 Beeinträchtigung der Kühlsysteme

Die Nachkühlsysteme RHR in der Anlage Fukushima Daini wurden primär durch den Ausfall der Zwischen- und Nebenkühlwasserpumpen aufgrund direkter Schäden durch den Tsunami oder aufgrund des Ausfalls ihrer elektrischen Energieversorgung beeinträchtigt. Da sich diese Einrichtungen weitgehend in den Nebenkühlwassergebäuden Hx/B befanden, waren diese Einrichtungen durch den Tsunami stark betroffen.

Die vier Pumpen des Zwischenkühlsystems RHRC des Blocks 2 sowie die Pumpe der Redundanz B des Sicherheitskomponenten-Kühlsystems EECW von Block 2 und Block 4 befanden sich aus Platzgründen im ersten Stock des jeweiligen Gebäudes. Alle anderen Pumpen der Zwischenkühlsysteme RHRC, der Nebenkühlwassersysteme RHRS und der Sicherheitskomponenten-Kühlsystems EECW sowie die zugehörigen Elektronikschränke befanden sich im Erdgeschoss der Nebenkühlwassergebäude Hx/B. Dabei waren jeweils zwei Pumpen des Zwischen-, zwei Pumpen des Nebenkühlwasser- und eine Pumpe des Sicherheitskomponenten-Kühlsystems, die jeweils einer Redundanz des Nachwärmeabfuhrsystems RHR zugeordnet sind, gemeinsam im nördlichen bzw. im südlichen Gebäude untergebracht.

In Block 1 wurden alle Pumpen des RHRC sowie die Pumpen des EECW durch Wasserschäden an den Motoren un verfügbar, vergleiche Tabelle 3-6. Die Pumpen des RHRS waren zwar funktionsfähig, da jedoch beide zugehörigen Elektronikschränke un verfügbar waren, konnten sie nicht mehr elektrisch versorgt werden, siehe auch Tabelle 3-5.

In Block 2 wurden drei der RHRS-Pumpen und eine EECW-Pumpe durch Motorschäden un verfügbar. Neben einer RHRS-Pumpe blieben auch die vier RHRC-Pumpen sowie eine EECW-Pumpe, die im ersten Stock untergebracht waren, intakt. Da jedoch auch beide zugehörigen Elektronikschränke von Block 2 un verfügbar waren, konnten sie nicht mehr elektrisch versorgt werden, siehe auch Tabelle 3-5.

In Block 3 blieben alle im südlichen Gebäude aufgestellten Pumpen des RHRC, des RHRS und des EECW verfügbar. Diese konnten auch elektrisch versorgt werden, so dass die Redundanz B des Nachkühlsystems RHR un unterbrochen zur Verfügung stand. Die im nördlichen Hx/B-Gebäude aufgestellten Pumpen des RHRC sowie die EECW-Pumpe wurden un verfügbar. Außerdem war der zugehörige Elektronikschrank 3C-2 un verfügbar, was zu einer Unverfügbarkeit der Pumpen des RHRS in der Redundanz A/C führte. Damit war eine Kühlung der Einrichtungen des Nachkühlsystems RHR in der Redundanz A in Block 3 nicht mehr möglich.

In Block 4 fielen bis auf eine Pumpe des RHRS und eine im ersten Stock des Gebäudes untergebrachte EECW-Pumpe alle anderen Pumpen aus. Da auch beide Elektronikschränke un verfügbar waren, standen auch die beiden nicht beschädigten Pumpen nicht zur Verfügung.

Tabelle 3-6: Verfügbarkeit der Einrichtungen in den Nebenkühlwasserbauwerken Hx/B in Fukushima Daini nach dem Tsunami

Block 1		Block 2		Block 3		Block 4	
Nord	Süd	Nord	Süd	Nord	Süd	Nord	Süd
Pumpen des Zwischenkühlsystems RHRC							
(B)	(A)	(A)	(B)	(A)	(B)	(A)	(B)
(D)	(C)	(C)	(D)	(C)	(D)	(C)	(D)
Pumpen des Nebenkühlwassersystems RHRS							
(B)	(A)	(A)	(B)	(A)	(B)	(A)	(B)
(D)	(C)	(C)	(D)	(C)	(D)	(C)	(D)
Pumpen des Sicherheitskomponenten-Kühlsystems EECW							
(B)	(A)	(A)	(B)	(A)	(B)	(A)	(B)

Quelle: <GoJ 2012>, Tabelle II-5-1

Rot: durch Überflutung direkt geschädigt. Orange: aufgrund fehlender Stromversorgung unverfügbar

3.4 Kurzfristige Maßnahmen des Betriebspersonals

Das Schichtpersonal löste in Reaktion auf tsunamibedingte Schäden gemäß den Vorgaben des Betriebshandbuchs (AOP) in Block 1 um 15:36 Uhr, in Block 2 um 15:34 Uhr, in Block 3 um 15:37 Uhr und in Block 4 um 15:36 Uhr manuell das Schließen der Frischdampfabschlussventile (MSIV) aus. Damit war der RPV in allen vier Blöcken vom Maschinenhaus isoliert.

Aufgrund des Druckanstiegs im RPV öffneten in Block 1 um 15:55 Uhr, in Block 2 um 15:41 Uhr sowie in den Blöcken 3 und 4 um 15:46 Uhr automatisch die Druckentlastungsventile. In der Folge wurden diese in allen vier Blöcken von der Betriebsmannschaft zur Druckkontrolle mehrfach manuell geöffnet und geschlossen.

Unmittelbar nach dem Tsunami meldeten die Schichtleiter der Blöcke 1 und 2 sowie 3 und 4 die Unverfügbarkeit der Nachwärmeabfuhrsysteme RHR in den Blöcken 1, 2 und 4. Auch wenn der genaue Schadensumfang an den Einrichtungen in den Nebenkühlwassergebäuden Hx/B aufgrund der Gefahr weiterer Tsunamis zunächst nicht vor Ort festgestellt werden konnte, meldete der Betreiber daraufhin um ca. 18:45 Uhr gemäß Artikel 10 § 1 des japanischen Kernenergiegesetzes einen nuklearen Notfall (loss of heat removal function).

Gegen 17:35 Uhr meldete der Schichtleiter der Blöcke 1 und 2 das Anstehen zweier Signale, die auf ein Leck im Sicherheitsbehälter in Block 1 hindeuten könnten. So stand einerseits das Signal „hoher Druck im Sicherheitsbehälter“ an, andererseits wurde bereits gegen 15:37 Uhr das Signal zum „Schließen der Frischdampfabschlussventile aufgrund eines niedrigen Füllstands im Reaktordruckbehälter“ ausgelöst. In der Kombination dieser beiden Signale wurde vom Betreiber die Möglichkeit eines kleinen Lecks innerhalb des Sicherheitsbehälters nicht ausgeschlossen.

Entsprechend wurde um 17:50 Uhr gemäß Artikel 10 § 1 des japanischen Kernenergiegesetzes ein nuklearer Notfall (reactor coolant leakage) gegenüber den Behörden gemeldet. Gegen

18:33 Uhr wurde diese Meldung revidiert, da bei einer Überprüfung weiterer Anzeigen kein Ansteigen der Radioaktivität im Sicherheitsbehälter festgestellt werden konnte. Das Anstehen des Signals zum „Schließen der MSIV“ wird mittlerweile damit erklärt, dass es zu einer Unterbrechung der Stromversorgung der gesicherten 120 V Wechselstromversorgung in der Redundanz A von Block 1 gekommen ist, was ebenfalls zu einem fehlerhaften Anstehen des Signals führt, vergleiche Kap. 3.3.1 sowie Attachment II-5-12 in <GoJ 2012>.

3.4.1 Blöcke 1 und 2

In Block 1 und 2 war nach dem manuellen Schließen der MSIV auch die Bespeisung des RPV durch das Hauptspeisewassersystem unterbrochen.

Aufgrund der in Kap. 3.3 dargestellten Schäden konnte das Nachkühlsystem RHR nicht in Betrieb genommen werden. Daher nahm die Schichtmannschaft in Block 1 um ca. 15:36 Uhr und in Block 2 um ca. 15:43 Uhr das Hochdruck-Nachspeisesystem RCIC von Hand in Betrieb. Damit konnte der Füllstand im RPV durch eine Einspeisung von Wasser aus dem CST gehalten werden.

Da das Hochdruck-Kernsprühsystem HPCS wegen fehlender Stromversorgung in beiden Blöcken nicht verfügbar war, hätte bei einem Ausfall des RCIC keine weitere Möglichkeit zur Bespeisung des RPV bestanden. Die Schichtmannschaft beschloss daher, begleitend zum Betrieb des RCIC eine Druckabsenkung des RPV in einen Druckbereich mit der Möglichkeit zur Bespeisung durch alternative Niederdrucksysteme durchzuführen.

Als Niederdruck-Einspeisemöglichkeit wurde die Einspeisung mittels des Zusatzwasser-Kondensatsystems MUWC über Leitungen des RHR vorgesehen. Diese Einspeisemöglichkeit war im Rahmen von Notfallmaßnahmen vorgeplant. Andere Einspeisemöglichkeiten (über das Feuerlöschsystem, die Steuerstabantriebe, das Boreinspeisesystem oder das Speisewassersystem) boten aufgrund der begrenzten Wasservorräte nur eine zeitlich stark limitierte Einspeisemöglichkeit, so dass der Einspeisung über das MUWC Vorrang gewährt wurde.

Die für eine Niederdruck-Einspeisung notwendige Druckabsenkung des RPV über die Sicherheits- und Entlastungsventile SRV in die Kondensationskammer S/C führt dort zu einem Druck- und Temperaturanstieg. Da keine Kühlmöglichkeit für die S/C verfügbar war, konnte ein solcher Temperaturanstieg nicht verhindert werden. Damit bestand die Möglichkeit, dass die Kühl- und Druckabbaufunktion der S/C aufgrund hohen Drucks und hoher Temperatur verloren gehen könnte, bevor der Reaktor in den Niederdruckbereich abgesenkt werden könnte. Das Sichtpersonal kontrollierte daher regelmäßig Druck und Temperatur in der S/C und teilte diese Werte auch dem Krisenstab mit.

Zunächst wurde der Druck im RPV auf ca. 1 MPa(gage) abgesenkt, so dass ein Weiterbetrieb des RCIC möglich war. Bei der kontrollierten Druckabsenkung des RPV wurde ein in den Betriebsunterlagen AOP sowie EOP vorgegebener Abkühlgradient von 55°C für die Kühlmitteltemperatur eingehalten.

Durch den Austrag von Dampf aus dem RPV in die S/C kam es zu einem Anstieg des S/C-Füllstands. In Block 2 wurde um 15:52 Uhr ein hoher S/C-Füllstand (für Block 2: +5 cm) signalisiert, in Block 1 um ca. 21:50 Uhr (für Block 1: +70 cm). Gemäß den Angaben in den EOP soll der Betrieb des RCIC bei einem hohen Füllstand in der S/C von der Förderung aus dem Kondensatvorratsbehälter CST auf eine Förderung aus der S/C umgeschaltet werden, um einen weiteren Füllstandsanstieg in der S/C zu vermeiden. Das Betriebspersonal war sich bewusst, dass eine solche Umschaltung sich bei fehlendem RHR negativ auf die Druckabbaufähigkeit der S/C

auswirken würde. Dennoch wurde entsprechend der Anforderungen der EOP in Block 2 um 19:44 Uhr und in Block 1 zwischen 21:53 und 21:56 Uhr die Umschaltung des RCIC durchgeführt.

3.4.1.1 RPV-Druckabsenkung und Niederdruck-Einspeisung in Block 1

Für die Niederdruck-Einspeisung mit dem MUWC in den RPV müssen ein Verbindungsventil zwischen dem MUWC und der Redundanz A des RHR sowie die Einspeiseventile des RHR in den RPV geöffnet werden, vergleiche Kap. 2.2.3.1. Diese Ventile sind grundsätzlich von Hand sowie bei vorhandener Stromversorgung auch elektromotorisch durch Ansteuerung von der Warte aus zu öffnen.

Die Einrichtungen der Redundanz A des Blocks 1 konnten nicht elektrisch versorgt werden. Um die Einspeisung über das MUWC von der Warte aus steuern zu können, beschloss der Schichtleiter daher, eine Querverbindung zwischen den Leitungen der Redundanzen A und B des RHR herzustellen und damit eine Einspeisemöglichkeit aus dem MUWC über die Redundanz B des RHR zu eröffnen. Hierzu wurden zwischen 22:09 Uhr und 22:36 Uhr vom Betriebspersonal die im zweiten Stockwerk des Reaktorgebäudes befindlichen Abschlussarmaturen einer Dekontaminations-Verbindungsleitung zwischen den Redundanzen A und B des RHR von Hand geöffnet. Damit bestand eine Verbindung aus dem MUWC über die Rohrleitungen des RHR von der Redundanz A über die Redundanz B bis zum RPV. Die Armaturen in den Leitungen in Redundanz B des RHR konnten aufgrund der verfügbaren elektrischen Energieversorgung durch Ansteuerung von der Warte aus verfahren werden.

Nachdem der Reaktordruck über die SRV auf unter 1 MPa(gage) abgesenkt worden war, überprüfte die Schichtmannschaft die Möglichkeit der Einspeisung mit dem MUWC begleitend zum Betrieb des RCIC. Hierzu wurden zwischen 23:34 Uhr und 23:58 Uhr viermal die Einspeisearmaturen der Redundanz B des RHR geöffnet. Erst als um 23:58 Uhr der Reaktordruck auf unter ca. 0,65 MPa(gage) abgesenkt worden war, konnte eine erfolgreiche Einspeisung mit dem MUWC aufgrund eines beobachteten Anstiegs im Reaktorfüllstand bestätigt werden. Durch zwei weitere Einspeiseversuche wurde diese Möglichkeit in den folgenden Minuten verifiziert.

Zu diesem Zeitpunkt entschied der Schichtleiter, die Bespeisung des RPV mit dem RCIC solange aufrecht zu erhalten, bis die Druckabbaufähigkeit der Kondensationskammer aufgrund zu hoher Temperaturen nicht länger gegeben wäre. Für einen Reaktordruck von 1 MPa(gage) ist hierzu in den EOP eine Kondensationskammertemperatur von 96°C festgelegt. Unter diesen Bedingungen ist dann laut EOP bei Verfügbarkeit einer Einspeisung mittels Niederdrucksystemen eine schnelle Druckentlastung mittels SRV einzuleiten und die weitere Einspeisung über Niederdrucksysteme vorzunehmen.

Als am 12.03. um ca. 3:48 Uhr eine S/C-Temperatur von 96°C erreicht wurde, öffnete die Schichtmannschaft daher erneut die Einspeisearmaturen des RHR und kontrollierte die erfolgreiche Einspeisung mit dem MUWC. Dann begann sie eine schnelle Druckentlastung über die SRV durchzuführen. Damit wurde der Reaktordruck bis 4:56 Uhr auf ca. 0,33 MPa(gage) abgesenkt. Um 4:58 Uhr schloss das Schichtpersonal dann die Isolationsarmaturen in den Frischdampfleitungen des RCIC.

Ab diesem Zeitpunkt wurde intermittierend bis zum 14.03. eine Einspeisung mit dem MUWC in den RPV des Blocks 1 aufrechterhalten.

3.4.1.2 RPV-Druckabsenkung und Niederdruck-Einspeisung in Block 2

Anders als in Block 1 war in Block 2 die elektrische Versorgung der Einrichtungen des RHR sowohl in Redundanz A wie in Redundanz B vorhanden. Die Schichtmannschaft senkte daher bis ca. 21:25 Uhr den Reaktordruck über die SRV kontrolliert auf unter 0,7 MPa(gage) ab. Durch kurzzeitiges Öffnen des Verbindungsventils zwischen MUWC und RHR und der Abschlussarmaturen des RHR um 21:25 Uhr und 21:36 Uhr verifizierte die Mannschaft anhand des steigenden Füllstands im RPV eine erfolgreiche Einspeisung aus dem MUWC.

Danach hielt sie auch in Block 2 noch den Betrieb des RCIC bis ca. 4:50 Uhr am 12.03. aufrecht. Als der Reaktordruck zu diesem Zeitpunkt auf ca. 0,36 MPa(gage) abgefallen war, öffnete die Mannschaft die Einspeisung durch MUWC. Etwa drei Minuten später wurde das RCIC durch den damit verbundenen Druckabfall auf einen Wert unter 0,34 MPa(gage) automatisch gestoppt.

Ab diesem Zeitpunkt wurde intermittierend bis zum 14.03. eine Einspeisung mit dem MUWC in den RPV des Blocks 2 aufrechterhalten.

3.4.2 Blöcke 3 und 4

Von den automatisch gestarteten Notstromdieseln standen nach dem Tsunami noch die Notstromdiesel der Schienen B und H von Block 3 sowie H von Block 4 zur Verfügung. Alle anderen Diesel der vier Blöcke waren entweder aufgrund direkter Tsunamischäden oder aufgrund des Ausfalls der Kühlsysteme unverfügbar, vgl. Tabelle 3-3. Da der Krisenstab befürchtete, dass es Probleme beim Wiederanfahren der Notstromdiesel nach einer Abschaltung geben könnte, wurden die noch in Betrieb befindlichen Diesel vorläufig weiterbetrieben. Die Versorgung der verschiedenen verfahrenstechnischen Einrichtungen war jedoch durch das externe Netz sichergestellt. Eine Anforderung an die Notstromdiesel bestand zu keinem Zeitpunkt während des Ereignisablaufs.

3.4.2.1 Weiteres Vorgehen in Block 3

Der Schichtleiter von Block 3 stellte fest, dass Strang A des Nachkühlsystems RHR und der erforderliche Zwischen- und Nebenkühlwasserstrang auch nach dem Tsunami noch verfügbar war. Damit bestand die Möglichkeit, den Reaktor in den Zustand „kalt, unterkritisch“ zu überführen. Dazu soll gemäß den Betriebsunterlagen das RHR in der Betriebsweise Stillstandskühlen, vergleiche Kap. 2.2.2.3, betrieben werden.

Als Voraussetzung für diese Betriebsweise muss der Druck im Kühlsystem in den Niederdruckbereich abgesenkt werden. Dazu wurde eine Druckentlastung des Reaktordruckbehälters über die Sicherheits- und Entlastungsventile in die Kondensationskammer vorgenommen. Da sich dabei die Kondensationskammer aufheizte, ordnete der Schichtleiter um ca. 15:36 Uhr zunächst einen Betrieb des RHR zum Kondensationskammerkühlen an. Ein Druck- und Temperaturentwurf in der S/C, der die Druckabbaufähigkeit der S/C gefährden würde, war daher in Block 3, anders als in den Blöcken 1, 2 und 4 nicht zu befürchten.

Um 16:06 Uhr wurde weiterhin das RCIC zur Einspeisung in den RPV von Hand in Betrieb genommen. Auch das Hochdruck-Kernsprühsystem HPCS war als alternatives Hochdrucksystem zur Füllstandshaltung grundsätzlich verfügbar, musste jedoch in der Folge nicht eingesetzt werden.

Um 16:12 Uhr wurde ein hoher Füllstand der S/C (+5 cm) signalisiert. Daraufhin wurde um 18:31 Uhr das RCIC von einer Förderung aus dem CST auf eine Förderung aus der S/C umgeschaltet. Da die S/C kontinuierlich durch das RHR gekühlt wurde, war in Block 3 auch keine damit verbundene stärkere Aufheizung der S/C zu befürchten.

Um bei einer Druckabsenkung eine Einspeisemöglichkeit zur Verfügung zu haben, während das RHR in der Betriebsweise Kondensationskammerkühlen betrieben wird, wurde auch in Block 3 die Niederdruck-Einspeisung mittels des MUWC vorgesehen. Erst nach erfolgreicher Druckabsenkung sollte dann das RHR in die Betriebsweise Stillstandskühlen umgeschaltet werden.

Gegen 22:53 Uhr erreichte der Reaktordruck einen Wert von 0,8 MPa(gage). Zu diesem Zeitpunkt öffnete die Schichtmannschaft kurzzeitig die Einspeiseleitungen aus dem MUWC über das RHR in den RPV und verifizierte aufgrund des steigenden Füllstands im RPV die erfolgreiche Einspeisung. Danach wurde die Einspeisung über das RCIC noch bis ca. 23:11 Uhr fortgesetzt. Dann stoppte die Schichtmannschaft das RCIC aufgrund des niedrigen Reaktordrucks und nahm um 23:15 Uhr die Niederdruck-Einspeisung mittels MUWC in Betrieb. Die Einspeisung über MUWC wurde bis 12:15 Uhr am 12.03. intermittierend aufrechterhalten.

Bereits am 12.03. um 1:23 Uhr waren Druck und Temperatur im RPV soweit abgesenkt, dass eine Umschaltung des Nachkühlsystems auf Stillstandskühlung möglich wurde. Hierzu schaltete die Betriebsmannschaft das System ab und versuchte, die entsprechenden Armaturen in den RHR-Leitungen zu den Umwälzschleifen des RPV zu öffnen. Bereits seit 19:46 Uhr des Vortages stand jedoch ein Reaktorschutzsignal „Hoher Druck in der Druckkammer“ an, welches von der Betriebsmannschaft bis zu diesem Zeitpunkt nicht wahrgenommen worden war. Da die Armaturen des RHR-Systems zur Entnahme aus und Einspeisung in die Kühlmittelumwälzschleifen des RPV Bestandteil des Durchdringungsabschlusses sind, waren sie durch dieses anstehende Signal verriegelt und konnten zunächst nicht geöffnet werden.

Daraufhin nahm das Personal das RHR-System zunächst ab 2:39 Uhr wieder in der Funktionsweise Kondensationskammerkühlen in Betrieb. In der Folge überprüfte das Personal die weiteren Wartenanzeigen auf die Möglichkeit eines Kühlmittelverlusts innerhalb der Druckkammer, schloss diese Möglichkeit jedoch aufgrund fehlender weiterer Signale aus. Daraufhin setzte das Personal die Verriegelung der Armaturen des RHR-Systems zurück, schaltete das System um 7:59 Uhr ab und nahm es um 9:37 Uhr in der Funktion Stillstandskühlen wieder in Betrieb.

Auf diese Weise wurde bis 12:15 Uhr am 12.03. der Zustand „Kalt unterkritisch“ erreicht und konnte in der Folge auch aufrechterhalten werden.

3.4.2.2 RPV-Druckabsenkung und Niederdruck-Einspeisung in Block 4

Um 15:54 Uhr wurde in Block 4 das RCIC zur Einspeisung in den RPV von Hand in Betrieb genommen. Auch das Hochdruck-Kernsprühsystem HPCS war als alternatives Hochdrucksystem zur Füllstandshaltung grundsätzlich verfügbar.

Da beide Stränge des RHR für die Nachwärmeabfuhr in Block 4 unverfügbar waren bereitete die Schichtmannschaft entsprechend der Vorgehensweise in den Blöcken 1 und 2 eine Niederdruck-Einspeisung über das MUWC bei gleichzeitiger Füllstandshaltung mit RCIC und Druckabsenkung mit den SRV vor.

Um 15:51 Uhr wurde ein hoher Füllstand der S/C (+5 cm) signalisiert. Daraufhin wurde um 18:13 Uhr das RCIC von einer Förderung aus dem CST auf eine Förderung aus der S/C umgeschaltet.

Aufgrund der Unverfügbarkeit der Notstromdiesel der Redundanzen A und B und der instabilen Versorgung über die externe Leitung Tomioka 1L bereitete sich das Schichtpersonal ebenfalls auf die Möglichkeit eines vollständigen Verlusts der Wechselstromversorgung (SBO) vor. In den zugehörigen AOP für einen SBO entdeckte die Schichtmannschaft daraufhin eine von ihr bis dahin nicht wahrgenommene Anweisung. Danach soll das RCIC unter den Bedingungen eines SBO bei

einer Temperatur von über 60°C in der S/C auch bei Anstehen eines Signals „Hoher Füllstand in der S/C“ nicht auf Förderung aus der S/C umgeschaltet werden, sondern weiterhin auf Förderung aus dem CST verbleiben. Als Grundlage dafür ist in den AOP als zulässiger Wert für die Kühlung der Schmierölversorgung des RCIC ein Temperaturlimit der S/C von 60°C angegeben.

Nach Diskussionen in der Schichtmannschaft, ob diese Anweisung auch unter den hier vorliegenden Bedingungen einer Temperatur von ca. 70°C in der S/C aufgrund eines Ausfalls des RHR auch ohne Eintreten eines SBO anzuwenden sei, kam die Mannschaft zu dem Schluss, dass zum Erhalt der Funktionsfähigkeit des RCIC eine Förderung aus dem CST zu wählen sei. Gegen 23:19 Uhr wurde daher erneut eine Umschaltung des RCIC, diesmal von der S/C auf den CST vorgenommen.

Gegen 23:23 Uhr erreichte der Reaktordruck einen Wert von 0,8 MPa(gage). Zu diesem Zeitpunkt öffnete die Schichtmannschaft kurzzeitig die Einspeiseleitungen aus dem MUWC über das RHR in den RPV und verifizierte aufgrund des steigenden Füllstands im RPV die erfolgreiche Einspeisung. Danach wurde die Einspeisung über das RCIC noch bis ca. 0:16 Uhr am 12.03. fortgesetzt. Zu diesem Zeitpunkt fiel der Reaktordruck unter einen Wert von ca. 0,37 MPa(gage) und das RCIC wurde automatisch abgeschaltet. Etwa zum gleichen Zeitpunkt nahm das Personal die Niederdruck-Einspeisung mittels MUWC in Betrieb.

Durch die kontinuierliche Einspeisung mit MUWC fiel der Füllstand im Kondensatvorratsbehälter CST von anfänglich 8,7 m bis 12:30 Uhr am 12.03. auf ca. 4,2 m. Auf dem Anlagengelände von Fukushima Daini befinden sich zwei Frischwasservorratsbehälter, die zur Ergänzung der CST-Vorräte aller vier Blöcke herangezogen werden können. Der Krisenstab der Anlage sah vor, diese Vorräte für die Blöcke 1 und 2 zu reservieren, da deren Anlagenzustand als am kritischsten angesehen wurde. Vor diesem Hintergrund wurde in Block 4 gegen 11:00 Uhr entschieden, von einer Einspeisung mit dem MUWC auf eine Einspeisung aus der S/C unter Nutzung des HPCS-Systems umzuschalten und so die Wasservorräte im CST zu schonen. Um 12:30 Uhr wurde dazu zunächst das HPCS zur Einspeisung in den Reaktor aktiviert und unmittelbar anschließend das MUWC abgeschaltet. Ab diesem Zeitpunkt wurde die Füllstandshaltung im RPV mit dem HPCS bis zum Mittag des 14.03. aufrechterhalten.

3.5 Druck- und Temperaturentwicklung in den Sicherheitsbehältern

Am Morgen des 12.03. um 5:22 Uhr in Block 1, 5:32 Uhr in Block 2 und 6:07 Uhr in Block 4 überstieg die Temperatur in den S/Cs einen Wert von 100°C, siehe auch Tabelle 3-7. Damit war formal die Druckabbaufähigkeit der S/C nicht mehr gegeben. Entsprechend wurde um 5:47 Uhr für die Blöcke 1 und 2 und um 6:17 Uhr für Block 4 gemäß Artikel 15 § 1 des japanischen Kernenergiegesetzes ein nuklearer Notfall (loss of pressure suppression function) gegenüber den Behörden gemeldet.

Tabelle 3-7: Temperaturanstieg in den Kondensationskammern (S/C) der Blöcke 1, 2 und 4 des Standorts Fukushima Daini

	14:47 Uhr	18:00 Uhr	21:00 Uhr	24:00 Uhr	100 C
Block 1	18°C	50°C	66°C	84°C	~ 5:00 Uhr
Block 2	20°C	44°C	64°C	78°C	~ 5:30 Uhr
Block 4	18°C	42°C	58°C	75°C	~ 6:00 Uhr

Quelle: <GoJ 2012>

In den folgenden Tagen stieg die Temperatur in den Kondensationskammern weiter an. Im Maximum wurde in Block 1 am 13.03. um 11:30 Uhr eine Temperatur von 130°C erreicht, in Block 2 am 14.03. um 7:00 Uhr eine Temperatur von 139°C und in Block 4 am 14.03. um 12:30 Uhr eine Temperatur von 137°C <JNTI 2011>.

In Block 3 konnte um bereits am 11.03. um 15:36 Uhr das Nachkühlsystem RHR in Betrieb genommen werden, so dass Druck und Temperatur in der Kondensationskammer von Block 3 nicht auf unzulässige Werte anstiegen. Nach Angaben in <GoJ 2011b> blieb die Temperatur der S/C in Block 3 aufgrund der Verfügbarkeit eines Strangs des RHR im Maximum unter 66°C, vgl. Tabelle 3-9.

Da es in der Folge auch zu einem Anstieg des Drucks in den Kondensationskammern (S/C) und den Druckkammern (D/W) der Blöcke 1, 2 und 4 kam, wurde entschieden, die Funktion des S/C-Sprühens in Betrieb zu nehmen. Da ein D/W-Sprühen bis zu diesem Zeitpunkt noch niemals erforderlich gewesen war, kam es zunächst beim Betriebspersonal zu einer Diskussion, ob durch das D/W-Sprühen eine Gefahr für die Einrichtungen in der Druckkammer bestünde. Nach <JNSI 2012> wurde dabei insbesondere ein Verlust von Investitionen des Betreibers befürchtet. Da das D/W-Sprühen jedoch in den EOPs explizit vorgesehen war, wurde vom Leiter der Anlage dennoch entschieden, auch ein D/W-Sprühen vorzunehmen.

In Block 1 startete um 7:10 Uhr das D/W-Sprühen bzw. um 7:37 Uhr das S/C-Sprühen, in Block 2 um 7:11 Uhr (D/W) bzw. 7:35 Uhr (S/C) und in Block 4 um 7:35 Uhr (hier wurde nur S/C-Sprühen aktiviert). Durch das Sprühen stabilisierte sich der Druck zunächst unterhalb von 0,2 MPa, vergleiche Tabelle 3-8.

Tabelle 3-8: Druckentwicklung nach Sieden in der S/C und Inbetriebnahme von D/W- bzw. S/C-Sprühen in Block 1 und 2

	Block 1		Block 2	
	D/W	S/C	D/W	S/C
6:00 Uhr	183 kPa	181 kPa	158 kPa	158 kPa
7:00 Uhr	195 kPa	190 kPa	165 kPa	166 kPa
8:00 Uhr	196 kPa	187 kPa	166 kPa	165 kPa

Quelle: <GoJ 2012>

Da bis zur Wiederherstellung der Nachwärmeabfuhr in den Blöcken 1, 2 und 4 mit einem weiteren Anstieg der Temperatur und des Drucks im Sicherheitsbehälter zu rechnen war, wurde frühzeitig über die Notwendigkeit einer Druckentlastung des Sicherheitsbehälters diskutiert. Aufgrund der Erfahrungen in der Anlage Fukushima Daiichi, bei der in Block 1 bereits ab Mitternacht des 11.03. eine Druckentlastung vorbereitet wurde und sich dies aufgrund des Ausfalls der elektrischen Energieversorgung als unerwartet schwierig erwiesen hatte, schlug das Notfallteam der TEPCO-Zentral in einer Videokonferenz mit dem Krisenstab der Anlage Daini bereits am 12.03. um 6:13 Uhr vor, eine Druckentlastung der Sicherheitsbehälter vorzubereiten. Dies wurde auch für alle vier Blöcke der Anlage Daini umgesetzt.

Dazu sollten jeweils zunächst zwei der drei zur Druckentlastung erforderlichen Armaturen geöffnet werden, vgl. Abschnitt 2.2.4. Die Druckentlastungsarmaturen an der Kondensationskammer bzw. der Druckkammer selbst sollten dagegen erst bei Erreichen der Kriterien zur Druckentlastung des

Sicherheitsbehälters geöffnet werden. In den Blöcken 2, 3 und 4 wurden diese Armaturen von der Warte aus zwischen 10:33 Uhr und 12:13 Uhr geöffnet. Aufgrund des Verlusts der Stromversorgung einer der Armaturen in Block 1 verzögerte sich hier die Vorbereitung der Druckentlastung. Nach Herstellung einer elektrischen Energieversorgung der Ansteuerung auf der Warte konnte um 18:30 Uhr auch in Block 1 die Vorbereitung zur Druckentlastung erfolgreich abgeschlossen werden.

Nach Angaben in <EPRI 2011> wäre zur Durchführung einer Druckentlastung auch das Druckluftsystem erforderlich gewesen, welches jedoch unverfügbar war. Im Rahmen der Vorbereitungen zur Druckentlastung wurde daher eine provisorische Versorgung über Stickstoffflaschen hergestellt.

Der Druck in der Kondensationskammer in Block 1, 2 und 4 erreichte im Maximum Werte von 282 kPa, 279 kPa und 245 kPa und lag damit im gesamten Zeitverlauf bis zur Wiederherstellung der Nachwärmeabfuhr unter dem zulässigen maximalen Wert von 310 kPa <JNTI 2011>.

Damit wurde eine Druckentlastung des Sicherheitsbehälters bis zur Wiederherstellung der Nachwärmeabfuhr in keinem der Blöcke notwendig.

3.6 Wiederherstellung der Nachkühlsysteme in den Blöcken 1, 2 und 4

Ab ca. 20:00 Uhr am 11.03. wurden mehrere Teams zusammengestellt, die den tatsächlichen Schadensumfang in den Reaktorgebäuden, den Maschinenhäusern und den Nebenkühlwassergebäuden untersuchten. Gegen 22:00 Uhr wurde insbesondere damit begonnen, die Situation in den Nebenkühlwassergebäuden genauer zu inspizieren. Bis zu diesem Zeitpunkt war die Gefahr weiterer Erdbeben oder Tsunamis als zu groß eingestuft worden, um Personal in die nahe dem Meer liegenden Gebäude zu schicken. Dabei wurde ein dauerhafter telefonischer Kontakt über Mobiltelefone aufrechterhalten, um das Personal bei erneuter Tsunamigefahr kurzfristig wieder evakuieren zu können.

Um die mittelfristig notwendige Nachwärmeabfuhr aus der S/C wieder herstellen zu können, war es erforderlich, in jedem Block mindestens einen Strang des Nachkühlsystems wieder in Betrieb zu nehmen. Beginnend am Morgen des 12.03. wurde daher der Isolationswiderstand der Motoren der Pumpen des Zwischen- und Nebenkühlwassersystems RHRC und RHRS vermessen, um zu bestimmen, ob Motoren durch Reinigen mit Wasser wieder instandgesetzt werden könnten oder ausgetauscht werden müssten. Die Einschätzung zum Zustand der verschiedenen Motoren wurde vom Krisenstab zusammengetragen und auf dieser Basis wurde eine Entscheidung bzgl. der Vorgehensweise zur Wiederherstellung von jeweils einem Strang des Nachkühlsystems pro Block getroffen.

Für Block 1 wurde entschieden, die Redundanz B wieder herzustellen, insbesondere weil für Redundanz A die elektrische Versorgung der Einrichtungen im R/G nicht verfügbar war. Hierzu sollten die Motoren der Zwischenkühlpumpen RHRC (1B und 1D) sowie der Pumpe des Sicherheitskomponenten-Kühlsystems (1B) ausgetauscht werden. Dabei ist eine funktionsfähige Pumpe pro Kreislauf für einen Betrieb des RHR-System ausreichend.

In Block 2 sollte ebenfalls die Redundanz B wiederhergestellt werden. Dazu war es nicht nötig, Motoren auszutauschen, es war nur die Wiederherstellung der elektrischen Energieversorgung notwendig.

Auch in Block 4 wurde entschieden, Redundanz B wiederherzustellen. Hierzu war es vorgesehen, die Motoren der Zwischenkühlpumpen RHRC (4B und 4D) sowie den Motor einer

Nebenkühlwasserpumpe RHRS (4B) zu ersetzen. Dabei war zunächst nur der Ersatz eines Motors der Zwischenkühlpumpen RHRC erforderlich. Für alle Pumpen dieser Redundanzen war es jedoch notwendig, eine neue provisorische Stromversorgung zu schaffen, da die Elektronschränke in den Nebenkühlwassergebäuden zerstört waren.

Am Morgen des 12.03. erhielt der Krisenstab ein Unterstützungsangebot aus der Anlage Kashiwazaki-Kariwa. Von dort wurden zunächst Ersatzmotoren für das Zwischenkühlsystem RHRC (1B und 1D) von Block 1 angefordert. Nachdem um ca. 11:24 Uhr eine diesbezügliche Zusage aus Kashiwazaki-Kariwa einging, wurde zusätzlich nach Ersatzmotoren für das Sicherheitskomponenten-Kühlsystems (1B) von Block 1 sowie für das Zwischenkühlsystem RHRC (4B und 4D) von Block 4 angefragt. Diese Motoren wurden mit Hubschraubern der Selbstverteidigungsstreikräfte zum Flughafen Fukushima transportiert und erreichten am Morgen des 13.03. gegen 6:30 Uhr die Anlage Fukushima Daini.

In der Folge wurden zunächst der Motor des RHRC-Systems der Redundanz D in Block 1 und der Redundanz B in Block 4 ausgetauscht.

Aufgrund der umfangreichen Zerstörungen im Umfeld der Anlage durch das Erdbeben sowie aufgrund der im weiteren Verlauf des Ereignisses durch die Freisetzungen aus der Anlage Fukushima Daiichi sich verschlechternden radiologischen Bedingungen erwies sich der Transport von benötigtem Material, insbesondere auch von Lebensmitteln und Trinkwasser für das Personal bis zum Anlagengelände als problematisch. Zwar waren aufgrund der Vorgaben für den anlageninternen Notfallschutz Lebensmittelreserven für 250 Personen für 3 Tage sowie Trinkwasserreserven für 50 Tage auf dem Anlagengelände gelagert. Da sich in den ersten Tagen jedoch neben ca. 400 TEPCO-Mitarbeitern weitere ca. 1900 Fremdfirmenmitarbeiter auf dem Anlagengelände befanden, mussten u.a. die Lebensmittelrationen für Arbeiter vor Ort reduziert werden. Bei der Durchführung von Arbeiten auf dem Anlagengelände in Fukushima Daini mussten bedingt durch Freisetzungen aus Fukushima Daiichi ab dem Abend des 14.03. Schutzkleidung getragen werden <JNSI 2012>.

Während der Wiederherstellung der Nachkühlssysteme wurde die Einspeisung in den RPV der Blöcke 1 und 2 mit dem MUWC und in Block 4 mit dem HPCS aufrechterhalten. Zur Ergänzung der Wasservorräte im CST wurde in den Blöcken 1 und 2 zunächst der Vorrat des Frischwasserbehälters des Feuerlöschsystems und daran anschließend Wasser aus den Kondensatoren in den CST gefördert <JNSI 2012>.

3.6.1 Herstellung einer provisorischen Stromversorgung

Um die Einrichtungen in den Nebenkühlwassergebäuden wieder mit Strom versorgen zu können, war es notwendig, neue Kabel aus dem Bereich der Reaktorgebäude zu den Nebenkühlwassergebäuden zu verlegen. Hierzu mussten Zugänge über die Straße im südlichen Bereich des Anlagengeländes geschaffen werden. Diese war durch Schrott und Trümmer von Erdbeben und Tsunami blockiert. Diesbezügliche Aufräumarbeiten wurden gegen 22:00 Uhr am 11.03. begonnen und konnten bis zum Morgen des 13.03. weitgehend fertiggestellt werden.

Nach einer Bewertung der Druck- und Temperaturverläufe in den Sicherheitsbehältern wurde entschieden, zunächst eine Versorgung der Pumpen des Blocks 2 herzustellen. Hierzu sollte ein Kabel vom Gebäude für radioaktive Abfälle (RW/B) bis zum Hx/B des Blocks 2 verlegt werden. Obwohl das RW/B relativ weit vom Hx/B des Blocks 2 entfernt war, wurde die Verlegung eines Kabels aufgrund der verbindenden Straße als einfacher eingestuft als mögliche alternative Verbindungswege <JNSI 2012>.

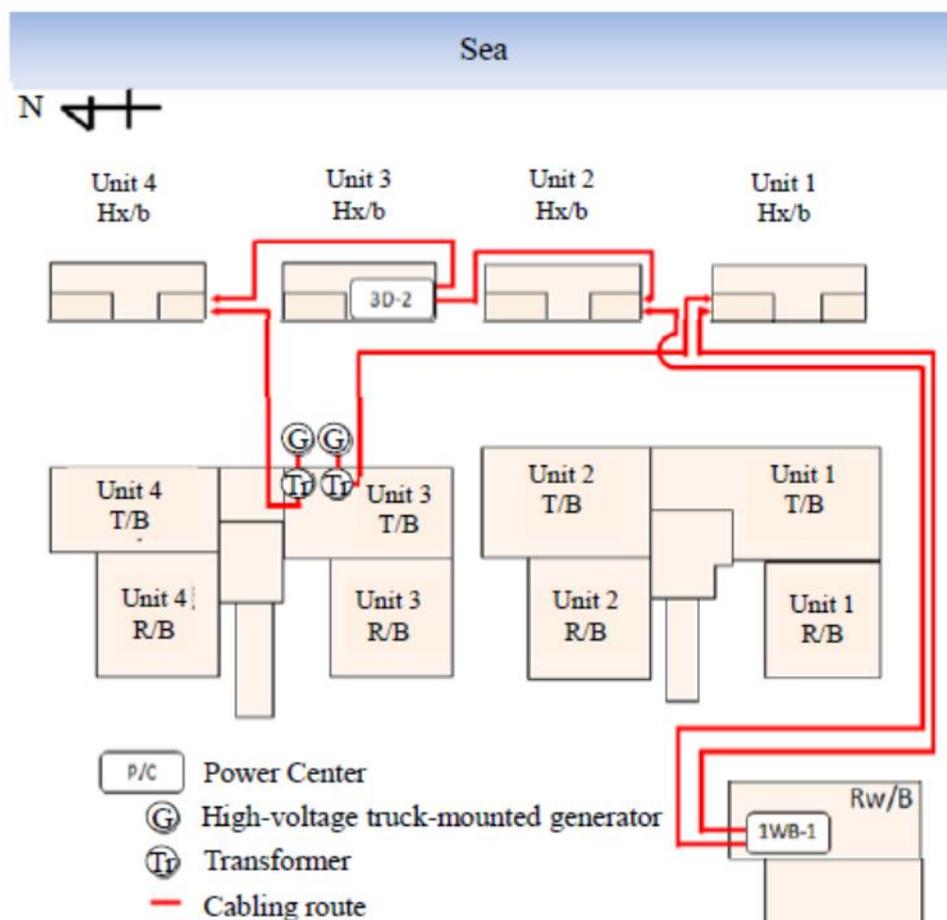
Um 5:04 Uhr am 12.03. wurde per Hubschrauber ein 900 m langes Schwachstromkabel auf das Anlagengelände geliefert. Unter Beteiligung von 40 Personen wurde dieses Kabel bis zum Mittag des 12.03. vom RW/B bis zum Motor der Zwischenkühlpumpe 2B verlegt und angeschlossen.

Im weiteren Verlauf wurde ein zusätzliches Kabel vom RW/B zum Nebenkühlwassergebäude Hx/B des Blocks 1 verlegt. Weiterhin wurden Kabel von mobilen Generatoren, die beim Reaktorgebäude von Block 3 angeschlossen worden waren, zu den Hx/B von Block 1 und 4 und vom Hx/B des Block 3 zu denen des Blocks 2 und 4 verlegt, vgl. Abbildung 3-2.

Insgesamt wurden ca. 9 km an neuen Stromkabeln für die Versorgung der Einrichtungen in den Nebenkühlwassergebäuden verlegt <EPRI 2011>.

Damit war eine elektrische Versorgung aller relevanten Einrichtungen in den vier Blöcken der Anlage Fukushima Daini wiederhergestellt.

Abbildung 3-2: Aufbau einer provisorischen Stromversorgung der Nebenkühlwassergebäude



Quelle: <GoJ 2012>, Fig. II-5-6

3.6.2 Wiederinbetriebnahme der Nachwärmeabfuhr

In Block 1 waren die RHRS 1B und RHRC 1D Pumpen bis 20:17 bzw. 21:03 Uhr am 13.03. wieder verfügbar. Zu diesem Zeitpunkt waren nur die Pumpen des Sicherheitskomponenten-Kühlsystem EECW in diesem Strang noch unverfügbar. Obwohl diese für die Kühlung der Motoren des RHR-

Systems grundsätzlich erforderlich sind, wurde vom Betriebspersonal entschieden, dass eine zeitlich begrenzte Inbetriebnahme des RHR-Systems auch ohne funktionsfähiges EECW möglich wäre. Dabei wurde die Temperatur der Motoren überwacht, um diese bei der Gefahr einer Überhitzung kurzfristig abschalten zu können. Nachdem die Temperatur der Kondensationskammer in Block 1 um 21:00 Uhr dieses Tages bereits bei 122°C lag, wurde um 1:24 Uhr am 14.03. das RHR in der Funktionsweise Kondensationskammerkühlen in Betrieb genommen.

Gegen 10:00 Uhr am 14.03 wurde weiterhin entschieden, das RHR gleichzeitig zur Einspeisung in den RPV zu nutzen. Dazu wurde zusätzlich zur Kondensationskammerkühlung ein Teil des gekühlten Wassers wie beim Stillstandskühlen über die Umwälzschleifen direkt in den RPV geführt. Nach Auffüllen des RPV wurde dieses zusätzliche Wasser durch Offenhaltung eines SRV im Überlaufmodus zurück in die Kondensationskammer geführt.

Nachdem auf diese Weise bis 10:15 Uhr die Temperatur in der Kondensationskammer unter einen Wert von 100°C gefallen war, wurde für Block 1 um 10:35 Uhr den Behörden das Ende des nuklearen Notfalls gemäß Artikel 15 § 1 gemeldet. Um 17:00 Uhr dieses Tages wurde für Block 1 durch TEPCO der Zustand der Kaltabschaltung erklärt.

In Block 2 konnte die EECW-Pumpe 2B um 3:20 Uhr am 14.03. wieder in Betrieb genommen werden, die Nebenkühlwasserpumpe RHRS 2B um 3:51 Uhr und die Zwischenkühlpumpe RHRC 2B um 5:52 Uhr. Daraufhin wurde um 7:13 Uhr das RHR-System in der Funktion Kondensationskammerkühlen gestartet. Um ca. 10:48 Uhr wurde das RHR-System ebenso wie in Block 1 auf eine Mischeinspeisung in die Kondensationskammer und den RPV umgestellt. Um 14:10 Uhr sank die Temperatur in der S/C unter 100°C und gegen 14:20 Uhr fiel auch die RPV-Temperatur unter 100°C. Daraufhin wurde für Block 2 um 16:15 Uhr den Behörden das Ende des nuklearen Notfalls gemäß Artikel 15 § 1 gemeldet. Um 18:00 Uhr dieses Tages wurde der Zustand der Kaltabschaltung erklärt.

In Block 4 konnte die EECW-Pumpe 4B um ca. 11:00 Uhr am 14.03. wieder in Betrieb genommen werden, die Nebenkühlwasserpumpe RHRS 4B um 13:07 Uhr und die Zwischenkühlpumpe RHRC 4B um 14:56 Uhr. Daraufhin wurde um 15:42 Uhr das RHR-System in der Funktion Kondensationskammerkühlen gestartet. Um ca. 21:43 Uhr wurde das RHR-System ebenso wie in Block 1 auf eine Mischeinspeisung in die Kondensationskammer und den RPV umgestellt. Am 15.03. um 0:15 Uhr sank die Temperatur in der S/C unter 100°C und gegen 3:50 Uhr fiel auch die RPV-Temperatur unter 100°C. Daraufhin wurde für Block 4 um 7:35 Uhr den Behörden das Ende des nuklearen Notfalls gemäß Artikel 15 § 1 gemeldet. Um 7:15 Uhr dieses Tages wurde der Zustand der Kaltabschaltung erklärt.

In allen Blöcken des Standorts wurde somit bis zum 15.03.2013 der Zustand der Kaltabschaltung erreicht.

Nach Angaben in <JNSI 2012> wurden in den Blöcken 1, 2 und 4 ab dem Morgen des 16.03. ein Ansteigen der Wasserstoffkonzentration im Sicherheitsbehälter (PCV) festgestellt. Zündbare Wasserstoffkonzentrationen wurden jedoch durch den Betrieb des Wasserstoffüberwachungs- und Abbausystems FCS vermieden. Als Ursache für die Wasserstoffentstehung werden chemische Reaktionen von Zink und Aluminium im PCV für möglich gehalten. Es besteht allerdings auch die Möglichkeit, dass die Messeinrichtungen zur Bestimmung der Wasserstoffkonzentration aufgrund von hoher Feuchte im Sicherheitsbehälter nicht ordnungsgemäß funktionierten.

3.7 Brennelement-Lagerbecken

Die folgenden Angaben zum Zustand der Brennelement-Lagerbecken (SFP) und zur Kühlung der SFPs im Verlauf des Ereignisses am Standort Fukushima Daini sind <JNTI 2011> entnommen.

Die Temperatur der SFPs betrug vor Eintritt des Erdbebens zwischen 32 und 38°C. In allen vier Blöcken war das Becken bis zur Überlaufhöhe gefüllt. Die Auslegungstemperatur der SFPs liegt nach <GoJ 2012> bei 65°C, vgl. Tabelle 2-12.

Bereits in Folge des Erdbebens fiel in allen vier Blöcken der Füllstand im BE-Becken soweit ab, dass die Beckenkühlpumpe wegen niedrigem Füllstand in Becken abgeschaltet wurde. In Folge des Tsunami fielen weiterhin die betrieblichen Nebenkühlwassersysteme aufgrund einer Überflutung der Pumpen im Bereich der Nebenkühlwassergebäude aus.

In Block 1 stieg daraufhin die Temperatur im Lagerbecken bis zum 14.03. um 16:30 Uhr auf einen maximalen Wert von 62°C an. Daraufhin wurde zunächst über eine Einspeiseleitung Kondensat in das Lagerbecken eingespeist. Um 20:26 Uhr an diesem Tag wurde eine Beckenkühlpumpe zur Umwälzung des Wassers im Lagerbecken in Betrieb genommen. Nach Wiederherstellung des RHR konnte schließlich um 0:42 Uhr am 16.03. das Nachwärmeabfuhrsystem zur Beckenkühlung verwendet werden. Damit fiel bis um 10:30 Uhr am selben Tag die Temperatur im Lagerbecken wieder auf einen Wert von unter 38°C ab.

In Block 2 war durch einen zu starken Abfall des Füllstands im Lagerbecken die Temperaturmessung nicht verfügbar. Daher wurde ein temporäres Temperaturmessgerät installiert, um die Temperaturentwicklung beobachten zu können <JNSI 2012>. Die Temperatur im SFP stieg in Block 2 auf bis zu 56°C an. Am 16.03. um 1:28 Uhr wurde daraufhin das Nachwärmeabfuhrsystem zur Beckenkühlung eingesetzt, so dass bis 10:30 Uhr an diesem Tag die Temperatur im Lagerbecken wieder auf 32,5°C zurückging.

Auch in Block 3 stieg die Temperatur im Lagerbecken bis zum 15.03. um 17:42 Uhr auf 51°C an, danach wurde vom Betriebspersonal das Nachwärmeabfuhrsystem zur Beckenkühlung eingesetzt und die Temperatur bis zum 16.03. um 22:30 Uhr wieder auf 34°C abgesenkt.

In Block 4 wurde am 15.03. um 16:35 Uhr bei einer Maximaltemperatur von 62°C das Nachwärmeabfuhrsystem zur Beckenkühlung eingesetzt und damit bis zum 16.03. um 17:00 Uhr eine Temperatur von unter 35°C eingestellt.

Damit blieb in allen vier Blöcken die Temperatur im SFP während des gesamten Zeitraums unterhalb des betrieblich zulässigen Wertes von 65°C.

3.8 Zusammenfassung wesentlicher Anlagenparameter im Verlauf des Ereignisses

In Tabelle 3-9 sind die Maximalwerte wesentlicher Anlagenparameter in den Blöcken 1-4 für den Zeitraum bis zum Erreichen des kalt-unterkritischen Zustands dargestellt.

Tabelle 3-9: Wichtige Anlagenparameter im Verlauf des Ereignisses

	Auslegung	Maximale bzw. minimale Werte			
		Block 1	Block 2	Block 3	Block 4
RPV-Druck	8,26 MPa	7,35 MPa	7,35 MPa	7,35 MPa	7,35 MPa
D/W-Druck	310 kPa	282 kPa	279 kPa	38 kPa	245 kPa
S/W-Temperatur	104°C	130°C	139°C	66°C	137°C
S/W-Füllstand		+ 7418 mm (max. + 8127 mm)	+ 5400 mm (max. + 8050 mm)	+ 798 mm (max. + 6300 mm)	+ 5600 mm (max. + 8050 mm)
FP-Temperatur	Max. 65°C (Operational Safety)	62°C	56°C	51°C	62°C

Quelle: <GoJ 2011b>

Für die Blöcke 1, 2 und 4 wurde das Ereignis in Fukushima Daini aufgrund des vollständigen Ausfalls der Nachwärmeabfuhr in die INES Stufe 3 eingeordnet. Für den Block 3 wurde das Ereignis in INES Stufe 1 eingeordnet <NISA 2011>.

4 Vergleichende Analyse des Ereignisablaufs zum Standort Fukushima Daiichi

Während das Erdbeben vom 11.03.2011 und der dadurch ausgelöste Tsunami in der Anlage Fukushima Daiichi zu einem Ereignis der Stufe 7 auf der INES-Skala führte, blieben die Auswirkungen in der Anlage Fukushima Daini auf einen ersten Störfall begrenzt.

Im Folgenden wird analysiert, welche Unterschiede bzw. Gemeinsamkeiten zwischen den beiden Anlagen und im jeweiligen Ereignisablauf bestehen, die letztendlich diesen Unterschied begründen können. Dazu wird zunächst die Auslegung der Anlagen betrachtet, daran anschließend werden die Auswirkungen des Erdbebens und des Tsunamis auf die Anlage verglichen und schließlich werden zentrale Maßnahmen des Betriebspersonals zum Umgang mit dem Ereignis diskutiert.

4.1 Die Auslegung der Anlagen

4.1.1 Containment

Alle Blöcke am Standort Fukushima Daini weisen ein Containment vom Typ Mark II auf. Demgegenüber sind die Containments der Blöcke 1-5 am Standort Fukushima Daiichi vom Typ Mark I, nur Block 6 verfügt über ein Containment vom Typ Mark II.

Nach <BfS 2012> ist das freie Volumen des Mark I Containments relativ kleiner als bei neueren Containments. Damit kann es im Ereignisverlauf zu einem schnelleren Druckaufbau kommen. Allerdings sind auch die Auslegungsdrücke der Containments am Standort Fukushima Daiichi größer als am Standort Daini, wodurch der Effekt eines potenziell schnelleren Druckanstiegs im Containment bezüglich der für Maßnahmen des Betriebspersonals zur Verfügung stehenden Karenzzeiten vor Erreichen des Auslegungs- bzw. Versagensdruck des Containment z.T. ausgeglichen wird.

Die in den Kondensationskammern vorhandenen Wasservolumina und damit die Wärmespeicherkapazität der S/C sind bezogen auf die thermische Reaktorleistung in Fukushima Daiichi vergleichbar wie in Daini.

Ein Versagen der Containments in Fukushima Daiichi mit einer Freisetzung von Wasserstoff ins Reaktorgebäude und anschließenden Wasserstoffexplosionen erfolgte in den Blöcken 1, 2 und 3 jeweils in der Folge einer zeitweiligen Unterbrechung der Einspeisung in den RPV und einem daraus resultierenden Kernschaden. Während diese in Block 1 bereits frühzeitig durch eine unerkannten Unverfügbarkeit des Notkondensationssystems verursacht wurde, konnte in den Blöcken 2 und 3 über 1,5 bzw. drei Tage eine Einspeisung in den RPV erfolgreich aufrecht erhalten werden, ohne dass es zu einem Versagen des Containments kam.

In Fukushima Daini wurde durch eine erfolgreiche Niederdruck-Einspeisung die Kernkühlung bis zur Wiederherstellung der Kühlungsmöglichkeiten der Kondensationskammern nach drei bis vier Tagen aufrechterhalten.

Ein für das Ereignis relevanter Unterschied in der Auslegung der Anlagen ist nicht feststellbar.

4.1.2 Erdbebenauslegung

Die Anlagen am Standort Fukushima Daiichi und Daini sind gegen etwa gleiche maximale Bodenbeschleunigungen (im Bereich von 0,4-0,5 g) ausgelegt.

Ein für das Ereignis relevanter Unterschied in der Auslegung der Anlagen ist nicht feststellbar.

4.1.3 Tsunamiauslegung

Die ursprüngliche Tsunami-Auslegung beider Standorte geht auf das Chile-Erdbeben von 1960 und den dabei aufgetretenen Tsunami zurück. Der ursprüngliche Auslegungswert lag für beide Anlagen bei ca. O.P. +3,1 m. Im Rahmen von Nachbewertungen ist die Auslegungshöhe auf O.P. +5,2 m (Daini) bzw. O.P. +5,4-6,1 m (Daiichi) angehoben worden.

Bezüglich dieser Auslegungswerte ist ein für das Ereignis relevanter Unterschied nicht feststellbar.

Die Nebenkühlwassergebäude (Daini) bzw. Nebenkühlwasserpumpen (Daiichi) sind an beiden Standorten etwa auf gleicher Höhe aufgestellt und gegen die Auslegungswerte geschützt. Dabei sind die Einrichtungen des Zwischen- und Nebenkühlwassersystems am Standort Fukushima Daini in den Nebenkühlwassergebäuden untergebracht, während die Nebenkühlwasserpumpen am Standort Fukushima Daiichi auf offenem Gelände aufgestellt sind. Dies führt zu Unterschieden im Zerstörungsumfang der jeweiligen Einrichtungen, vgl. Kap. 4.3.

Das Anlagengelände am Standort Fukushima Daini liegt mit O.P. +12 m gegenüber dem Standort Fukushima Daiichi mit O.P. +10 m um ca. 2 m höher. Dieser Unterschied ist nicht durch die Auslegung gegen Tsunami begründet, führt jedoch ebenfalls zu relevanten Unterschieden im Zerstörungsumfang durch den Tsunami, vgl. Kap. 4.3.

Die Unterbringung der Einrichtungen des Zwischen- und Nebenkühlwassersystems am Standort Fukushima Daini innerhalb von Gebäuden sowie die höhere Lage des Anlagengeländes stellen einen für den Ereignisablauf relevanten Unterschied dar.

4.1.4 Verfahrenstechnische Systeme

Die Anlage Fukushima Daini verfügt mit RCIC, HPCS, LPCS und RHR über im Wesentlichen gleiche verfahrenstechnische Systeme wie die Anlage Fukushima Daiichi.

Ein am Standort Fukushima Daini nicht vorhandenes System stellt der am Standort Fukushima Daiichi in Block 1 vorhandene Notkondensator (IC) dar. Dieses System hat zu relevanten Unterschieden im Ereignisablauf zwischen den Anlagen Fukushima Daiichi und Daini geführt. Während dieses System grundsätzlich geeignet gewesen wäre, eine Kühlung des Blocks 1 in Fukushima Daiichi auch unter den bei diesem Ereignis gegebenen Bedingungen eines Station Blackout aufrecht zu erhalten, hat die tatsächliche Unverfügbarkeit des Systems jedoch zu einer signifikanten Verschlechterung der Anlagensituation beigetragen. Die Relevanz dieses Systems kann nur im Zusammenhang mit einer detaillierten Analyse des Unfallablaufs unter Berücksichtigung der Personalhandlungen am Standort Daiichi bewertet werden. Aus Sicht der Auslegung der Anlagen ist dieser Unterschied jedoch nicht als relevant einzustufen.

Das am Standort Fukushima Daini im Unterschied zum Standort Daiichi vorhandene Zwischenkühlsystem hat nicht zu relevanten Unterschieden im Ereignisablauf beigetragen.

Ein für das Ereignis relevanter Unterschied in der Auslegung der Anlagen ist nicht feststellbar.

4.1.5 Anlageninterne Notfallmaßnahmen

Im Rahmen der Implementierung von anlageninternen Notfallmaßnahmen sind an beiden Standorten alternative Einspeisemöglichkeiten unter Nutzung von MUWC und FP sowie Möglichkeiten zur Druckentlastung des Sicherheitsbehälters realisiert worden.

Ein für das Ereignis relevanter Unterschied in der Auslegung der Anlagen ist nicht feststellbar.

4.1.6 Externe Stromversorgung

Der Standort Fukushima Daini verfügt über vier Leitungen zur Anbindung ans externe Netz, die alle über eine externe Schaltanlage verlaufen. Der Standort Fukushima Daiichi verfügt über sechs externe Netzanbindungen sowie eine Verbindung zum benachbarten Stromnetz der Tohoku Electric Power Co. Die technischen Auslegungsgrundlagen der externen Netzanbindungen der beiden Standorte sind grundsätzlich gleich.

Insgesamt verfügt der Standort Fukushima Daiichi durch die Anbindung an verschiedene externe Stromnetze über eine größere Diversität in der externen Netzanbindung als der Standort Fukushima Daini. Dies stellt einen für das Ereignis potenziell relevanten Unterschied in der Auslegung der Anlagen dar, der sich allerdings aufgrund des größeren Zerstörungsumfangs des Erdbebens am Standort Fukushima Daiichi nicht positiv auf den tatsächlichen Ereignisablauf ausgewirkt hat, vgl. Kap. 4.2.

4.1.7 Notstromversorgung

Am Standort Fukushima Daini wird die Notstromversorgung des Sicherheitssystems von jeweils drei Notstromdieseln pro Block sichergestellt. Alle Notstromdiesel sind in den Reaktorgebäude Annexen untergebracht und sind wassergekühlt. Am Standort Fukushima Daiichi verfügt jeder Block über zwei Notstromdiesel. Diese sind mehrheitlich in den Maschinenhäusern untergebracht, lediglich jeweils ein Notstromdiesel der Blöcke 2 und 4 ist in gesonderten Gebäuden aufgestellt. Die Notstromdiesel in Block 6 sind im Reaktorgebäude bzw. in einem speziellen Notstromdieselgebäude untergebracht. Drei der Notstromdiesel (jeweils einer in Block 2, 4 und 6) sind luftgekühlt, alle übrigen Notstromdiesel an diesem Standort sind wassergekühlt.

Von den drei am Standort Fukushima Daini vorhandenen Notstromdieseln pro Block dient einer speziell der Versorgung des Hochdruck-Kernsprühsystems HPCS. Das verfahrenstechnisch

gleichwertige Hochdruck-Einspeisesystem HPCI des Standort Fukushima Daiichi wird dagegen von einer Turbine unter Nutzung von Frischdampf aus dem RPV angetrieben, so dass für dieses System keine gesicherte Wechselstromversorgung erforderlich ist. Aufgrund des größeren Zerstörungsumfangs am Standort Fukushima Daiichi kam es dort zu einem Verlust sowohl der externen Netzanbindung als auch weiter Teile der Notstromversorgung, vgl. Kap. 4.2 und 4.3.

Unter der Randbedingung eines vollständigen Ausfalls der Wechselstromversorgung (SBO) in Fukushima Daiichi ist der größere Redundanzgrad von Einspeisesystemen, die von einer Wechselstromversorgung unabhängig sind (also RPCI und HPCI), grundsätzlich als Vorteil anzusehen. So konnte insbesondere in Block 3 nach Ausfall des RPCI eine weitere Bespeisung des RPV mithilfe des HPCI sichergestellt werden. Allerdings ist der langfristige Betrieb der frischdampfgetriebenen Systeme (RCIC und HPCI) wesentlich von der Druckabbaufähigkeit der Kondensationskammer abhängig. Aufgrund des Ausfalls der Systeme zur Wärmeabfuhr aus der Kondensationskammer unter den Bedingungen eines Station Blackout (auch unabhängig vom Ausfall dieser Systeme durch die direkten Einwirkungen des Tsunami auf das Nebenkühlwassersystem) war der Betrieb der frischdampfgetriebenen Systeme grundsätzlich nur für einen begrenzten Zeitraum möglich. Insgesamt ergibt sich daher aus der unterschiedlichen Energieversorgung der Hochdruck-Kernsprühsysteme kein für das Ereignis relevanter Unterschied.

Die zur Abfuhr der Nachzerfallsleistung erforderlichen Einrichtungen des RHR werden an beiden Standorten von jeweils zwei Redundanzen versorgt. Hier ergibt sich kein für das Ereignis relevanter Unterschied in der Auslegung der Anlagen.

Weder die R/G Annexe am Standort Fukushima Daini noch die Maschinenhäuser am Standort Fukushima Daiichi bieten einen Schutz der Notstromdiesel bei einer Überflutung des Anlagengeländes. Diese Gebäude weisen Lüftungseingänge bzw. Türen auf, die keinen Schutz gegen eindringendes Wasser bieten, so dass bei einer relevanten Überflutung des Anlagengeländes ein Ausfall der Notstromdiesel nicht ausgeschlossen werden kann. Aus der unterschiedlichen Unterbringung der Notstromdiesel ergibt sich kein für das Ereignis relevanter Unterschied in der Auslegung der Anlagen.

Die Blöcke 2, 4 und 6 am Standort Fukushima Daiichi verfügen über jeweils einen luftgekühlten Notstromdiesel. Während in den Blöcken 1-4 alle Notstromdiesel aufgrund der Überflutung des Anlagengeländes entweder unmittelbar unverfügbar waren oder die zugehörigen Schaltanlagen zerstört wurden, waren in den Blöcken 5 und 6 die Notstromdiesel und ihre Schaltanlagen nicht direkt vom Tsunami betroffen, sondern wurden aufgrund der Zerstörung der Kühlsysteme unverfügbar. Lediglich der luftgekühlte Notstromdiesel in Block 6 blieb verfügbar. Diese verfügbare Stromversorgung hat relevant dazu beigetragen, zunächst unmittelbar in Block 6 und kurzfristig durch die elektrische Querverbindung zu Block 5 in diesen beiden Blöcken den Anlagenzustand zu stabilisieren.

Die diversitäre Auslegung der Kühlung der Notstromdiesel stellt einen für das Ereignis relevanten Unterschied in der Auslegung der Anlagen dar.

4.1.8 Fazit zu Unterschieden in der Auslegung

Die grundsätzliche Auslegung der Anlagen am Standort Fukushima Daiichi und Fukushima Daini mit Blick auf die vorhandenen elektro- und verfahrenstechnischen Einrichtungen sowie deren Schutz gegen Einwirkungen von außen (Erdbeben, Tsunami) ist vergleichbar.

Für das Ereignis vom 11.03.2011 relevante Unterschiede bestehen darin, dass

- wesentliche Einrichtungen des Zwischen- und Nebenkühlwassersystems der Anlage Daini in gegen Überflutung ausgelegten Nebenkühlwassergebäuden untergebracht sind. Damit besteht eine deutlich höhere Robustheit auch gegenüber auslegungsüberschreitenden Überflutungsereignissen.
- die externe Netzanbindung des Standort Fukushima Daiichi aufgrund der Anbindung an unterschiedliche externe Netze im Vergleich zum Standort Daini als robuster anzusehen ist.
- am Standort Fukushima Daiichi die Notstromdiesel hinsichtlich ihrer Kühlung diversitär aufgebaut sind.

4.2 Auswirkungen des Erdbebens

Am Standort Fukushima Daini liegen die gemessenen Erdbebenbeschleunigungen bei maximal ca. 65% der Auslegungswerte, es ist eine maximale PGA von $3,05 \text{ m/s}^2$ gemessen worden. Am Standort Fukushima Daiichi sind dagegen Erdbebenbeschleunigungen von bis zu 125% der Auslegungswerte aufgetreten, es ist eine maximale PGA von $5,50 \text{ m/s}^2$ gemessen worden.

Die automatischen Maßnahmen nach Eintreten des Erdbebens verliefen an beiden Standorten auslegungsgemäß. Bis heute sind relevanten Schäden am Sicherheitssystem der beiden Standorte nicht festgestellt worden, obwohl insbesondere am Standort Fukushima Daiichi die Frage erdbebenbedingter Ausfälle im Sicherheitssystem bislang nicht abschließend beantwortet werden kann.

Über erdbebenbedingten Schäden an betrieblichen Einrichtungen liegen aus beiden Standorten nur begrenzte Informationen vor. Aufgrund der unterschiedlichen Schwere des Erdbebens an den beiden Standorten sind am Standort Fukushima Daini im Vergleich zum Standort Daiichi grundsätzlich geringere Auswirkungen auch auf betriebliche Systeme zu erwarten, die eine geringere Auslegung gegen Erdbeben als das Sicherheitssystem aufweisen.

Ein für den Ereignisablauf relevanter Unterschied besteht darin, dass am Standort Fukushima Daini die externe Stromversorgung über mindestens eine externe Netzanbindung für den gesamten Zeitraum bis zum Erreichen des Zustands „kalt-unterkritisch“ in allen Blöcken aufrechterhalten werden konnte, während durch das Erdbeben die gesamte externe Netzanbindung am Standort Fukushima Daiichi unverfügbar wurde, obwohl diese durch die Anbindung an verschiedene externe Netze als grundsätzlich robuster angesehen werden kann.

Hieraus resultieren verschiedene für das Ereignis relevante Unterschiede:

- Die Hauptwärmesenke bleibt in Fukushima Daini bis zum Eintreffen des Tsunami erhalten. Damit erfolgt ein Wärmeeintrag in die Kondensationskammer erst zu einem Zeitpunkt, als die Nachzerfallsleistung bereits weiter zurückgegangen ist, was sich günstig auf den Anstieg von Druck und Temperatur im Sicherheitsbehälter nach dem vollständigen Ausfall der Systeme zur Wärmeabfuhr aus der Kondensationskammer auswirkt.
- Die Stromversorgung verschiedener betrieblicher Einrichtungen bleibt in Fukushima Daini erhalten. Insbesondere kann das MUWC als Niederdruck-Einspeisesystem zur Kernkühlung kontinuierlich mit elektrischer Energie versorgt werden.
- Wesentliche Mess- und Überwachungseinrichtungen können in Fukushima Daini kontinuierlich mit Energie versorgt werden, so dass eine Analyse des Anlagenzustands und darauf basierend die Planung und Priorisierung von Instandsetzungsarbeiten besser möglich ist.

4.2.1 Fazit zu den Auswirkungen des Erdbebens

Die am Standort Fukushima Daini gemessenen Erdbebenbeschleunigungen waren geringer als am Standort Fukushima Daiichi.

Es blieb am Standort Daini vor allem die externe Stromversorgung dauerhaft verfügbar, so dass für die weitere Ereignisbeherrschung relevante Einrichtungen mit elektrischer Energie versorgt werden konnten.

4.3 Auswirkungen des Tsunami

Die maximale Höhe des Tsunami am Standort Fukushima Daini ist mit +9,1 m geringer als am Standort Fukushima Daiichi mit +13,1 m.

Gleichzeitig liegt, wie bereits oben festgestellt, das Anlagengelände am Standort Fukushima Daini ca. 2 m höher als am Standort Fukushima Daiichi. Daraus resultierte in Fukushima Daini eine erheblich geringere Überflutung des Anlagengeländes als in Fukushima Daiichi. Hieraus resultieren verschiedene für das Ereignis relevante Unterschiede:

- Von den in Fukushima Daini auf Höhe des Anlagengeländes aufgestellten Notstromdieseln werden nur diejenigen von Block 1 durch den Tsunami direkt beschädigt, alle übrigen bleiben unbeeinträchtigt. Die Notstromversorgung wird aufgrund der verfügbaren externen Stromversorgung jedoch nicht benötigt, so dass sich dieser Unterschied nicht relevant auf den Ereignisablauf auswirkt.
- Von den Schaltanlagen und Elektronikschränken zur Notstromversorgung von Einrichtungen in den Reaktorgebäuden werden ebenfalls nur diejenigen in Block 1 durch den Tsunami beeinträchtigt, alle übrigen bleiben unbeeinträchtigt.
- Die Schaltanlagen und Elektronikschränke zur Eigenbedarfsversorgung in den Wartengebäuden bleiben verfügbar.
- Damit bleiben auch wesentliche Mess- und Überwachungseinrichtungen dauerhaft verfügbar.
- Das MUWC bleibt in allen vier Blöcken am Standort Fukushima Daini verfügbar, während in den Blöcken 1-4 am Standort Fukushima Daiichi die Motoren der MUWC-Pumpen durch Überflutung un verfügbar werden <TEPCO 2012>.
- Der allgemeine Zerstörungsumfang auf dem Anlagengelände ist deutlich geringer als in Fukushima Daiichi, was die Erreichbarkeit der Anlage und die Arbeiten auf dem Anlagengelände erleichtert.

Wie bereits oben festgestellt sind die Einrichtungen des Zwischen- und Nebenkühlwassersystems in Fukushima Daini im Gegensatz zu Fukushima Daiichi in Nebenkühlwassergebäuden aufgestellt. Zwar kommt es dennoch zu einem weitgehenden Verlust dieser Einrichtungen, der Schadensumfang ist im Vergleich zur Anlage Fukushima Daiichi aber als deutlich geringer einzustufen. Insbesondere

- bleibt in Block 3 eine Redundanz des Nachkühlsystems erhalten, so dass dieser Block frühzeitig in den Zustand „kalt-unterkritisch“ überführt werden kann.
- In Block 2 werden zwar beide Redundanzen des Nachkühlsystems un verfügbar, jedoch ist dies nur auf einen Verlust der elektrischen Versorgung der Einrichtungen zurückzuführen. Von den Pumpen des Zwischen-, Nebenkühlwasser- und Sicherheitskomponenten-Kühlsystems bleibt in einer Redundanz jeweils mindestens eine Pumpe mechanisch verfügbar, so dass diese nach

Wiederherstellung einer provisorischen Energieversorgung wieder in Betrieb genommen werden können.

4.3.1 Fazit zu den Auswirkungen des Tsunami

Die Höhe des Tsunami am Standort Fukushima Daini war signifikant geringer als am Standort Fukushima Daiichi.

Damit blieben am Standort Daini zentrale, für die weitere Ereignisbeherrschung relevante Einrichtungen (Schaltanlagen, Elektronikschränke, MUWC, Mess- und Überwachungseinrichtungen) dauerhaft verfügbar.

4.4 Maßnahmen des Betriebspersonals

Ein vollumfängliche Analyse und Bewertung der vom Betriebspersonal vorgenommenen Maßnahmen zur Überführung der Anlagen in einen langfristig sicheren Zustand ist für das Ziel, wesentliche Unterschiede im Ereignisablauf zu identifizieren und die zugrundeliegenden Ursachen zu analysieren, nicht notwendig. Auch haben sich bereits nach relativ kurzer Zeit im jeweiligen Ereignisablauf signifikante Unterschiede zwischen der Anlagensituation am Standort Fukushima Daiichi und Fukushima Daini ergeben, die einen detaillierten Vergleich der Personalmaßnahmen in der Folge nicht mehr sinnvoll erscheinen lassen. Dies betrifft vor allem

- den frühzeitigen Ausfall der Einspeisung in den RPV in Block 1 am Standort Fukushima Daiichi mit der Folge einer frühzeitigen Kernschmelze,
- die daraus resultierenden Auswirkungen auf die Anlagensituation am Standort mit Blick auf radiologische Freisetzungen sowie Wasserstoffexplosionen und den dadurch verursachten zusätzlichen Zerstörungsumfang auf dem Anlagengelände,
- die entstehende Notwendigkeit zu Druckentlastung in mehreren Blöcken aufgrund nicht rechtzeitiger Wiederherstellung von Systemen zur Nachwärmeabfuhr,
- die Notwendigkeit einer Einspeisung von Wasser in die Brennelementlagerbecken aufgrund nicht rechtzeitiger Wiederherstellung einer Kühlungsmöglichkeit.

Die folgende Diskussion orientiert sich daher an den zentralen Maßnahmen des Betriebspersonals, die dazu beitrugen, diese am Standort Fukushima Daiichi eingetretenen Verschlechterungen des Anlagenzustands zu vermeiden. Dies sind

- die kontinuierliche Verfolgung und Bewertung der jeweiligen Anlagensituation durch das Betriebspersonal,
- die frühzeitige Vorbereitung, Prüfung und Inbetriebnahme einer Niederdruck-Einspeisung zur ununterbrochenen Aufrechterhaltung der Kernkühlung sowie
- die Wiederherstellung einer Wärmeabfuhrmöglichkeit aus dem Sicherheitsbehälter.

4.4.1 Kontinuierliche Verfolgung und Bewertung der jeweiligen Anlagensituation

Eine zentrale Grundlage zur Planung von Maßnahmen des Betriebspersonals und zur Kontrolle der erfolgreichen Umsetzung durchgeführter Maßnahmen stellt die Verfügbarkeit der Mess- und Überwachungseinrichtungen auf der Warte und in zentralen Krisenstabsräumen dar.

Am Standort Fukushima Daini waren die Mess- und Überwachungseinrichtungen weder durch die Auswirkungen des Erdbebens noch durch den anschließenden Tsunami in relevantem Umfang

eingeschränkt. Dem Betriebspersonal war es im Wesentlichen durchgängig möglich, zentrale Anlagenparameter wie die Füllstände, Drücke und Temperaturen sowohl in den RPVs wie in den S/Cs zu kontrollieren sowie den Betrieb der wesentlichen verfahrenstechnischen Einrichtungen (Hochdruck-Nachspeisesystem, MUWC, Venting) zu steuern und zu überwachen. In den ersten Stunden nach dem Tsunami war die Stromversorgung des Seismic Isolation Building beeinträchtigt, in dem der zentrale Krisenstab untergebracht war. Diese konnte jedoch kurzfristig (innerhalb von ca. 4 Stunden) wiederhergestellt werden.

Demgegenüber waren am Standort Fukushima Daiichi aufgrund des vollständigen Ausfalls der Wechselstromversorgung in den Blöcken 1 bis 5 (externe Netzanbindung sowie Notstromversorgung durch Notstromdiesel) sowie zusätzlich der batteriegestützten Gleichstromversorgung in den Blöcken 1 und 2 unmittelbar nach dem Tsunami sowie im weiteren Verlauf des Ereignisses nach Erschöpfung der Batterien auch zeitweise in Block 3 zentrale Mess- und Überwachungseinrichtungen unverfügbar. Damit standen zentrale Anlageninformationen nicht zur Verfügung. Dies führte in der Folge beispielsweise zu Unsicherheiten bezüglich der Bespeisung der RPVs (keine Kenntnis der RPV-Füllstände, keine genaue Kenntnis der Einspeiseraten von RCIC bzw. HPCI aufgrund fehlender Kenntnis der RPV-Drücke, keine Kenntnis der Einspeiseraten von Niederdruck-Einspeisesystemen) und bezüglich der Notwendigkeiten für die Einleitung und Durchführung von Venting-Maßnahmen (keine Kenntnis der Drücke in S/C und D/W).

Beispielsweise blieb die Unverfügbarkeit des Notkondensationssystems IC in Block 1 am Standort Fukushima Daiichi aufgrund des Ausfalls der Mess- und Überwachungseinrichtungen für mehrere Stunden unerkannt, so dass entsprechende Maßnahmen des Betriebspersonals zur Füllstandshaltung im RPV unterblieben. Auch wurde beispielsweise in Block 2 der Anlage Fukushima Daiichi die Förderung des Hochdruck-Nachspeisesystems RCIC am 12.03. gegen 4:00 Uhr vom Vorratsbehälter auf die Kondensationskammer umgestellt. Dabei war eine Überwachung der Kondensationskammerdrücke und -temperaturen bis ca. zum 14.03. gegen 4:30 Uhr nicht möglich. Dadurch bestanden Unsicherheiten hinsichtlich der Einspeisemengen des RCIC <GoJ 2012>. Demgegenüber wurden am Standort Fukushima Daini in allen Blöcken parallel zum Betrieb des RCIC die Druckentlastungsventile des RPV betätigt und Druck und Temperatur in der Kondensationskammer überwacht, um eine dauerhafte Einspeisung sicherzustellen.

Im weiteren Verlauf des Ereignisses stellten sich am Standort Fukushima Daiichi darüber hinaus Anlagenzustände (insbesondere hohe Temperaturen im Sicherheitsbehälter) ein, bei denen die Mess- und Überwachungseinrichtungen nicht mehr auslegungsgemäß funktionierten. Dies wurde vom Betriebspersonal jedoch nicht eindeutig erkannt. In Folge dessen wurden Maßnahmen nicht oder verzögert eingeleitet.

Die wesentlichen Ursachen für den Erhalt der Mess- und Überwachungseinrichtungen am Standort Fukushima Daini im Unterschied zur Situation in Fukushima Daiichi liegen in

- der Verfügbarkeit einer externen Netzanbindung,
- der Verfügbarkeit der zugehörigen Schaltanlagen und Elektronikschränke auf dem Anlagengelände und
- der Einhaltung der Auslegungsrandbedingungen der Mess- und Überwachungseinrichtungen.

Die ersten beiden Faktoren sind, wie in Kap. 4.1 bis 4.3 diskutiert, auf geringere Einwirkungen des konkreten Ereignisses am Standort Fukushima Daini zurückzuführen. Die Überschreitung der Auslegungsrandbedingungen der Mess- und Überwachungseinrichtungen am Standort Fukushima

Daiichi ist darauf zurückzuführen, dass diese in beiden Anlagen nicht für die Randbedingungen von Unfällen mit schweren Kernschäden ausgelegt waren.

4.4.2 Inbetriebnahme einer Niederdruck-Einspeisung

Eine zentrale Ursache für die radikale Verschlechterung der Anlagensituation am Standort Fukushima Daiichi liegt in der zeitweisen Unterbrechung der Einspeisung in die RPVs der Blöcke 1, 2 und 3. Hierdurch kam es nach heutigem Kenntnisstand zur Kernschmelze in Block 1 und mindestens zu partiellen Kernschmelzen in den Blöcken 2 und 3 und damit zu einem massiven Druck- und Temperaturanstieg in den RPVs und S/Cs, zur Bildung und Freisetzung großer Mengen Wasserstoff mit anschließenden Wasserstoffexplosionen sowie zur Freisetzung großer Mengen von Radioaktivität.

Am Standort Fukushima Daini wurde in allen vier Blöcken frühzeitig eine alternative Niederdruck-Einspeisung durch das MUWC vorbereitet, geprüft und in Betrieb genommen. Dazu wurde zunächst bereits frühzeitig der Druck in den RPVs soweit abgesenkt, dass das RCIC noch betrieben werden konnte, jedoch gleichzeitig eine Einspeisung mit dem MUWC möglich wurde. Weiterhin wurden die Armaturen im Einspeiseweg des MUWC geöffnet, um die Wirksamkeit einer Einspeisung mit dem MUWC noch während des laufenden Betriebs des RCIC kontrollieren zu können. Schließlich wurde das MUWC als Ersatz zum RCIC in Betrieb genommen. Dabei wurde in Block 1 und 2 das MUWC noch während des Betriebs des RCIC gestartet, während in Block 4 das MUWC erst in Reaktion auf die automatische Abschaltung des RCIC gestartet wurde. Aufgrund der erfolgten Vorbereitung und Prüfung dieser Einspeisemöglichkeit kam es auch in Block 4 dabei nicht zu einer längeren Unterbrechung der Bespeisung des RPV.

Demgegenüber kam es am Standort Fukushima Daiichi bereits am 11.03. in Block 1 durch die nicht erkannte Unverfügbarkeit des IC zu einer Unterbrechung der Einspeisung in den RPV von ca. vierzehn Stunden. In Block 3 erfolgte am 13.03. die Abschaltung des Hochdruckeinspeisesystems HPCI durch das Betriebspersonal, bevor eine alternative Einspeisung verfügbar war, so dass für ca. sieben Stunden keine Einspeisung in den RPV gewährleistet war. In Block 2 kam es schließlich am 14.03. zu einer Unterbrechung der Einspeisung in den RPV von ca. acht Stunden, nachdem das RCIC ausgefallen war.

Die wesentlichen Ursachen für die erfolgreiche Inbetriebnahme einer Niederdruck-Einspeisung am Standort Fukushima Daini im Unterschied zur Situation in Fukushima Daiichi liegen in

- der Verfügbarkeit der Mess- und Überwachungseinrichtungen,
- der Verfügbarkeit einer externen Netzanbindung und der Pumpen des MUWC und
- der erfolgreichen Druckabsenkung der RPVs in den Einspeisebereich der Niederdrucksysteme.

Durch die Verfügbarkeit der Mess- und Überwachungseinrichtungen konnte das Betriebspersonal in Fukushima Daini im Unterschied zu Fukushima Daiichi die Entwicklung der Anlagenparameter verfolgen und jeweils rechtzeitig Maßnahmen einleiten.

Durch die Verfügbarkeit der externen Netzanbindung und der Pumpen des MUWC stand in Fukushima Daini eine vorgeplante Niederdruck-Einspeisemöglichkeit in den RPV zur Verfügung. Im Wesentlichen konnten alle hierfür erforderlichen Einrichtungen von der Warte aus geschaltet und überwacht werden. Auch konnte die erfolgreiche Einspeisung durch das MUWC durch die Anzeigen auf der Warte bestätigt werden.

Die Druckabsenkung der RPVs war in Fukushima Daini möglich, da die Ansteuerung und Energieversorgung der SRVs durch das Ereignis nicht beeinträchtigt worden war. Weiterhin konnte

sie so früh durchgeführt werden, dass eine Druckabsenkung bis in den Einspeisebereich der Niederdrucksysteme möglich war. Demgegenüber war in Fukushima Daiichi die Energieversorgung der SRV zeitweise unverfügbar. Weiterhin standen aufgrund der Unverfügbarkeit des MUWC Systeme zur Niederdruck-Einspeisung erst deutlich später zur Verfügung als in Fukushima Daini. Dies führte auch dazu, dass zum Zeitpunkt einer notwendigen Umschaltung auf die Niederdruck-Einspeisung eine Druckabsenkung in den Niederdruckbereich aufgrund des hohen Drucks im Sicherheitsbehälter erschwert war.

Diese Faktoren sind, wie in Kap. 4.1 bis 4.3 und 4.4.1 diskutiert, auf geringere Einwirkungen des konkreten Ereignisses am Standort Fukushima Daini zurückzuführen.

Die Verfügbarkeit zentraler betrieblicher Einrichtungen (externe Stromversorgung) bzw. von Einrichtungen des anlageninternen Notfallschutzes (Niederdruck-Einspeisesysteme) auch bei externen Einwirkungen (Erdbeben, Überflutung) stellt einen wesentlichen Erfolgsfaktor für die Beherrschung dieses auslegungüberschreitenden Ereignisses dar.

4.4.3 Wiederherstellung einer Wärmeabfuhrmöglichkeit aus dem Sicherheitsbehälter

Der zentrale Faktor zur dauerhaften Stabilisierung der Anlagensituation am Standort Fukushima Daini besteht in der rechtzeitigen Wiederherstellung einer Wärmeabfuhrmöglichkeit aus dem Sicherheitsbehälter. Dazu wurde in den Blöcken 1, 2 und 4 jeweils mindestens eine Redundanz der Zwischenkühl-, Nebenkühlwasser- und Sicherheitskomponenten-Kühlsysteme instandgesetzt. Damit konnte in allen Blöcken der Anstieg von Druck bzw. Temperatur in den Sicherheitsbehältern auf maximal 310 kPa bzw. 139°C begrenzt werden. Eine Druckentlastung der Sicherheitsbehälter war damit zu keinem Zeitpunkt notwendig.

Am Standort Fukushima Daini war hierzu einerseits der Aufbau einer provisorischen Stromversorgung der Einrichtungen in den Nebenkühlwassergebäuden erforderlich. Hierzu wurden weitgehend von Hand unter intensivem Einsatz von Personal Stromleitungen verlegt und angeschlossen. Weiterhin mussten vom Tsunami beschädigte Pumpen-Motoren in den Nebenkühlwassergebäuden ausgetauscht werden, wozu entsprechende Ersatzmotoren von einem anderen Standort beschafft und vor Ort installiert wurden.

Am Standort Fukushima Daiichi konnte in den Blöcken 5 und 6 durch vergleichbare Maßnahmen wie am Standort Daini eine Wärmeabfuhr aus dem Sicherheitsbehälter wiederhergestellt werden. Dazu wurde die elektrische Energieversorgung des einen verfügbaren Notstromdiesels des Blocks 6 über eine Querverbindung auch von Block 5 genutzt. Weiterhin wurden vom Tsunami zerstörte Nebenkühlwasserpumpen durch mobile Pumpen ersetzt. Allerdings konnte die Wärmeabfuhr über provisorische Nebenkühlwasserpumpen in diesen Blöcken erst am 19.03., also acht Tage nach Ereigniseintritt, wieder in Betrieb genommen werden, vier bzw. fünf Tage später als am Standort Fukushima Daini. Wesentlich für den Erfolg der Maßnahmen in den Blöcken 5 und 6 war daher neben der Verfügbarkeit eines Notstromdiesels insbesondere auch die geringe Nachzerfallsleistung in diesen Blöcken, die sich beide zum Zeitpunkt des Ereignisses in Revision befanden, und die daraus resultierende größere Karenzzeit für die Umsetzung der Maßnahmen.

In den Blöcken 1, 2 und 3 konnte demgegenüber eine geschlossene Kühlkette nicht rechtzeitig wiederhergestellt werden. Zwar wurden auch in diesen Blöcken bereits frühzeitig mit Maßnahmen zur Wiederherstellung einer provisorischer Stromversorgungen wesentlicher Einrichtungen begonnen. Aufgrund des Ausfalls der externen Netzanbindung und der Überflutung weiter Teile der elektrischen Energieversorgung (Wechsel- und Gleichstromversorgung) auch auf Höhe des Anlagengeländes und nicht nur im Bereich der Nebenkühlwassersysteme waren die hierfür erforderlichen Arbeiten jedoch weitaus komplexer als am Standort Daini. Weiterhin wurden bereits

hergestellte Leitungsverbindungen und mobile Generatoren mehrfach durch die am Standort Fukushima Daiichi auftretenden Wasserstoffexplosionen wieder zerstört.

Als Möglichkeit zur Wärmeabfuhr aus dem Sicherheitsbehälter wurde in den Blöcken 1-3 letztlich eine Niederdruck-Einspeisung in die Reaktordruckbehälter und eine Druckentlastung des Sicherheitsbehälters durchgeführt und langfristig ein offener Kühlkreislauf mit kontinuierlicher Einspeisung von außen in die RPVs realisiert. Wie bereits in Kap. 4.4.2 diskutiert, verzögerte sich die Inbetriebnahme einer Niederdruck-Einspeisung u.a. aufgrund der Unverfügbarkeit des MUWC am Standort Fukushima Daiichi im Vergleich zum Standort Daini erheblich. Auch nach erfolgreich installierter Niederdruck-Einspeisung über mobile Pumpen musste diese Einspeisung häufig unterbrochen bzw. umgestellt werden, da vorhandene Wasservorräte erschöpft waren.

Weiterhin war am Standort Fukushima Daiichi eine Druckentlastung der Sicherheitsbehälter aufgrund von Ausfällen in der Versorgung mit Gleichstrom und Druckluft sowie aufgrund der aus radiologischen Gründen erschwerten Zugänglichkeit von Einrichtungen im Reaktorgebäude nicht ohne weiteres möglich. Demgegenüber konnte in Fukushima Daini in allen vier Blöcken ein Venting erfolgreich vorbereitet werden, auch wenn es hier letztlich nicht benötigt wurde.

Wesentliche Ursachen für die Unterschiede zwischen dem Standort Fukushima Daiichi und Fukushima Daini sind also einerseits auf die geringere Einwirkungen des konkreten Ereignisses am Standort Fukushima Daini und andererseits auf die zusätzliche Verschlechterung der Arbeitsbedingungen durch Wasserstoffexplosionen und radiologische Freisetzungen am Standort Fukushima Daiichi zurückzuführen.

4.4.4 Fazit zu den Maßnahmen des Betriebspersonals

Wesentlich für die Maßnahmen des Betriebspersonals zur Überführung der Anlage in einen langfristig sicheren Zustand ist die Funktionsfähigkeit der Mess- und Überwachungseinrichtungen. Hierbei ist ein wesentlicher Faktor auch die Funktionsfähigkeit der Mess- und Überwachungseinrichtungen unter den Bedingungen von Unfällen mit schweren Kernschäden.

Die für die Einleitung und Kontrolle von Maßnahmen des mitigativen Notfallschutzes erforderlichen Mess- und Überwachungseinrichtungen sollten für die bei Ereignissen mit schweren Kernschäden zu erwartenden Anlagenbedingungen ausgelegt sein.

Die Verfügbarkeit zentraler betrieblicher Einrichtungen (externe Stromversorgung) bzw. von Einrichtungen des anlageninternen Notfallschutzes auch bei externen Einwirkungen (Erdbeben, Überflutung) stellt einen wesentlichen Erfolgsfaktor für die Beherrschung dieses auslegungüberschreitenden Ereignisses dar.

Eine Erhöhung der Robustheit von betrieblichen Einrichtungen und eine Auslegung von Einrichtungen des anlageninternen Notfallschutzes auch gegen externe Einwirkungen stellt ein wichtiges Mittel zur Erhöhung der Anlagensicherheit dar.

5 Zusammenfassung

Am 11. März 2011 um 14:46 Uhr Ortszeit (6:46 Uhr MEZ) ereignete sich nordwestlich der japanischen Hauptinsel Honshu ein schweres Erdbeben der Stärke 9 mit darauf folgendem Tsunami. Während es am Standort Fukushima-Daiichi in der Folge zu einem katastrophalen Unfall (Stufe 7 der internationalen Bewertungsskala für nukleare und radiologische Ereignisse, INES) kam, führte das Ereignis am Standort Fukushima Daini maximal zu einer Einstufung als schwerer Störfall (Stufe 3 der INES-Skala).

Im Rahmen dieser Untersuchung wurden durch eine detaillierte Analyse des Ablaufs der Ereignisse am Standort Fukushima-Daini im Vergleich zum Unfallablauf am Standort Fukushima-Daiichi einerseits die jeweiligen zentralen Ursachen für Unterschiede im Ereignisablauf und darauf aufbauend wesentliche Erfolgs- sowie Misserfolgskriterien bei der Beherrschung des Ereignisses identifiziert.

Die relevanten Unterschiede können dabei der Auslegung der Anlagen, den konkreten Auswirkungen des Erdbebens und des Tsunamis auf die Anlage oder den Maßnahmen des Betriebspersonals zum Umgang mit dem Ereignis zugeordnet werden.

Während die grundsätzliche Auslegung der Anlagen am Standort Fukushima Daiichi und Fukushima Daini mit Blick auf die vorhandenen elektro- und verfahrenstechnischen Einrichtungen sowie deren Schutz gegen Einwirkungen von außen (Erdbeben, Tsunami) vergleichbar ist, bestehen relevante Unterschiede darin, dass

- wesentliche Einrichtungen des Zwischen- und Nebenkühlwassersystems der Anlage Daini in gegen Überflutung ausgelegten Nebenkühlwassergebäuden untergebracht sind und diese damit eine deutlich höhere Robustheit auch gegenüber auslegungsüberschreitenden Überflutungsereignissen aufweisen,
- die externe Netzanbindung des Standort Fukushima Daiichi aufgrund der Anbindung an unterschiedliche externe Netze im Vergleich zum Standort Daini als robuster anzusehen ist und
- am Standort Fukushima Daiichi die Notstromdiesel hinsichtlich ihrer Kühlung diversitär aufgebaut sind.

Die am Standort Fukushima Daini gemessenen Erdbebenbeschleunigungen sowie die Höhe des Tsunami waren signifikant geringer als am Standort Fukushima Daiichi.

Aufgrund dieser geringeren Einwirkungen des Ereignisses auf den Standort Fukushima Daini blieben dort zentrale, für die weitere Ereignisbeherrschung relevante Einrichtungen (externe Netzanbindung, Niederdruck-Einspeisesysteme, Mess- und Überwachungseinrichtungen) anders als am Standort Fukushima Daiichi dauerhaft verfügbar.

Wesentlich für die Maßnahmen des Betriebspersonals zur Überführung der Anlage in einen langfristig sicheren Zustand ist die Funktionsfähigkeit der Mess- und Überwachungseinrichtungen. Hierbei ist ein wesentlicher Faktor auch die Funktionsfähigkeit der Mess- und Überwachungseinrichtungen unter den Bedingungen von Unfällen mit schweren Kernschäden.

Die für die Einleitung und Kontrolle von Maßnahmen des mitigativen Notfallschutzes erforderlichen Mess- und Überwachungseinrichtungen sollten für die bei Ereignissen mit schweren Kernschäden zu erwartenden Anlagenbedingungen ausgelegt sein.

Die Verfügbarkeit zentraler betrieblicher Einrichtungen (externe Stromversorgung) bzw. von Einrichtungen des anlageninternen Notfallschutzes auch bei externen Einwirkungen (Erdbeben, Überflutung) stellt einen wesentlichen Erfolgsfaktor für die Beherrschung dieser auslegungsüberschreitenden Ereignisse dar.

Eine Erhöhung der Robustheit von betrieblichen Einrichtungen und eine Auslegung von Einrichtungen des anlageninternen Notfallschutzes auch gegen externe Einwirkungen stellt ein wichtiges Mittel zur Erhöhung der Anlagensicherheit dar.

6 Anhang

6.1 Auslegungsdaten der Reaktordruckbehälter (RPV)

Tabelle 6-1: Daten des Reaktordruckbehälters der Blöcke 1-4, Fukushima Daini

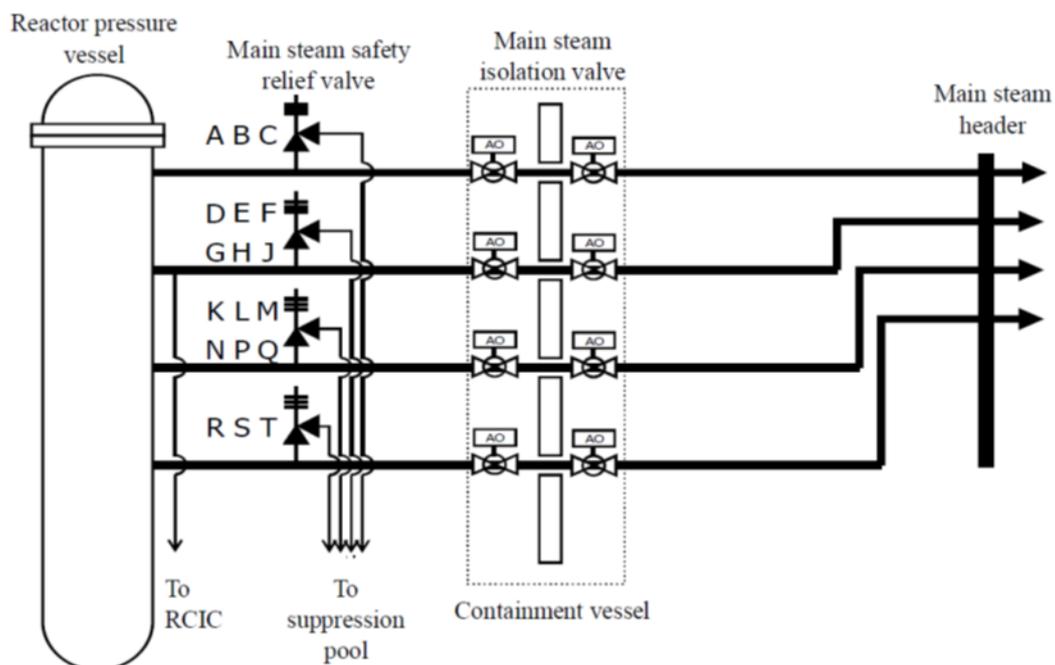
	Block 1	Block 2	Block 3	Block 4
RPV Innendurchmesser (mm)	~ 6.400	~ 6.400	~ 6.400	~ 6.400
RPV Höhe (mm)	~ 23.000	~ 23.000	~ 23.000	~ 23.000
RPV Gewicht (t)	~ 750	~ 750	~ 750	~ 750
RPV Auslegungsdruck (MPa[gage])	~ 8,62	~ 8,62	~ 8,62	~ 8,62
RPV Auslegungstemperatur (°C)	302	302	302	302
Anzahl Brennelemente (BE)	764	764	764	764
MOX-BE	Nein	Nein	Nein	Nein
Aktive Länge BE (m)	~ 3,71	~ 3,71	~ 3,71	~ 3,71
Anzahl Steuerelemente	185	185	185	185

Quelle: <GoJ 2012>, Attachment II-5-2

6.2 Von Block 1 abweichende Systemkonfigurationen

6.2.1 Druckbegrenzungs- und Entlastungssystem (ADS)

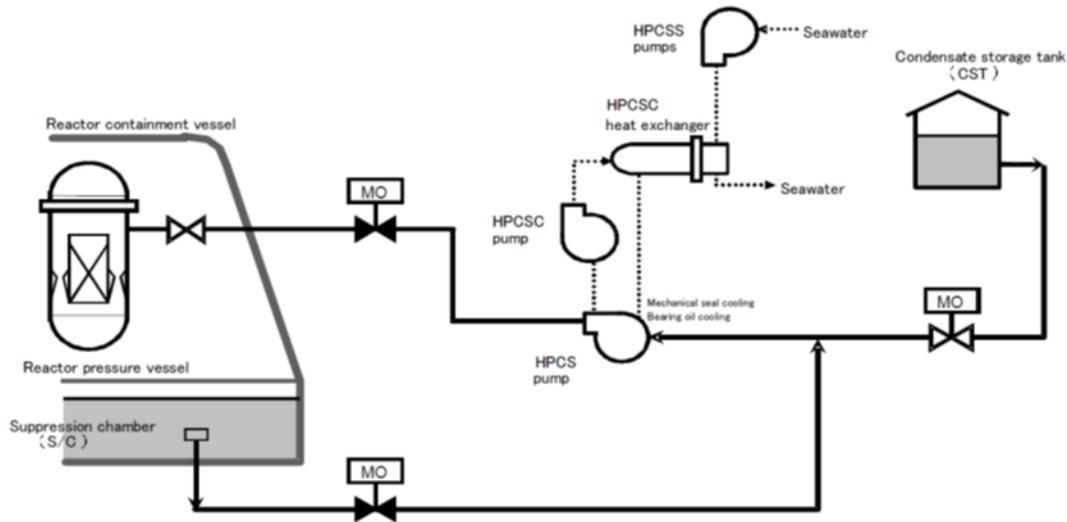
Abbildung 6-1: Systemübersicht ADS, Fukushima Daini Block 2-4



Quelle: <GoJ 2011b>

6.2.2 Hochdruck-Kernsprühsystem (HPCS)

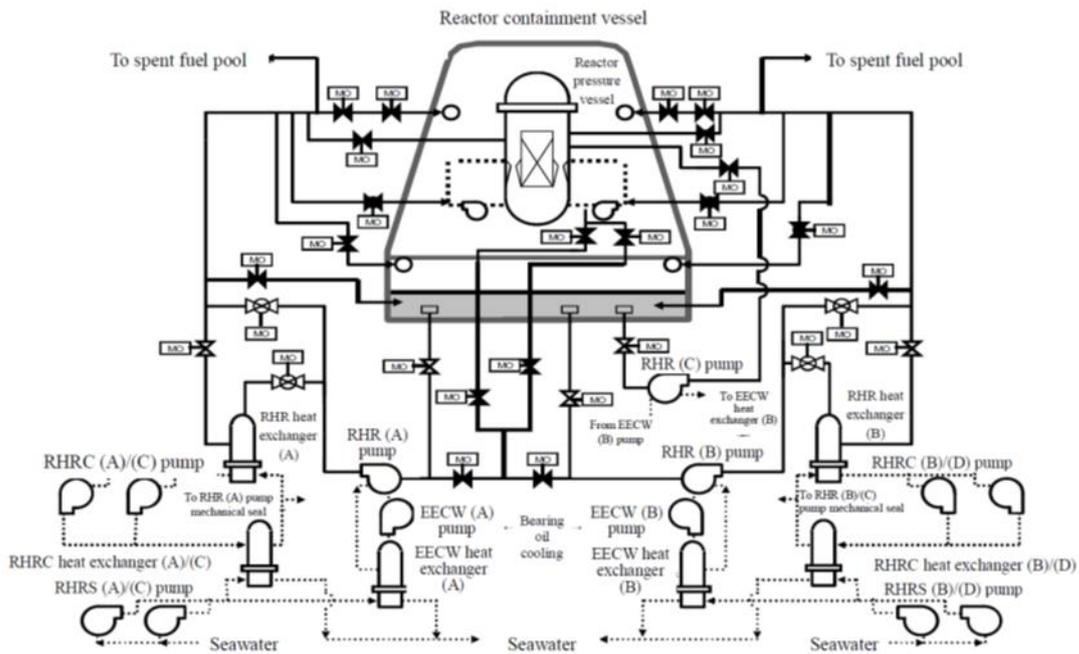
Abbildung 6-2: Systemübersicht HPCS, Fukushima Daini Block 2 und 4



Quelle: <GoJ 2011b>

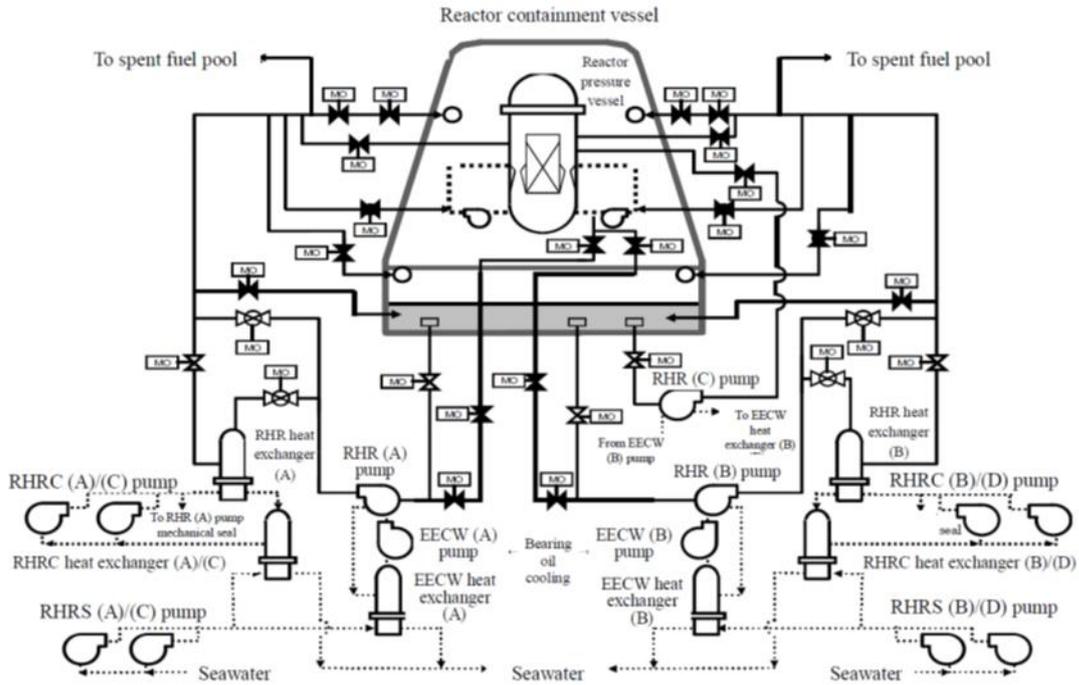
6.2.3 Nachwärmeabfuhrsystem (RHR)

Abbildung 6-3: Systemübersicht RHR, RHRC und RHRS, Fukushima Daini Block 2



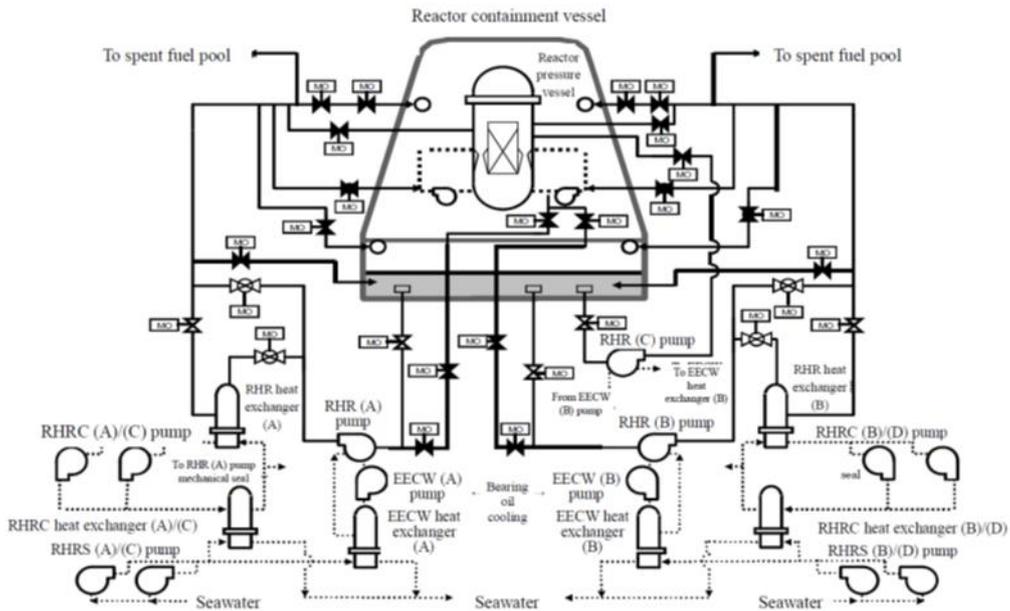
Quelle: <GoJ 2011b>

Abbildung 6-4: Systemübersicht RHR, RHRC und RHRs, Fukushima Daini Block 3



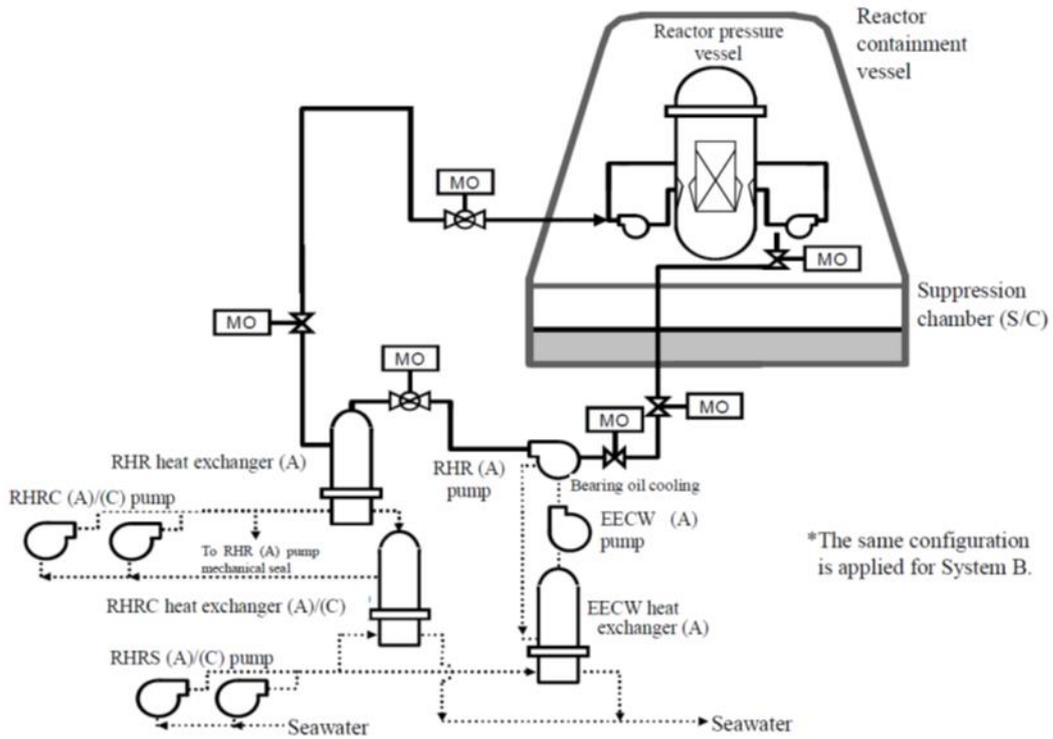
Quelle: <GoJ 2011b>

Abbildung 6-5: Systemübersicht RHR, RHRC und RHRs, Fukushima Daini Block 4



Quelle: <GoJ 2011b>

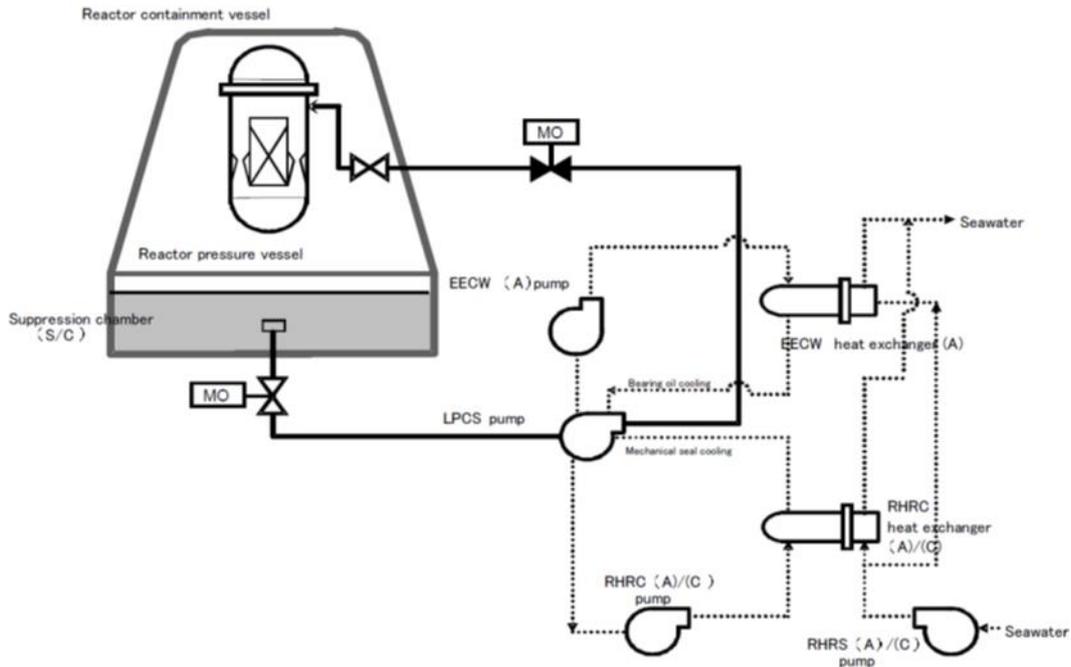
Abbildung 6-7: Systemübersicht SCS, Fukushima Daini Block 3



Quelle: <GoJ 2011b>

6.2.4 Niederdruck-Kernsprühsystem (LPCS)

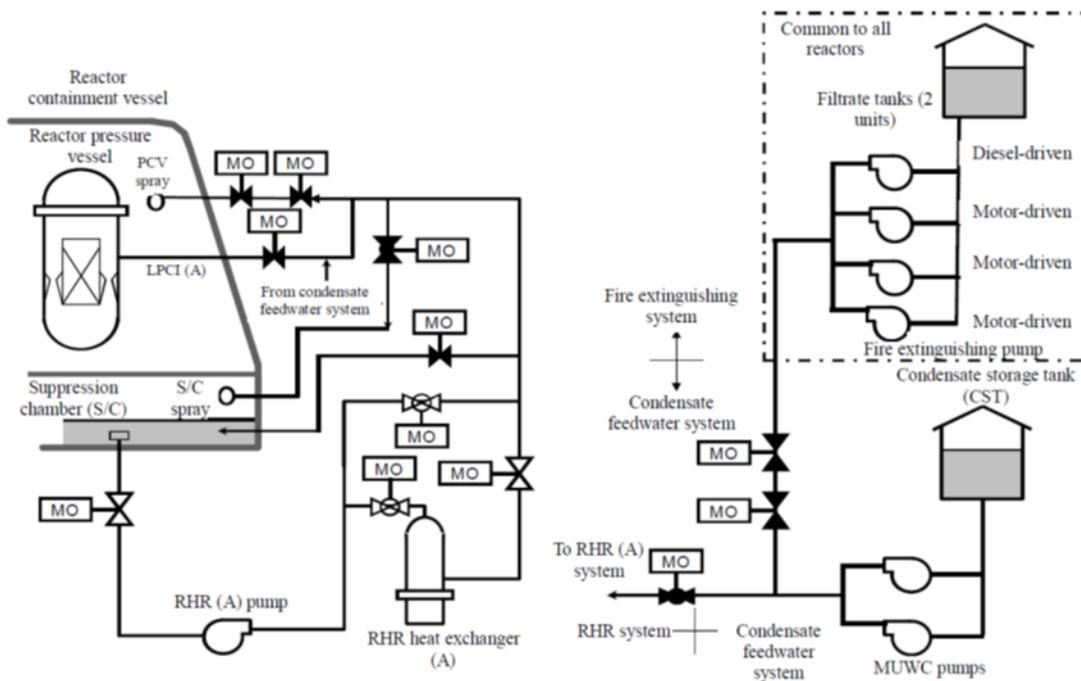
Abbildung 6-9: Systemübersicht LPCS, Fukushima Daini Block 2 und 4



Quelle: <GoJ 2011b>

6.2.5 Alternative Einspeisesysteme

Abbildung 6-10: Alternative Einspeisesysteme, Fukushima Daini Block 2



Quelle: <GoJ 2011b>

Literaturverzeichnis

- <BfS 2012> Bundesamt für Strahlenschutz: Die Katastrophe im Kernkraftwerk Fukushima nach dem Seebeben vom 11. März 2011. Beschreibung und Bewertung von Ablauf und Ursachen. Fachbereich Sicherheit in der Kerntechnik. BfS-SK-18/12. urn:nbn:de:0221-201203027611. Salzgitter, März 2012
- <EPRI 2011> Electric Power Research Institute: EPRI Fukushima Daini Independent Review and Walkdown. Final Report, August 2011.
- <GoJ 2011a> Government of Japan: Report of Japanese Government to the IAEA Ministerial Conference on Nuclear Safety - The Accident at TEPCO's Fukushima Nuclear Power Stations - Nuclear Emergency Response Headquarters, June 2011
- <GoJ 2011b> Government of Japan: Additional Report of the Japanese Government to the IAEA - The Accident at TEPCO's Fukushima Nuclear Power Stations - (Second Report). Nuclear Emergency Response Headquarters, September 2011
- <GoJ 2011c> Government of Japan: Investigation Committee on the Accident at Fukushima Nuclear Power Stations of Tokyo Electric Power Company. Interim Report. December 26, 2011
- <GoJ 2012> Government of Japan: Investigation Committee on the Accident at Fukushima Nuclear Power Stations of Tokyo Electric Power Company. Final Report. July 23, 2012
- <GRS 2011> Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Der Unfall in Fukushima. Zwischenbericht zu den Abläufen in den Kernkraftwerken nach dem Erdbeben vom 11. März 2011. GRS-293. August 2011
- <GRS 2012> Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: GRS Weiterleitungsnachricht WLN 2012/02: Auswirkungen des Tohoku-Erdbebens an den japanischen Kernkraftwerksstandorten Fukushima Daiichi (I) und Daini (II) am 11.03.2011 und des Niigataken-Chuetso-Oki-Erdbebens am japanischen Kernkraftwerksstandort Kashiwazaki-Kariwa am 16.07.2007, 15. Februar 2012
- <GRS 2014> Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Fukushima Daiichi 11. März 2011 - Unfallablauf I Radiologische Folgen. 3. Auflage 2014. GRS-S-54, März 2014. Abrufbar unter http://www.grs.de/sites/default/files/pdf/GRS_Fukushima_2014_WEB_0.pdf
- <JNSI 2012> Japan Nuclear Safety Institute: TEPCO Fukushima Daini Nuclear Power Station. Research on the status of response to the Tohoku-Pacific Ocean Earthquake and Tsunami and Lessons learned therefrom (Proposals). October 2012

- <JNTI 2011> Japan Nuclear Technology Institute: Examination of Accident at Tokyo Electric Power Co., Inc.'s Fukushima Daiichi Nuclear Power Station and Proposal of Countermeasures. Examination Committee on Accident at Fukushima Daiichi Nuclear Power Station. October 2011. Revision Date 16. December 2011
- <NDoJ 2012> The National Diet of Japan: The official report of The Fukushima Nuclear Accident Independent Investigation Commission. 2012
- <NISA 2011> Nuclear and Industrial Safety Agency: Regarding the Impact on the Fukushima Daini Nuclear Power Station, Tokyo Electric Power Co. Inc. due to the 2011 Tohoku District - Off the Pacific Ocean Earthquake. Press Release, August 12, 2011
- <Pistner 2013> Christoph Pistner: Fukushima – Unfallablauf und wesentliche Ursachen. In: sicher ist sicher – Arbeitsschutz aktuell, Hefte 9, 10 und 11/2013. Abrufbar unter <http://www.oeko.de/oekodoc/1846/2013-515-de.pdf>
- <TEPCO 2011> The Tokyo Electric Power Company, Inc.: Fukushima Nuclear Accident Analysis Report (Interim Report). 2. Dezember, 2011
- <TEPCO 2012> Tokyo Electric Power Company, Inc.: Fukushima Nuclear Accident Analysis Report. June 20, 2012