

Das schwere Tohoku-Seebeben in Japan und die Auswirkungen auf das Kernkraftwerk Fukushima-Daiichi

Bernhard Kuczera, Karlsruhe

Sonderdruck aus
Jahrgang 56 (2011), Heft 4/5 | April/Mai

**Internationale
Zeitschrift für
Kernenergie**

Am Freitag, 11. März 2011, ereignete sich in Japan eine Naturkatastrophe von bisher unvorstellbarem Ausmaß. Um 14:46 h (Ortszeit) bzw. 6:46 h (MEZ) erschütterte ein gewaltiges Seebeben, dessen Epizentrum ca. 150 km östlich der Stadt Sendai im Pazifischen Ozean lag, den Bereich mit der nahe gelegenen Küstenregion.

Ausgelöst wurde das Beben durch ruckartige tektonische Verschiebungen von Erdkrustenplatten etwa 20 bis 30 km unterhalb der Meeresoberfläche (NN). Das Seebeben hatte eine Stärke von 9,0 auf der logarithmischen Skala und lag damit um 0,8 Punkte über der bisher stärksten in Japan registrierten Bebenstärke von 8,2. Diese unvermutet hohe Energiefreisetzung verursachte eine Tsunamiwelle von etwa maximal 23 m Höhe, die etwa eine Stunde später die Küstenregion überflutete und dabei eine große Anzahl von Menschenleben forderte und schwere Verwüstungen in Ortschaften, der Infrastruktur und der Umwelt anrichtete.

Im unmittelbaren Einwirkungsbereich dieser Naturkatastrophe liegen 4 Kernkraftwerks(KKW)-Standorte: Onagawa, Fukushima-Daiichi, Fukushima-Daini und Tomari. Am schwersten betroffen war der Standort Fukushima-Daiichi. Welche Auswirkungen diese tektonischen Verschiebungen und der dadurch ausgelöste Tsunami auf diese Anlage hatten oder haben, und welche Gegenmaßnahmen vom Betreiber, der Tokyo Electric Power Company (Tepco), zum Schutz und zur Schadensbegrenzung unternommen worden sind, wird anhand der zum Redaktionsschluss vorliegenden Informationen skizzenhaft dargestellt.

Das schwere Tohoku-Seebeben in Japan und die Auswirkungen auf das Kernkraftwerk Fukushima-Daiichi

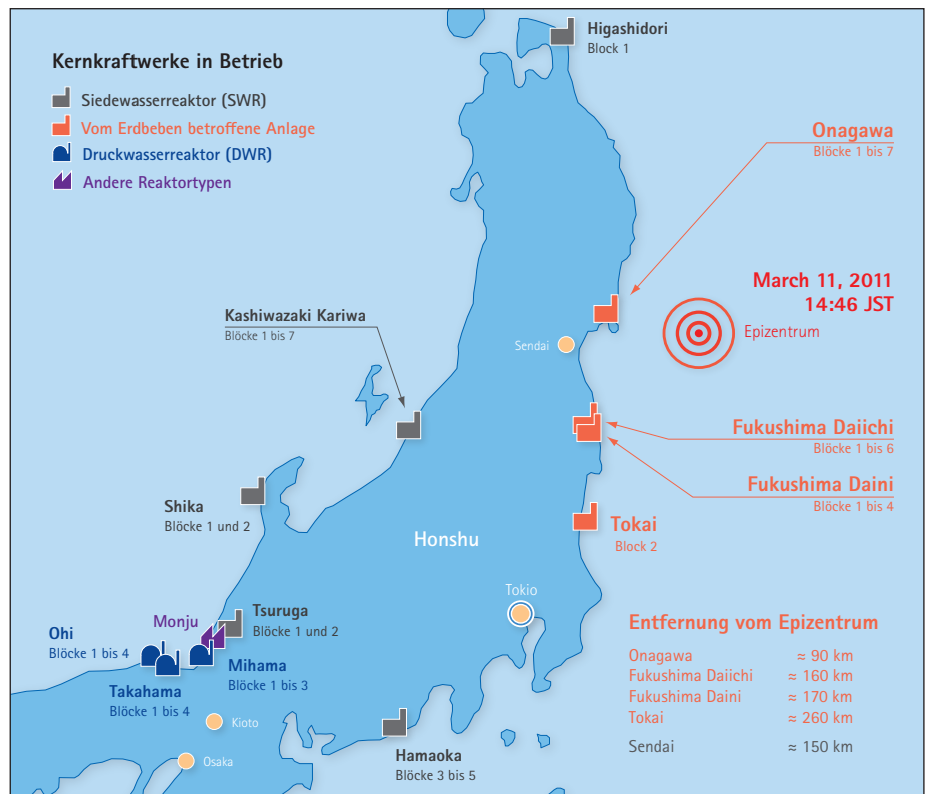
Bernhard Kuczera, Karlsruhe

Einleitende Bemerkungen zu der Naturkatastrophe

Am Freitag, 11. März 2011, ereignete sich in Japan eine Naturkatastrophe von bisher unvorstellbarem Ausmaß. Um 14:46 h (Ortszeit) bzw. 6:46 h (MEZ) erschütterte ein gewaltiges Seebeben, dessen Epizentrum ca. 150 km östlich der Stadt Sendai im Pazifischen Ozean lag, den Bereich mit der nahe gelegenen Küstenregion (s.a. Abbildung 1).

Ausgelöst wurde das Beben durch ruckartige tektonische Verschiebungen von Erdkrustenplatten etwa 20 bis 30 km unterhalb der Meeresoberfläche (NN). Das

Seebeben hatte eine Stärke von 9,0 auf der logarithmischen Skala und lag damit um 0,8 Punkte über der bisher stärksten in Japan registrierten Bebenstärke von 8,2. Die Energiefreisetzung lag damit um mehr als den Faktor 6 über dem bisher gemessenen Maximalwert. Diese hohe Energiefreisetzung verursachte eine Tsunamiwelle von per GPS gemessener sowie berechneter Wellenhöhe von maximal 23 m. Beim Anprall auf stabile Gebäude- oder ähnliche Strukturen wuchs diese Welle sogar bis auf etwa 30 m Höhe an. Die Tsunamiwelle erreichte etwa eine Stunde nach dem Beben die Küste und überflutete die angrenzende Region. Seebeben und Tsunami forderten eine große Anzahl von Menschenleben und



Anschrift des Verfassers:
Dr. Bernhard Kuczera
Badenwerkstr. 7
76137 Karlsruhe

Abb. 1: Das Epizentrum des Erdbebens vor der japanischen Pazifikküste

richteten schwere Verwüstungen in Ortschaften, der Infrastruktur und der Umwelt an. Die Medien berichteten Ende März von 13.000 Toten und mehr als 15.000 Vermissten sowie über 320.000 Menschen in Notunterkünften. Die japanische Regierung schätzt die Sachschäden aktuell mit mindestens 220 Mrd. € ein.

Im unmittelbaren Einwirkungsbereich dieser Naturkatastrophe liegen 4 Kernkraftwerks (KKW)-Standorte: *Onagawa, Fukushima-Daiichi, Fukushima-Daini* und *Tomari*. Am schwersten betroffen war der Standort *Fukushima-Daiichi*. Welche Auswirkungen diese tektonischen Verschiebungen und der dadurch ausgelöste Tsunami auf diese Anlage hatten oder haben und welche Maßnahmen vom Betreiber, der *Tokyo Electric Power Company (Tepco)*, zum Schutz und zur Schadensbegrenzung unternommen worden sind¹, wird skizzenhaft folgend dargestellt.

1 Kurzbeschreibung des Kernkraftwerks-Standorts Fukushima-Daiichi

Der Standort *Fukushima-Daiichi* liegt etwa 60 km südlich von Sendai, dem Verwaltungssitz der japanischen Präfektur Miyagi bzw. 250 km nördlich der japanischen Hauptstadt Tokio. Ein Foto der Anlage, das vor dem 11. März 2011 aufgenommen wurde, zeigt *Abbildung 2*. Die 6 Siedewasserreaktor (SWR)-Blöcke mit ihren Turbinen-, Hilfs- und Nebengebäuden liegen auf einem niedrigen Plateau direkt an der Pazifikküste Japans. Die 6 Blöcke haben zusammen eine Leistung von insgesamt 4.696 MWe brutto und 4.547 MWe netto²).

Der typische Aufbau eines SWR am Standort *Fukushima* – das Design entspricht dem BWR-3 von GE (Block 1); Block 2 bis 5 sind vom Typ BWR-4 und Block 6 vom Typ BWR-5 von GE – mit seinen wesentlichen Sicherheits- und Schutzeinrichtungen, wie dem Mark-I-Containment der Blöcke 1 bis 5, ist am Beispiel des Blocks 1 in *Abbildung 3* illustriert. Erkennbar ist auch das Sicherheitskonzept zum Einschluss der radioaktiven Spaltprodukte, mit den hintereinander angeordneten Barrieren Brennstoff, Brennstabhüllrohr (beides nicht abgebildet), druckfeste Umschließung des Reaktorkühlsystems, Reaktorsicherheitsbehälter (primary containment) und dem äußeren, umschließenden Reaktorgebäude aus Stahlbeton (secondary containment). Im oberen Bereich des



Abb. 2: Luftaufnahme des KKW Fukushima-Daiichi vor dem 11.03.2011

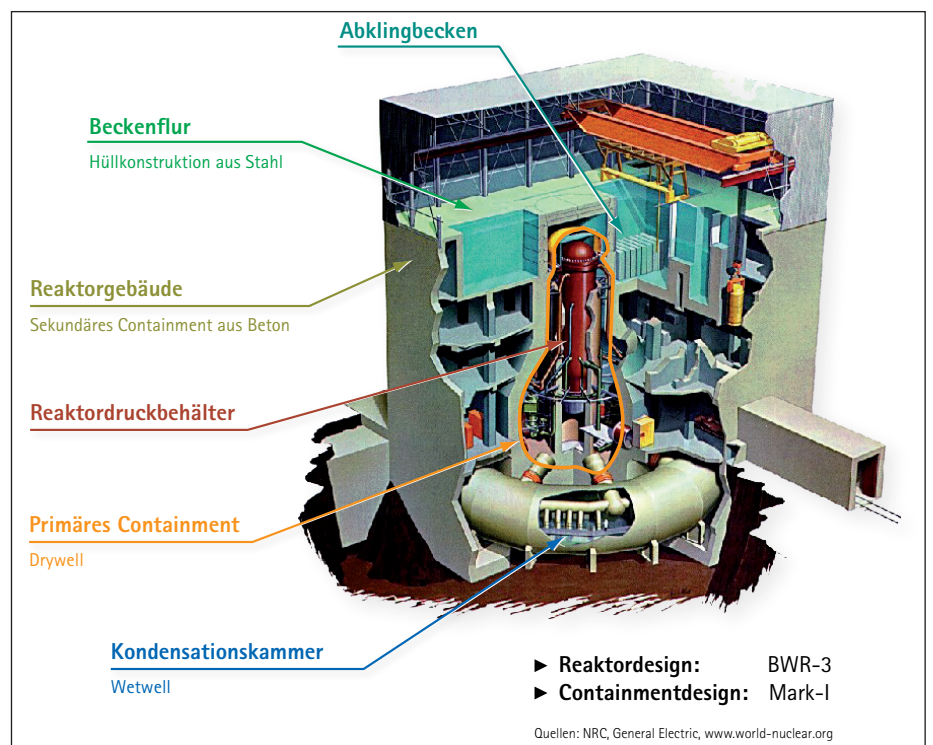


Abb. 3: SWR-Design von Fukushima-Daiichi Block 1; BWR-3 mit Mark-I Containment. Charakteristisch für dieses Containment ist das torusförmige Druckabbausystem im unteren Reaktorgebäudebereich.

Reaktorgebäudes, aber außerhalb des sekundären Containments, befindet sich auch das Brennelement (BE)-Abklingbecken (spent fuel pool), in dem abgebrannte Brennelemente zwischengelagert und zur Abfuhr der weiter produzierten Nachzerfallswärme³ ständig gekühlt werden. Weiterhin befinden sich in diesem Anlagenbereich die Lagerbecken für Reaktor-

deckel, Wasserabscheider und Dampftrockner. Die sicherheitstechnische Auslegung der Anlage basiert auf dem o. e. Erdbeben der Magnitude 8,2.

Der Betriebszustand der einzelnen Kernkraftwerksblöcke unmittelbar vor dem Erdbeben ist in *Tabelle 1* zusammengefasst.

2 Die Naturkatastrophe in der Region Fukushima-Daiichi

2.1 Das Erdbeben

Am 11. März 2011 registrierten um 14:46 h Seismografen auf dem Kraftwerksgelände

¹ Bis Redaktionsschluss, April 2011

² Ende 2010 waren in Japan 55 Kernkraftwerke mit einer Gesamtkapazität von 49.400 MWe (brutto) in Betrieb. Ihr Anteil an der Gesamtstromversorgung des Landes liegt damit bei rund 29 %.

³ Die Nachzerfallsleistung eines Reaktors liegt unmittelbar nach einer Reaktorabschaltung bei etwa 5 %, nach 1 Stunde bei 1 %, nach 1 Tag bei 0,44 %, nach 1 Woche bei ca. 0,23 %, nach 1 Monat bei etwa 0,13 % und nach 3 Monaten bei noch 0,07 % der zuvor erzeugten thermischen Leistung.

Parameter	Kernkraftwerkstandort Fukushima Daiichi					
	Block 1	Block 2	Block 3	Block 4	Block 5	Block 6
Reaktor-design	BWR-3	BWR-4	BWR-4	BWR-4	BWR-4	BWR-5
Containment-design	Mark-I	Mark-I	Mark-I	Mark-I	Mark-I	Mark-II
Thermische Leistung in MW	1380	2381	2381	2381	2381	3293
Elektrische Leistung ¹⁾ in MW	460	784	784	784	784	1100
Elektrische Leistung ²⁾ in MW	439	760	760	760	760	1067
Reaktordruckbehälter						
☐ Maximaldruck in MPa	8,24	8,24	8,24	8,24	8,62	8,62
☐ Maximaltemperatur in °C	300	300	300	300	302	302
Containment						
☐ Maximaldruck in MPa	0,43	0,38	0,38	0,38	0,38	0,28
☐ Maximaltemperatur in °C	140	140	140	140	138	171 ³⁾
Jahr der Inbetriebnahme	1971	1974	1976	1978	1978	1979
Anzahl der Notstromdiesel ⁴⁾	2	2	2	2	2	3 ⁵⁾
Stromnetzanschluss	4 x 275 kV			2 x 500 kV		
Zustand vor Erdbeben ⁶⁾	Betrieb	Betrieb	Betrieb	Revision	Revision	Revision

¹⁾ brutto ²⁾ netto ³⁾ Kondensationskammer: 105 °C ⁴⁾ wassergekühlt ⁵⁾ ein luftgekühltes Aggregat ⁶⁾ am 11. März 2011

Tab. 1: Der Betriebszustand der Kernkraftwerksblöcke am Standort Fukushima-Daiichi unmittelbar vor dem Erdbeben sowie technische Eckdaten

von Fukushima-Daiichi heftige Bodenerschütterungen und lösten automatisch die Schnellabschaltung (engl. SCRAM) der in Betrieb befindlichen Reaktorblöcke 1, 2 und 3 aus. Kurz danach brach die allgemeine Stromversorgung in der Region zusammen, sodass planmäßig die jeweils installierten Notstromdieselgeneratoren die Stromversorgung, auch der Kühlsysteme zur Nachwärmeabfuhr aus den Reaktoren und der Brennelement-Abklingbecken, bei den 6 Blöcken übernehmen konnten. Gleichzeitig wurden die vorgesehenen sicherheitstechnisch nicht erforderlichen Durchdringungen in den Reaktorgebäuden abgesperrt (containment isolation). In Verbindung mit den Erdstößen wurden auf dem Kernkraftwerksgelände Horizontalbeschleunigungen in Ost-West-Richtung von bis zu 550 cm/s² gemessen, die damit bis zu 25 % höher waren als die Ausle-

gungswerte der Anlagen (design basic values). Es wird von keinen wesentlichen Schäden durch die Erdstöße berichtet. Die Anlagen sind in einen stabilen Zustand überführt worden.

2.2 Die Tsunamiwelle

Eine knappe Stunde später, um 15:41 h, erreichte eine vom Seebeben ausgelöste Tsunamiwelle mit einer Höhe von ca. 14 m die Standortküste. Der zum Anlagenschutz im Küstenbereich errichtete 5,7 m hohe Betonwall (s.a. Abbildung 4) nahm der Welle einen Großteil des Horizontalimpulses, wurde aber überspült. Die Welle überflutete folgend das Anlagengelände und verursachte dabei schwere Zerstörungen an Kernkraftwerkseinrichtungen. Folgeschwer waren der Ausfall der Notstromdieselgeneratoren und damit der Span-

nungs- und Stromversorgung der Notkühlsysteme bzw. der Wärmesenken mit der Haupt- und Nebenkühlwasserversorgung. Zur Ausfallursache werden derzeit u.a. 2 Szenarien diskutiert:

- i) Die Tsunamiwelle hat die im Hafenbereich installierten Dieseltanks mit sich gerissen und damit die Treibstoffzufuhr für die Dieselgeneratoren unterbrochen, und/oder
- ii) die Tsunamiwelle hat über Kabel- und Leitungsschächte die Kellerräume der Anlagen geflutet und damit elektrische Kurzschlüsse in der Notstromversorgung verursacht oder die Luftzufuhr zu den Dieselmotoren dauerhaft unterbrochen (s.a. Abbildung 5).

2.3 Unfallentwicklung im Kernkraftwerk Fukushima-Daiichi und Accident Management zur Begrenzung der Unfallfolgen

Mit dem Ausfall der Dieselgeneratoren standen nur noch Batterien zur Stromversorgung zur Verfügung und der passive Isolation Condenser im Block 1 ging in Betrieb. In den Blöcken 2 und 3 speisten dampfbetriebene Pumpen Wasser aus der Kondensationskammer in den Reaktordruckbehälter. Für die Stromversorgung standen damit nur noch die vorhandenen Batterien für eine kurze Zeitspanne zur Verfügung. Wann und weshalb welche Systeme zur Nachkühlung bzw. Steuerung und Relegung ausfielen, ist derzeit noch nicht bekannt. Das Unfallszenario, das sich folgend entwickelte, ist aus Risikostudien grundsätzlich bekannt und in der Serie der Abbildungen 6a bis 6f in Anlehnung an [1] komprimiert und selbst erklärend wiedergegeben.

Für Block 1 führte dieses Szenario, wie in Abbildung 6f skizziert, am Samstag, 12. März 2011, um 15:36 h zu einer Wasserstoffexplosion, die die Stahlkonstruktion (Reaktorhalle) oberhalb der Reaktor- und Lagerbeckenbedienebene im Reaktorgebäude

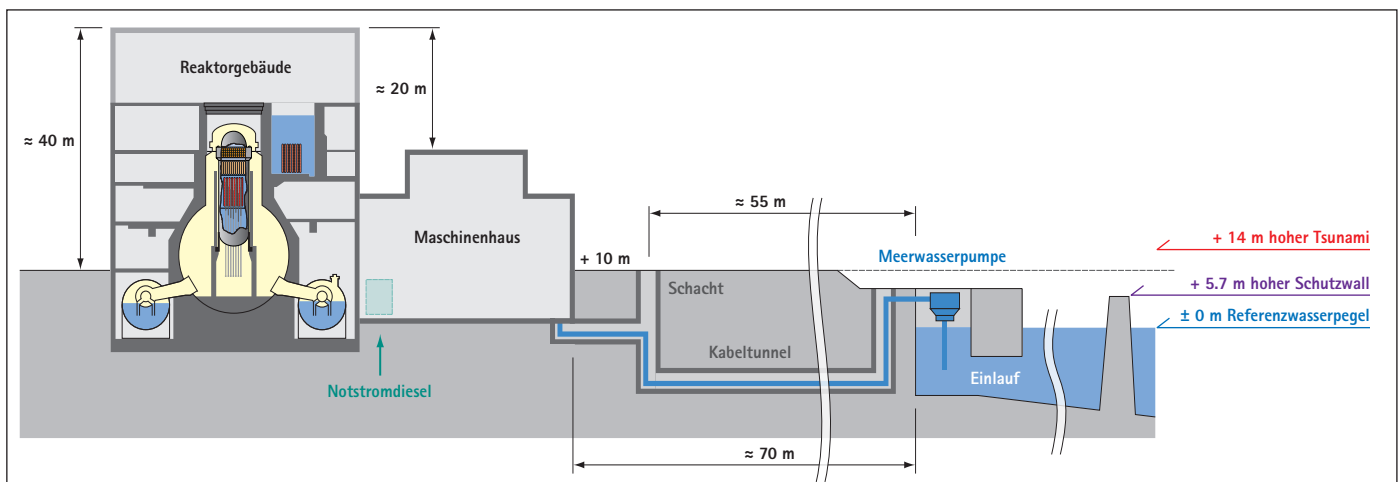


Abb. 4: Die Höhe der Tsunamiwelle relativ zur Kernkraftwerks-Grundstücksoberfläche

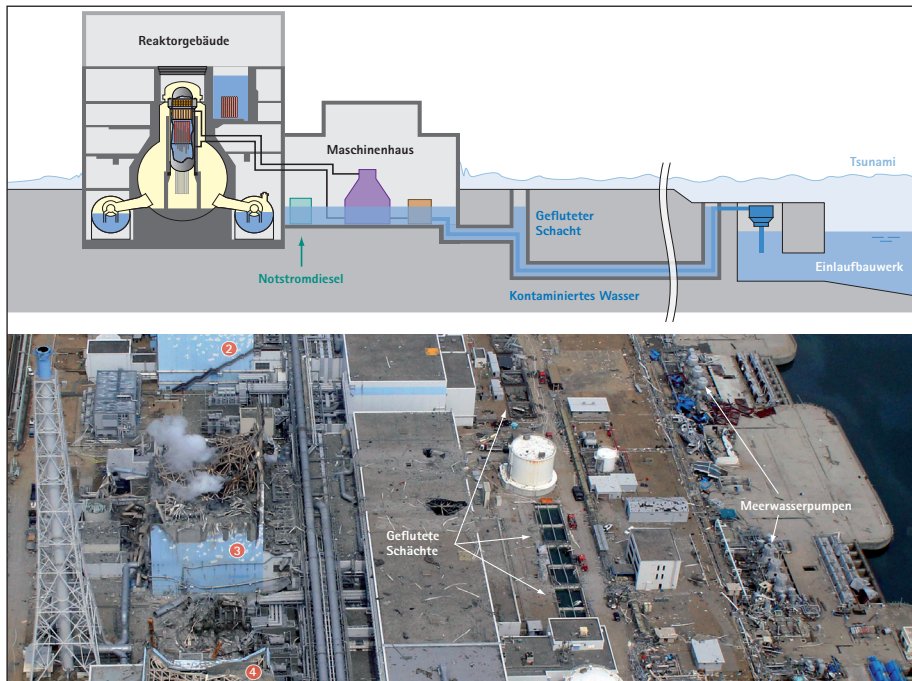


Abb. 5: Mögliche Überflutung der Kernkraftwerks-Kellerräume

dampfte der Wasserpool aufgrund dieser hohen Nachzerfallwärmeleistung und aufgrund einer Abschaltung der Becken-Kühlwasserzufuhr innerhalb weniger Tage aus. Brennstäbe platzten auf und begannen wahrscheinlich auch zu schmelzen (s. Abbildung 7). In den Blöcken 5 und 6 befanden sich Brennelemente sowohl im Reaktor als auch im Abklingbecken. Eine ausreichende Kühlung der Brennelemente konnte in diesen beiden Blöcken sicher gestellt werden.

Erste Präventivmaßnahmen zum Schutz der Bevölkerung vor einer erhöhten Strahlenexposition ordnete die Regierung am 11. März, rund 6 Stunden nach dem Tsunami, für einen 2-km-Radius um den Standort Fukushima-Daiichi an. Am 12. März etwa 4 Stunden nach der ersten Wasserstoffexplosion in Block 1 folgte eine erste Ausweitung der Maßnahmen: Das Gebiet um Fukushima-Daiichi wurde folgend schrittweise mit größer werdendem Radius evakuiert. Etwa 200.000 Men-

(„Sekundärcontainment“) zerstörte. Damit verbunden war die Freisetzung von gasförmigen und leicht flüchtigen Spaltprodukten aus teilweise geschmolzenen Brennstäben in die Atmosphäre, wobei zum Freisetzungsweg noch keine belastbaren Angaben vorliegen.

Die Unfallentwicklungen in den beiden anderen Blöcken 2 und 3 verliefen ähnlich und führten zu Wasserstoffexplosionen am 13. März um 11:02 h in Block 3 und am 15. März um 6:10 h in Block 2. Die Zerstörungen am Sekundär- bzw. Primärcontainment waren vergleichbar. Auch hier ist noch nicht bekannt, welche Systeme verfügbar waren, wann welche ausfielen und wie es aus welchen Gründen zu den Wasserstoffexplosionen kam. Bei Block 2 kam es zu keinen Zerstörungen der Reaktorhalle oberhalb der Reaktor- und Lagerbeckenbedienebene.

Die weitere Entwicklung in Block 3 wurde medial mit besonderer Aufmerksamkeit verfolgt, da in diesem Reaktor über die vergangenen Jahre teilweise insgesamt 32 U-Pu-Mischoxid (MOX)-Brennelemente im Einsatz gewesen waren. Radiologisch bestehen zwischen MOX- und Uranbrennelemente hingegen quasi nur geringe Unterschiede. Im Zustand höheren Abbrands liegen bei beiden Brennelementtypen ähnliche Rest-Plutoniumgehalte vor (MOX durch Abbrennen des Plutoniums, Uran-Brenn-

Abklingbecken

- Ausgangssituation vor dem Erdbeben**
 - Alle Brennelemente aus dem Reaktorkern von Block 4 waren kurz vor dem Erdbeben für Wartungszwecke in das Abklingbecken oberhalb des Sicherheitsbehälters umgesetzt worden (hohe Nachzerfallwärmeleistung), während sich die Brennelemente der Blöcke 5 und 6 (beide in Revision) noch im Reaktorkern befanden.
- Ausdampfen des Wasserinventars im Abklingbecken**
 - Block 4 innerhalb von zehn Tagen,
 - Blöcke 5 und 6 in einigen Wochen.
- Leckagen durch Erdbebenschäden?**
- Konsequenzen**
 - Kernschmelze außerhalb des Sicherheitsbehälters.
 - Praktisch keine Möglichkeit zur Rückhaltung von Spaltprodukten im Reaktorgebäude.
 - Massive Freisetzung flüchtiger Spaltprodukte.

Abb. 7: Brennstabschmelzen im Brennelement-Abklingbecken des Blocks 4

elemente durch Konversion von Uran in Plutonium während des Normalbetriebs).

Anders ist die Entwicklung in den abgeschalteten Blöcken Fukushima 4, 5 und 6. In Block 4 waren zu Wartungszwecken im November 2010 alle Brennelemente aus dem Reaktor in das Abklingbecken umgesetzt worden. Dementsprechend lag eine hohe Nachwärmeproduktion und damit Wärmeentwicklung im Abklingbecken des Blocks 4 mit 1.331 Brennelementen vor. In Block 4

schen wurden bislang aufgefordert, ihre Wohnstätten zu verlassen.

In den weiteren Tagen wurde versucht, die Blöcke 1, 3 und 4 mit Hilfe von Hubschraubereinsätzen mit Meerwasser von oben zu kühlen. Später kamen auch Feuerwehr-, Polizei- und Militäreinsätze mit Wasserwerfern bzw. Betonpumpen mit extra langem Ausleger zum Einsatz.

Die Kühlung der Reaktoren der Blöcke 1 bis 3 wurde entsprechend vorliegender

Accident Management Prozeduren soweit wie möglich mit mobilen Pumpen und Meerwasser provisorisch wieder hergestellt. Die Meerwasserkühlung wurde später auf Frischwasserkühlung umgestellt, um einer Salzkrustenbildung an den Brennstabhüllrohren mit einer möglichen Verschlechterung der Wärmeabfuhr entgegen zu wirken.

Um ein Überdruckversagen der Sicherheitsbehälter zu vermeiden, wurde in verschiedenen Blöcken eine kontrollierte Druckentlastung an die Atmosphäre (Containment Venting) vorgenommen.

Am 15. März brach in Block 4 im Bereich des Abklingbeckens aus noch ungeklärter Ursache ein Feuer aus, das möglicherweise zusammen mit einer Explosion Teile der Gebäudestruktur zerstörte, so dass Radionuklide in die Atmosphäre entweichen konnten.

Am 22. März wurden mit einer mobilen Betonpumpe 150 t Meerwasser in das Abklingbecken von Block 4 gepumpt (s. Abbildung 8). Die Meerwasserkühlung wurde später eingestellt, da eine damit verbundene Salzkrustenbildung an den Brennstabhüllrohren die Wärmeabfuhr verschlechtert.

Parallel dazu wurde intensiv an der Installation einer neuen 1,5 km langen Starkstromleitung zur Versorgung gearbeitet. Am Sonntag, 20. März, war der Standort wieder an das externe Starkstromnetz angeschlossen. Sukzessive wurden die 6 Blöcke mit dem Netz verbunden und die elektrischen Schaltkreise der Regel- und Leittechnik sowie die Versorgungsstränge für die Notkühlung überprüft. Seit dem 2. April sind alle Blöcke wieder an das Stromversorgungsnetz angeschlossen. Aufgrund der Zerstörung durch die Tsunamiwelle und die Explosionen konnte die Stromversorgung nicht direkt auf die existierenden Systeme durchgeschaltet werden. Die Stromversorgung wurde insbesondere dafür eingesetzt, um die mobilen Feuerlöschpumpen, die bis dahin für die Kernkühlung verwendet wurden, durch elektrische Pumpen zu ersetzen.

Am 2. April sickerte hoch radioaktiv belastetes Wasser aus einem ca. 20 cm langen Riss eines mit dem Maschinenhaus des Blocks 2 verbundenen Nebenkühlwasserkanals. Nach verschiedenen vergeblichen Versuchen konnte das Leck am 5. April mit „Flüssigglas“ abgedichtet werden.

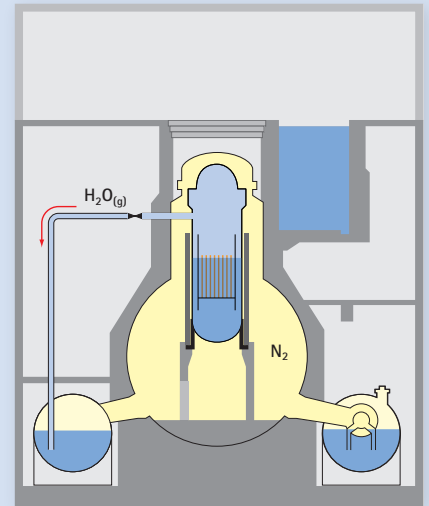
Alle notfallbedingten Aktionen zur Reduzierung der Unfallkonsequenzen wurden durch mehr oder minder starke Nachbeben mit Magnituden von bis zu 7,1 in der Region behindert oder unterbrochen.

Mehrfach musste das Rettungspersonal wegen zu hoher Ortsdosisleistungen vorübergehend abgezogen werden.

Aus der Betrachtung der einzelnen Mosaiksteine zum Unfallgeschehen folgt eine gro-

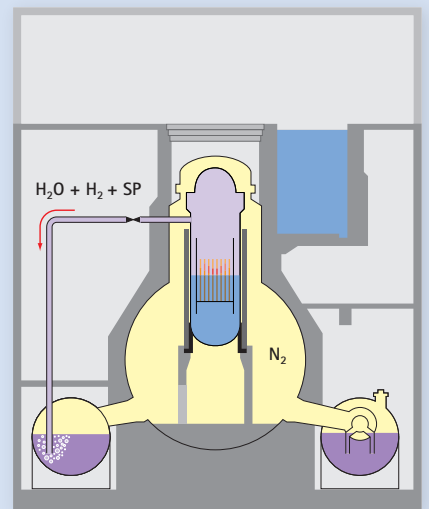
a.) Ausfall der Notkühlsysteme

- ❑ **Über Dampfturbinen angetriebene Notfallpumpen**
 - Block 1 am 11. März, 16:36 Uhr ▶ **Batterien leer,**
 - Block 2 am 14. März, 13:25 Uhr ▶ **Pumpenschaden,**
 - Block 3 am 13. März, 05:10 Uhr ▶ **Batterien leer.**
- ❑ **Ausdampfen** des Reaktorkerns durch Nachzerfallswärme
- ❑ **Druckanstieg** im Reaktordruckbehälter.
- ❑ **Druckentlastung** mittels Abblasen von Wasserdampf über ein Sicherheitsventil und eine Abblaseleitung in die Kondensationskammer.
- ❑ **Sinkender Wasserpegel** im Reaktorkern.
- ❑ **Temperatur- und Druckanstieg** in der Kondensationskammer.



b.) Aufheizphase und Temperatureskalation

- ❑ **Hüllrohrtemperaturen überschreiten 900 °C**
 - Erste lokale Kernschäden durch berstende Hüllrohre.
 - Freisetzung flüchtiger Spaltprodukte aus Brennstäben.
- ❑ **Hüllrohrtemperaturen überschreiten 1200 °C**
 - Beginn der Zirkonium-Wasserdampf-Oxidation $Zr + 2H_2O \rightarrow ZrO_2 + 2H_2 + \text{Wärme}$
 - Selbstverstärkende Aufheizung (**exotherme Reaktion**).
 - Die Oxidation von 1 g Zirconium führt zur Bildung von 44,2 g Wasserstoff.
- ❑ **Vermutete produzierte Wasserstoffmengen**
 - Ungefähr 300 bis 600 kg im Block 1,
 - ungefähr 300 bis 1000 kg in den Blöcken 2 und 3.
- ❑ **Wasserstoff** gelangt zusammen mit Wasserdampf und flüchtigen Spaltprodukten in die Kondensationskammer, in der Temperatur und Druck ansteigen.



c.) Zerstörung und Fluten des Reaktorkerns

- ❑ **Temperaturen ab etwa 1800 °C**
 - Aufschmelzen von noch verbliebenen metallischen Hüllrohrbestandteilen und Edelstahlstrukturen.
 - Verflüssigung von Uranoxid durch metallische Schmelzegemische und Verlagerung bereits weit unterhalb des UO₂-Schmelzpunktes von 2850 °C.
- ❑ **Temperaturen ab etwa 2500 °C**
 - Weitgehende Zerstörung der Brennstabstrukturen,
 - Bildung von Trümmeransammlungen (Schüttbetten).
- ❑ **Temperaturen ab etwa 2700 °C**
 - Bildung keramischer (U, Zr)O₂-Schmelzegemische und vollständiges Aufschmelzen des Reaktorkerns.
- ❑ **Einspeisung von Meerwasser**
 - Block 1 am 12. März, 20:20 Uhr ▶ **≈ 28 h ohne Kühlung,**
 - Block 2 am 14. März, 16:34 Uhr ▶ **≈ 3 h ohne Kühlung,**
 - Block 3 am 13. März, 13:12 Uhr ▶ **≈ 8 h ohne Kühlung.**

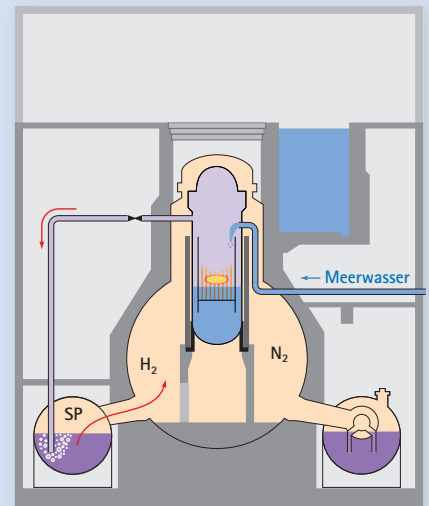


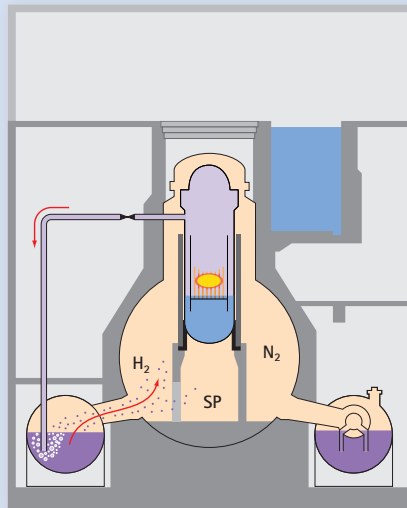
Abb. 6 a–c: Zur Unfallentwicklung in Fukushima-Daiichi Block 1 [1]

ße Wertschätzung gegenüber dem Einsatzpersonal vor Ort. Dabei ist insbesondere zu beachten, dass die Region von 2 schweren Naturkatastrophen getroffen wurde und damit auch die Mitarbeiter des Kernkraftwerks von großem menschlichen Leid betroffen

waren. Diesen musste ohne wesentliche Unterstützung von Außen bewusst werden, wie die Anlagen zu einer der größten Gefahrenquellen in Japan wurden.⁴ Mit dem 12. April 2011 endet dieser Betrachtungszeitraum dieses Unfallgeschehens.⁵ Damit

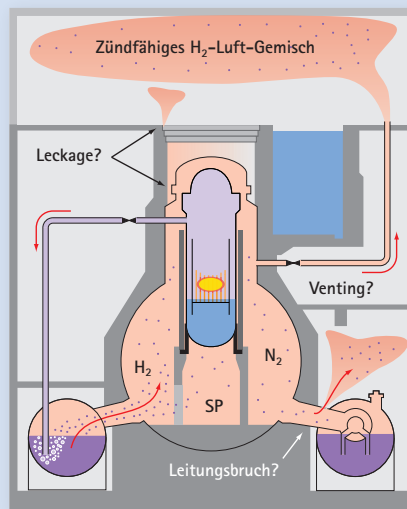
d.) Kontamination des Sicherheitsbehälters

- **Freisetzung von Spaltprodukten**
 - Flüchtige: Xenon, Cäsium, Iod, ...
 - Uran und Plutonium verbleiben im Reaktorkern,
 - Aerosolbildung durch Spaltproduktkondensation.
- **Abblasen** eines Gemisches aus Wasserdampf, Wasserstoff und Spaltprodukten in die Kondensationskammer.
- **Rückhaltung** einiger Aerosole in der Wasservorlage und an Oberflächen der Kondensationskammer.
- **Xenon** und nicht zurückgehaltene Aerosole gelangen in die Atmosphäre des Sicherheitsbehälters.
- **Oberflächenkontamination** durch Aerosolablagerung im Sicherheitsbehälter.



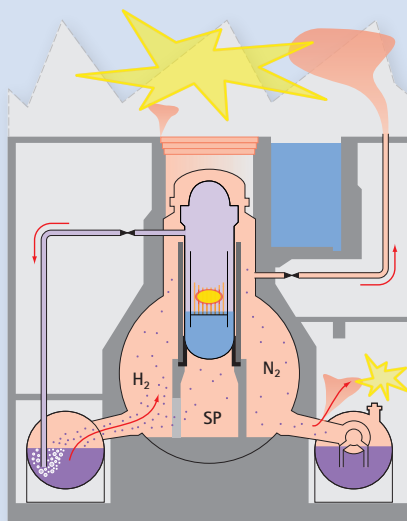
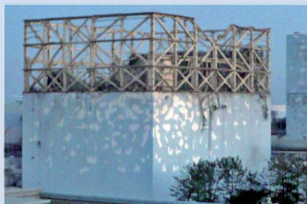
e.) Druckanstieg im Sicherheitsbehälter

- **Funktion und Eigenschaften**
 - Letzte Barriere zur Verhinderung einer Freisetzung von Spaltprodukten in die Umgebung.
 - Wandstärke von etwa 3 cm,
 - Auslegungsdruck von etwa 4 bis 5 bar.
- **Tatsächliche Drücke bis etwa 8 bar**
 - Stickstoffatmosphäre zur Inertisierung plus
 - Wasserstoff aus der Zirkoniumoxidation plus
 - Siedevorgänge in der Kondensationskammer (vergleichbar mit einem Schnellkochtopf).
- **Erste Druckentlastung (Venting)**
 - Block 1 am 12. März, 10:17 Uhr,
 - Block 2 am 13. März, 11:00 Uhr,
 - Block 3 am 13. März, 08:41 Uhr.



f.) Wasserstoffexplosionen

- **Bildung zündfähiger Wasserstoff-Luft-Gemische** nach einer Druckentlastung des Sicherheitsbehälters über betriebliche Entlüftungsleitung, Leckagestellen oder Leitungsschäden
- **Keine Rekombinatoren?**
- **Zerstörung** der Stahlkonstruktion der Reaktorgebäude.
- **Betonstrukturen** der Reaktorgebäude vermutlich nicht oder nicht stark beschädigt.



Tepco für den Zeitraum 12. bis 30. März 2011 zeigen erste relativ kleine Freisetzungen in den ersten 3 Tagen nach den Tsunami-Zerstörungen, z.B. durch gezielte Druckentlastungen der Sicherheitsbehälter der Blöcke 1 und 2. Die ersten großen Freisetzungen erfolgen am 15. März vormittags im Zuge der H₂-Explosionen in den Blöcken 4 und 2 und am 16. März aus dem bereits beschädigten Block 3. Spitzenwerte der Strahlenbelastung lagen kurzzeitig im Bereich 10 bis 12 mSv/h mit der Tendenz einer erst sehr stark und dann asymptotischen Abnahme⁶.

Zur Kontamination des nahen Küstengewässers wurden am 26. März Ergebnisse erster Messungen veröffentlicht. Darin wird die Aktivität von Iod-131 mit 80 Bq/l und die von Cäsium-137 mit 26 Bq/l angegeben⁷); nach Angaben japanischer Sicherheitsbehörden übersteigen diese Angaben den zulässigen Aktivitätsgrenzwert um das 1.250-fache.

In den folgenden Tagen wurde wiederholt leicht radioaktiv kontaminiertes Wasser in das Meer abgepumpt, um Platz/Raum für stärker kontaminiertes Wasser zu schaffen. Dadurch stieg die Küstenwasserkontamination am 31. März zeitweilig an. Am 10. April stellte Tepco die Ableitung von kontaminiertem Wasser in das Meer ein.

Am 11. April plante die japanische Regierung, die 20-km-Evakuierungszone um einzelne anliegende Gebiete zu erweitern, in denen eine jährliche Strahlenexposition von über 20 mSv/a erwartet wird.

Soweit der Zwischenbericht über den Schwerst-Unfall im KKW Fukushima-Daiichi und die seit einem Monat anhaltenden Anstrengungen, den Unfallablauf stabilisierend unter Kontrolle zu bringen. Den Status quo der Anlage vom 26. April 2011 hat das Japan Atomic Industrial Forum (JAIF) übersichtlich komprimiert in Tabelle 2 dargestellt. Darin werden für alle 6 Blöcke die Zustände von und in wichtigen Einzelkomponenten beschrieben und mit farblich unterlegten sicherheitstechnischen Einschätzungen der jeweiligen Situation kommentiert. Darüber hinaus ist ein größerer Abschnitt den bisher ermittelten Umweltauswirkungen gewidmet.

Die japanischen Sicherheitsbehörden hatten die von der Tsunami-Überflutung

⁴ Wären umgehend am 11. März mit Hub-schraubern oder auf dem Seeweg mobile Notstromgeneratoren nach Fukushima gebracht worden, wäre dieser Unfall wahrscheinlich weitaus glimpflicher abgelaufen.

⁵ Eine protokollartige Aufzeichnung der Ereignisabläufe in Fukushima-Daiichi im Zeitraum vom 11. bis 24. März 2011 ist auf Basis verfügbarer Informationen mit ersten Kommentaren in [2] veröffentlicht worden.

⁶ Zum Vergleich: Die natürliche Strahlenbelastung in Deutschland beträgt etwa 2 mSv/a.

⁷ Die Halbwertszeit von I-131 beträgt 8 d, die von Cs-137 ist 30 a.

Abb. 6 d–f: Zur Unfallentwicklung in Fukushima-Daiichi Block 1 [1]

erhält der Beitrag den Charakter eines Interimsreports, der auf einer unvollständigen Faktenbasis noch keine durchgängige standortspezifische Bewertung des Unfallablaufs, der Accident Management Maßnahmen und der Unfallfolgen ermöglicht.

2.4 Unfall bedingte Strahlenbelastung in Fukushima-Daiichi

Daten zur Freisetzung von Radioaktivität in die Kernkraftwerksumgebung sind in Abbildung 9 illustriert. Die Aufzeichnungen von

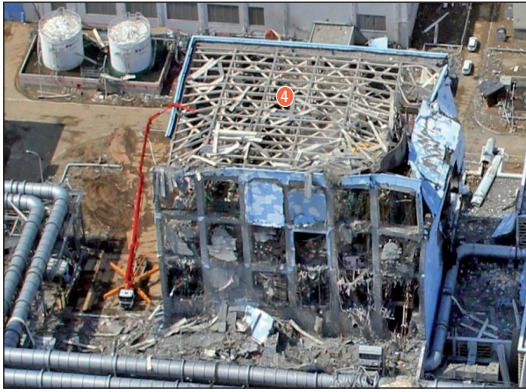


Abb. 8: Eine mobile Betonpumpe mit einer Förderkapazität von 120 t/h und einem flexibel ausfahrbaren Arm von 58 m Länge wurde am Spätnachmittag des 22. März 2011 für etwa 3 Stunden genutzt, um insgesamt 150 t Meerwasser von oben in den zerstörten Block 4 zu sprühen und das Brennelementlagerbecken mit Wasser zu füllen. Diese Maßnahme wurde an den nächsten Tagen mehrfach wiederholt.

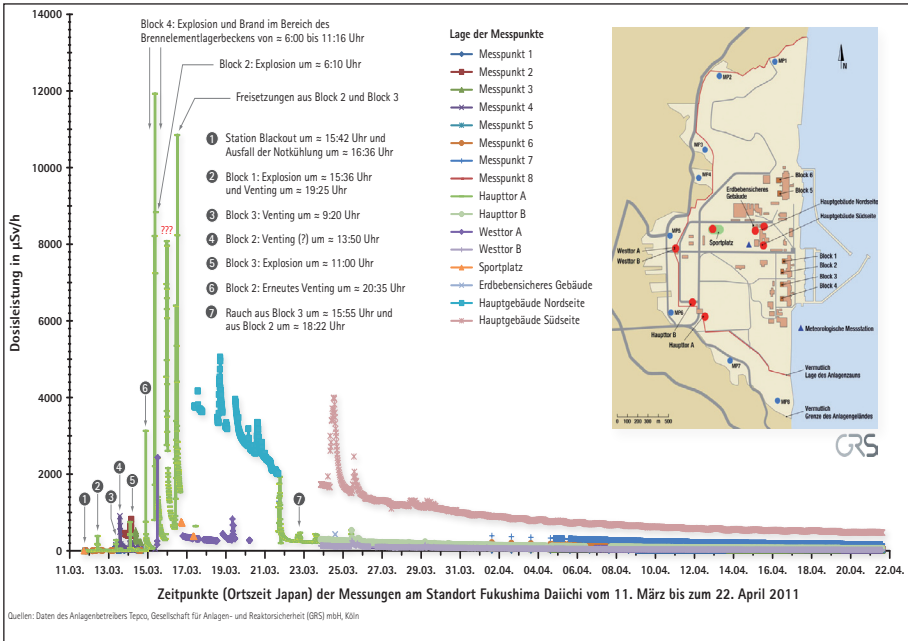


Abb. 9: Die Strahlenbelastung auf dem Gelände von Fukushima-Daiichi

Parameter	Zustand des Kernkraftwerks Fukushima Daiichi am 26. April 2011					
	Block 1	Block 2	Block 3	Block 4	Block 5	Block 6
Ines-Einstufung ¹⁾	7 ²⁾			3	k. A.	k. A.
Reaktorkühlsystem 1 ³⁾	nicht funktionsfähig			nicht notwendig	funktionsfähig	
Reaktorkühlsystem 2 ⁴⁾	nicht funktionsfähig			nicht notwendig	funktionsfähig (cold shutdown)	
Reaktorkern						
• Anzahl der Brennelemente	400	548	548	0	548	764
• Zustand der Brennstäbe	70 % beschädigt	30 % beschädigt	25 % beschädigt	siehe Abklingbecken	unbeschädigt	
• Wassereinspeisung	wird fortgesetzt, Wechsel von Meerwasser zu Süßwasser			nicht notwendig		
Reaktordruckbehälter						
• Druck und Temperatur	schrittweise steigend ⁵⁾	unbekannt / stabil	unbekannt	sicher		
• Wasserstand	Brennstäbe teilweise oder ganz freiliegend			sicher		
Sicherheitsbehälter						
• Zustand	vermutlich unbeschädigt	Schäden vermutet ⁶⁾	vermutlich unbeschädigt	unbeschädigt		
• Druck	leicht gesunken ⁷⁾	stabil		sicher		
• Wassereinspeisung	Bestätigung steht aus	noch zu entscheiden ⁸⁾	Bestätigung steht aus	nicht notwendig		
• Druckentlastung	zeitweise gestoppt			nicht notwendig		
Abklingbecken						
• Anzahl der Brennelemente	292	587	514	1331	946	876
• Zustand der Brennelemente	unbekannt		Schaden vermutet	eventuell beschädigt ⁹⁾	unbeschädigt	
• Kühlung	Besprühung ¹⁰⁾	Einspeisung ¹¹⁾	Einspeisung und Besprühung ¹¹⁾		wiederhergestellt	
Reaktorgebäude	schwer beschädigt ¹²⁾	leicht beschädigt	schwer beschädigt ¹²⁾		Lüftungsöffnung im Dach geschaffen ¹³⁾	
Hauptkontrollraum						
• Funktionsfähigkeit	gering wegen des Stromausfalls				vermutlich unbeeinträchtigt	
• Beleuchtung	wiederhergestellt				vermutlich unbeschädigt	
Sicherheitstechnische Bewertung gemäß Japan Atomic Industrial Forum						
■ hoch ■ mittel ■ niedrig						
¹⁾ Ines: International Nuclear Event Scale ²⁾ aufgrund der am Standort Fukushima Daiichi freigesetzten Gesamtaktivität ³⁾ Wechselstrom, Frischwasser ⁴⁾ Wechselstrom, Wärmetauscher ⁵⁾ nach einem Temperaturanstieg auf mehr als 400 °C am 24. März 2011 leicht gesunken ⁶⁾ sowie Leckagen ⁷⁾ nach einem Druckanstieg auf 0,4 MPa am 24. März 2011 ⁸⁾ Meerwasser ⁹⁾ Annahme basiert auf Wasserprobe aus dem Abklingbecken, in der Radioaktivität gemessen wurde ¹⁰⁾ mit Süßwasser hat begonnen ¹¹⁾ mit Süßwasser wird fortgesetzt, die Wassertemperatur im Abklingbecken von Block 4 betrug rund 83 °C vor und 66 °C nach dem Besprühen am 23. März 2011, Wasserstoffexplosion am 15. März 2011 ¹²⁾ durch Wasserstoffexplosion ¹³⁾ gezielte Maßnahme zur Vermeidung einer Wasserstoffexplosion Quellen: Japan Atomic Industrial Forum (Jair), Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Köln						

Tab. 2: Zustand des KKW Fukushima-Daiichi am 26. April 2011 (Quelle: Japan Atomic Industrial Forum)

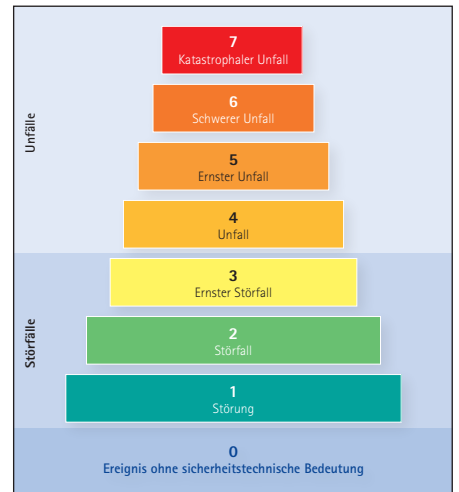


Abb. 10: INES-Skala zur Bewertung von Ereignissen in Nuklearanlagen (Quelle: IAEA)

ausgelösten Ereignisabläufe in den Blöcken 1, 2 und 3 zunächst als schweren Unfall auf der Stufe 5 der INES-Skala ⁸⁾ eingeordnet (s. Abbildung 10); am 12. April 2011 stuften sie die Ereignisse in diesen Blöcken zusammengenommen in die höchste Bewertungsstufe 7 ein.

Insgesamt sind, auch bedingt durch das funktionierende Tsunami-Frühwarnsystem (nur 55 Minuten Zeitabstand zwischen Erdbeben und Eintreffen des Tsunamis am Standort Fukushima-Daiichi) und günstige Windrichtungen, die Schäden und die Strahlenbelastungen in der Region noch begrenzt geblieben.

Je 2 Mitarbeiter sind an den Standorten Fukushima-Daiichi (Erdbeben bedingt) und Fukushima-Daiichi (ertrunken) infolge der Seebeben- bzw. Tsunamieinwirkung ums Leben gekommen. Bei keiner Person wurde von der japanischen Regierung von 100 auf 250 mSv angehobene Strahlenschutzgrenzwert für Beschäftigte überschritten. Weniger als 20 Mitarbeiter am Standort Fukushima-Daiichi sind Dosen zwischen 100 und 180 mSv ausgesetzt worden. Es sind keine Strahlen bedingten Sofortschäden aufgetreten. Das Langzeitrisko für zusätzliche Krebsfälle liegt für die betroffenen Mitarbeiter deutlich unter eins von hundert.

3 Abschließende Bemerkungen

Derzeit ist festzustellen, dass der entscheidende Faktor für den Unfalleintritt nach den bisherigen Erkenntnissen eine falsche, nicht ausreichende Auslegung der Anlagen gegen Tsunamis war. Damit fällt der Unfall, wie erwähnt, nicht in den Bereich des Restrisikos, sondern der – unzureichenden – Basisauslegung gegenüber Einwirkungen von Außen.

⁸⁾ International Nuclear and Radiological Event Scale, publiziert von der International Atomic Energy Agency IAEA in Wien.

Alle betroffenen Kernkraftwerksblöcke an den oben genannten 4 japanischen Standorten haben die direkten Bebenwirkungen relativ unbeschadet überstanden – die Auslegungswerte für die Bodenbeschleunigungen sind maximal um ca. 25 % überschritten worden und die Abschaltprozeduren und der Notstrombetrieb haben auslegungsgemäß funktioniert – bis der Tsunami eintraf.

Vorläufige Risikobetrachtungen zeigen, dass zumindest *Fukushima-Daiichi* nur gegen das 100- bis 1.000-jährige Standorthochwasser ausgelegt war. Immerhin zeigt eine Tsunami-Statistik für alle japanischen Küsten (inkl. der Kurilen) 16 Tsunamis mit Wellenhöhen über 10 m (Auslegung für *Fukushima*: 5,7 m plus 4,3 m Reserve), d.h. alle ca. 30 Jahre trifft ein solcher Tsunami einen japanischen Küstenabschnitt.

Weitere detaillierte Informationen über die Lage in *Fukushima-Daiichi* und der Standortregion, die über den hier betrachteten Zeitraum hinaus gehen, sind u.a. im WWW zugänglich [3, 4, 5].

Über die prompten politisch-öffentlichen Reaktionen in Deutschland auf das katast-

rophale Unfallgeschehen in *Fukushima-Daiichi* und über daraus resultierenden Konsequenzen für die 17 deutschen Kernkraftwerke wird in einer der nächsten *atw*-Ausgaben berichtet werden.

Danksagung

Der Autor bedankt sich herzlich bei allen hier nicht namentlich genannten Experten für die umfangreiche inhaltliche und fachliche Unterstützung und sehr konstruktive Kritik. Besonderer Dank gilt *Dipl.-Ing. Thomas Linnemann, VGB PowerTech*, für die spontane Unterstützung bei der Erstellung dieses Beitrags, insbesondere für die Erstellung und Übertragung der Abbildungen aus dem entsprechenden Vortrag [1],

der weiterhin ständig aktualisiert wird (www.vgb.org).

Referenzen

- [1] *L. Mohrbach, Th. Linnemann*: Presentation: The Tohoku-Taiheiyou-Oki Earthquake and Subsequent Tsunami on March 11, 2011, and Consequences for Nuclear Power Plants in the Northeast of Honshu. Version: April 5, 2011, <http://www.vgb.org>
- [2] Natural disasters lead to nuclear emergency at Japan's *Fukushima Daiichi*. Nuclear News Special Report: *Fukushima Daiichi* after the Earthquake and Tsunami, Nuclear News, April 2011, pp. 17
- [3] Informationen zur Lage in den japanischen Kernkraftwerken. <http://fukushima.grs.de>
- [4] *Fukushima* Nuclear Accident. An Update Log. <http://www.iaeo.org>
- [5] Ergebnisse der *KIT-Arbeitsgruppen*. <http://www.helmholtz.de/kit-fukushima-folgen> ■

© Copyright INFORUM Verlag

Alle Rechte vorbehalten. Kein Teil dieses Sonderdruckes darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages vervielfältigt werden. Unter dieses Verbot fällt insbesondere auch die gewerbliche Vervielfältigung per Kopie, die Aufnahme in elektronische Datenbanken und die Vervielfältigung auf CD-ROM.