



## Fukushima – Darstellung eines Reaktorunfalls

### Handreichung zur Energiegewinnung in Kernkraftwerken und den Ereignissen in Japan

Das Humboldt-ProMINT-Kolleg nimmt den Reaktorunfall in Fukushima, Japan, zum Anlass Lehrerinnen und Lehrern der mathematisch-naturwissenschaftlichen Fächer eine Handreichung zur Verfügung zu stellen, die Grundbegriffe der Energiegewinnung in Kernkraftwerken klären möchte. Das Kolleg, beheimatet an der Humboldt-Universität zu Berlin, ist ein Fächer und Schulformen übergreifendes Projekt zur MINT-Lehrerausbildung. Lehrerinnen und Lehrer, Doktorandinnen und Doktoranden und Studierende entwickeln hier gemeinsam Lehr- und Lernkonzepte sowohl für die Schule als auch für die Lehrerausbildung an der Humboldt-Universität.

Als Informationsquellen empfehlen wir die Internetseiten von offiziellen Organisationen zu nutzen. Dies sind zum Beispiel das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) und die Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS), welche regelmäßige Updates zur Lage in Fukushima veröffentlichen. Auch die Internationale Atomenergiebehörde (IAEA) stellt Informationen bereit. Zum Grundlagenwissen zur Kernenergie sei die Webseite [www.kernenergie.de](http://www.kernenergie.de) empfohlen, vor allem die Broschüre „Kernenergie Basiswissen“ von Martin Volkmer.

**BMU** (deutsch):

[http://www.bmu.de/atomenergie\\_sicherheit/doc/47088.php](http://www.bmu.de/atomenergie_sicherheit/doc/47088.php)

**GRS** (deutsch):

<http://www.grs.de/informationen-zur-lage-den-japanischen-kernkraftwerken-fukushima-onagawa-und-tokai>

**IAEA** (englisch):

<http://www.iaea.org/newscenter/news/tsunamiupdate01.html>

Die Informationen überschneiden sich auf den drei Seiten zum großen Teil.

**Kernenergie Basiswissen** (Broschüre, deutsch)

<http://www.kernenergie.de/kernenergie/documentpool/Service/018basiswissen2007.pdf>

**Diese Handreichung kann auch heruntergeladen werden unter:** <http://www.promint.hu-berlin.de/?s=14>

**Autor**

Stephan Pfeiler

mit freundlicher Unterstützung von

Prof. Dr. Ingolf V. Hertel, André Henning, Nora Butter, Robert Teichert, Pia Henselmann

## Reaktortyp

Bei den Reaktoren des Kernkraftwerks Fukushima handelt es sich um so genannte *Siedewasserreaktoren* der Firma General Electric (GE). Insgesamt verfügt das Kraftwerk über 6 Reaktoren, die im Zeitraum von 1971 bis 1979 erbaut wurden. Die Reaktoren 1 - 5 sind vom Typ General Electric Mark I Boiling Water Reactor (BWR) (siehe Abb. 1-3), Fukushima I - 6 ist ein GE Mark II BWR. Insgesamt produziert das Kraftwerk so 4546 Megawatt elektrische Leistung.<sup>1</sup>

Ein Siedewasserreaktor produziert Strom, indem innerhalb eines pillenförmigen Reaktordruckbehälters (RDB) Wärme erzeugt wird. Diese Wärme wird an Wasser abgegeben, welches die *Brennstäbe* des Reaktors umspült. Der Reaktor wird bei ca. 250° C betrieben, das Wasser siedet und treibt dann als Dampf Turbinen an. Nach dem Passieren der Turbinen kondensiert das Wasser und wird zum erneuten Erhitzen zurück in den Reaktor geleitet (siehe Abb. 4).

Der Brennstoff eines solchen Reaktors setzt sich aus zylindrischen Uran-Pellets zusammen, die ca. 1 cm hoch sind und einen Durchmesser von 1 cm haben. Diese Pellets werden übereinander in Röhren aus *Zirkaloy* gestapelt. Mehrere solche Brennstäbe bilden eine *Brennelement*. Die Gesamtheit aller Brennelemente ist der so genannte Kern.

Zirkaloy ist eine Metalllegierung, die zu ca. 90% aus Zirkonium besteht. Es eignet sich besonders für die

<sup>1</sup>: <http://www.scribd.com/doc/50550192/NIRS-Fact-Sheet-on-Fukushima-Nuclear-Power-Plant>, Stand: 15.03.2011

Verwendung beim Brennelementbau, da es nur sehr schwach mit Neutronen wechselwirkt. Der Schmelzpunkt für diese Zirkaloy Hülle liegt bei 1200° C.<sup>2</sup>

Die Zirkaloy-Hülle bildet die erste von drei Hüllen, die den radioaktiven Brennstoff von der restlichen Welt abschirmen. Der Kern befindet sich in einem Druckbehälter, in dem die Brennelemente von Wasser umspült werden, welches wiederum von den Brennelementen erhitzt wird. Dieser Behälter, der Reaktordruckbehälter, bildet die zweite Hülle. Er ist für einen Druck von ca. 4 bar<sup>3</sup> ausgelegt und kann demnach auch eine Überhitzung des Reaktors um wenige Hundert Grad Celsius auffangen, *solange eine Kühlung funktioniert*.

Der RDB befindet sich innerhalb der dritten Hülle (dem so genannten Containment), die weiterhin die gesamten restlichen Geräte des Reaktors beinhaltet, z.B. das Kühlsystem, Kühlwasserreserven usw. Diese Hülle ist luftdicht und besteht aus solidem Stahl und Beton. Aufgabe der Hülle ist es, bei einer Kernschmelze, das Austreten von radioaktivem Material zu verhindern. Zu diesem Zweck befindet sich unter dem RDB ein Tiegel aus Beton, der mit Graphit gefüllt ist. Dieser soll, im Falle des Schmelzens des Kerns, den geschmolzenen Brennstoff und die Hülle des Druckbehälters auffangen, bis dieser sich abkühlt.

<sup>2</sup>: <http://mitnse.com/2011/03/13/why-i-am-not-worried-about-japans-nuclear-reactors/>, Stand: 15.03.2011

<sup>3</sup>: [http://www.bmu.de/atomenergie\\_sicherheit/doc/47088.php](http://www.bmu.de/atomenergie_sicherheit/doc/47088.php), Stand: 15.03.2011

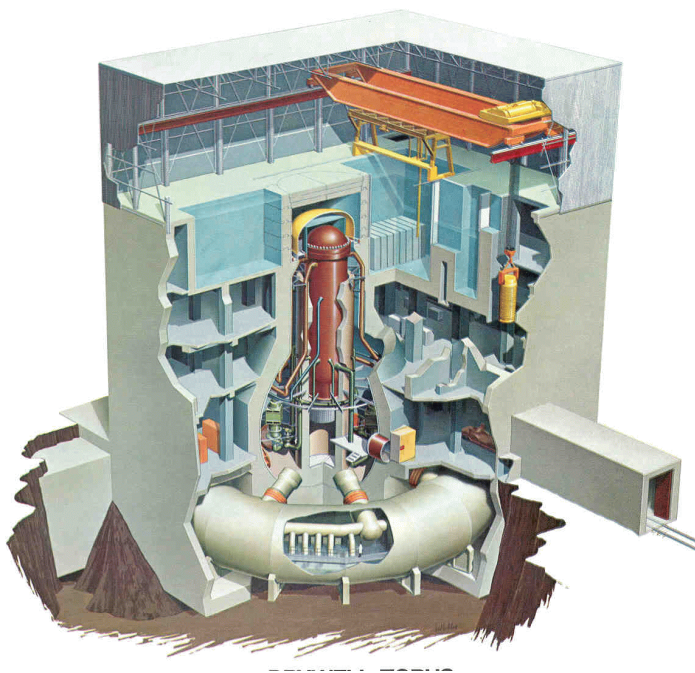


Abb.1: Schnitt durch einen Reaktor GE Mark-I BWR. In der Mitte ist der pillenförmige Reaktorkern zusehen. Er ist vom 3. Containment umgeben, einer luftdicht verschlossenen Hülle aus Beton und Stahl.

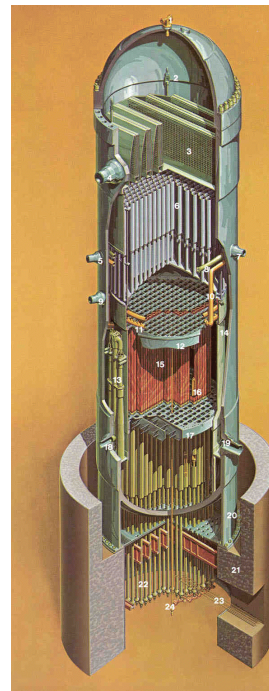


Abb.2: Der Reaktorkern mit Brennelementen (15) und Kontrollstäben (16) (siehe Abb. 3)

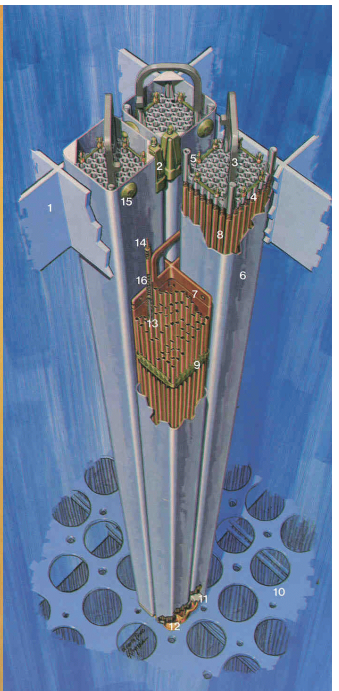


Abb.3: Ein Brennelement mit Brennstäben (8) und Kontrollstab (9)

Um die dritte Hülle wird das Reaktorgebäude gebaut, welches den Reaktor vor Wettereinflüssen schützt. Dies ist der Teil des Reaktors 1, der am 12.03. durch eine Wasserstoffexplosion zerstört wurde.

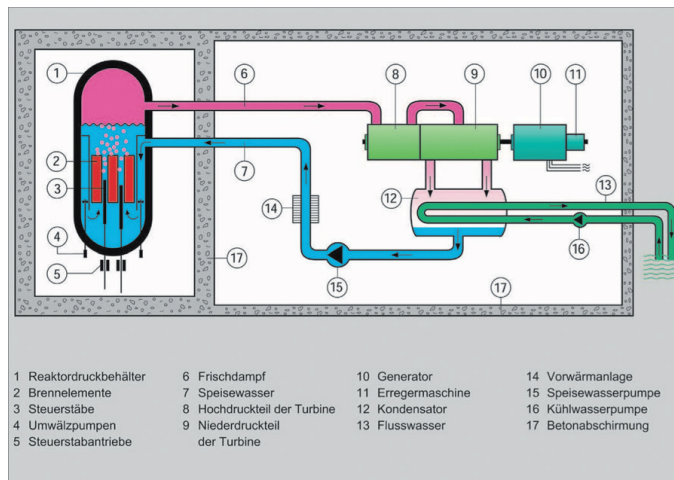


Abb.4: Schema eines Siedewasserreaktors. Aus <http://www.kernenergie.de/kernenergie/documentpool/Service/018basiswissen2007.pdf>

## Zerfallsvorgänge im Reaktor

Innerhalb des Reaktors zerfällt das radioaktive Isotop *Uran-235* in kleinere Isotope anderer chemischer Elemente. Bei diesem Zerfallsprozess entstehen zwei *Neutronen*, die Bestandteile des Atomkerns sind, und Wärmeenergie. Die Neutronen treffen auf weitere Atome des *Uran-235* und regen diese ebenfalls zum Zerfall an. Da bei jedem Zerfall zwei Neutronen entstehen und diese wiederum zwei weitere Atome zum Zerfall anregen, welche wieder je zwei Neutronen produzieren usw., nennt man diese Reaktion eine *Kettenreaktion*.

Ohne Kühlung führt diese Kettenreaktion innerhalb kurzer Zeit zu einer katastrophalen Ansammlung von Wärmeenergie. Das heißt, die Temperatur im Reaktor überschreitet die Schmelztemperatur der Zirkaloy-Ummantelung der Brennstäbe, wodurch radioaktive Abfallprodukte und Uran in den RDB gelangen. Bei stärkeren Beschädigungen können Pellets aus den Brennstäben an den Grund des RDB fallen, wo die Kettenreaktion nicht mehr zu steuern ist.

Zur Kontrolle der Kettenreaktion verfügt jeder Reaktor über die Möglichkeit *Kontrollstäbe*, auch Moderatoren genannt, zwischen die Brennelemente zu bringen. Diese absorbieren die Neutronen und führen zu einem sofortigen Stopp der Kettenreaktion. Außerdem ist es nötig, ständig Wärmeenergie durch die Zirkulation von Wasser durch das System abzuführen. Im normalen Betrieb wird die Leistung des Reaktors über die Eintauchtiefe der Kontrollstäbe geregelt. Es

ist ausreichend, wenn genügend Wasser durch den Kreislauf zirkuliert und dieses die Wärmemenge, die produziert wird, abführt und in Strom umwandelt.

Findet aufgrund von fehlendem Neutronenbeschuss kein Zerfall von Uran mehr statt (Kontrollstäbe vollständig eingefahren), wird dennoch weiter Wärme produziert, da beim Zerfall von Uran Spaltprodukte entstehen, welche ebenfalls radioaktiv sind bzw. sein können. Das heißt, dass auch nach dem Stoppen der Kettenreaktion durch Einfahren der Kontrollstäbe weiterhin eine Kühlung des Reaktors stattfinden muss.

Diese Kühlung sicherzustellen, ist im Moment die entscheidende Aufgabe in Fukushima. Im Normalbetrieb findet die Kühlung über das Wasser des Strom produzierenden Kreislaufs statt. Entsteht jedoch ein Verlust an Kühlflüssigkeit, so stehen mehrere Sicherungssysteme bereit. Im Folgenden sind diese Systeme aufgelistet.

Diese Systeme sind die Reaktorkern-Isolationskühlung (RCIC, reactor core isolation cooling) und das System für die flüssigkeitsgesteuerte Standbykontrolle (SLCS, standby liquid control system). Weiterhin stehen Notfall-Kühlsysteme zur Verfügung: das Hochdruck-Kernkühlungssystem für den Notfall (high pressure emergency core cooling system), hinter dem sich wiederum zwei weitere System verbergen. Zum einen die Hochdruck Kühlmittelzuführung (HPCI, high pressure coolant injection) und die Automatische Druckreduzierung (ADS, automatic depressurization system). Bei niedrigen Drücken im RDB springt das Tiefdruck-Kernkühlungssystem für den Notfall ein, welches ebenfalls aus zwei unabhängigen Teilsystemen besteht: der Kernberieselung (core spray system) und der Tiefdruck Kühlmittelzuführung (LPCI, low pressure coolant injection). Wie die einzelnen Systeme funktionieren und in welchem Fall sie einspringen, kann in einer Veröffentlichung der United States Nuclear Regulatory Commission (USNRC) nachgelesen werden. <sup>4</sup>

## Kernschmelze

Von einer Kernschmelze wird gesprochen, wenn durch zu hohe Temperaturen im Reaktorkern die Brennelemente beschädigt werden. Die Schmelztemperatur der Zirkaloy-Ummantelung der Brennstäbe liegt bei 1200° C. Wird diese Temperatur erreicht, entstehen Schäden an den Brennstäben. Das führt dazu, dass radioaktiver Brennstoff und Spaltprodukte in das Wasser des Reaktorkerns gelangen. Im schlimmsten Fall können die Brennstoffpellets aus den Brennstäben fallen und auf den Boden des Reaktorkerns

<sup>4</sup>: <http://www.nrc.gov/reading-rm/basic-ref/teachers/03.pdf>, Stand: 15.03.2011

sinken. Sammeln sich dort genug Pellets und bilden eine kritische Masse, beginnt die nukleare Kettenreaktion erneut. In diesem Fall gibt es keine Möglichkeit, die Kettenreaktion zwischen den Brennstoffpellets zu stoppen. Dies würde zu einem unkontrollierten Temperaturanstieg und einer vollständigen nuklearen Kernschmelze führen.

Weiterhin gelangt nun radioaktives Material in das Wasser und bei Entlüftungsmaßnahmen zur Druckreduzierung in das Containment und von dort in die Umgebung des Reaktors. Dieses radioaktive Material beinhaltet viele Stoffe, die in kurzer Zeit, wiederum unter Abgabe von radioaktiver Strahlung, in stabile Stoffe zerfallen und dann keine Gefahr mehr darstellen. Allerdings enthält es auch Materialien wie radioaktives Cäsium, Iod, Strontium, Xenon und Barium.

Dieses Iod ist der Grund, warum in solchen Fällen Iodtabletten verteilt werden. Iod sammelt sich in der Schilddrüse an. Nimmt man kleine Mengen eines radioaktiven Iodisotops auf, führt dies zu einer radioaktiven Belastung der Schilddrüse und einem erhöhten Risiko, an Schilddrüsenkrebs zu erkranken. Durch die Einnahme von Iodtabletten wird eine Iodblockade erzeugt, die die Aufnahme von weiterem Iod in das Gewebe zu großen Teilen verhindert.

## Verlauf der Ereignisse in Japan<sup>5</sup>

Das Erdbeben, von dem Japan am 11.03.2011 erschüttert wurde, hatte die Stärke 9,0 auf der Richterskala. Man muss dies in Beziehung zu der Auslegung der Reaktoren von Fukushima setzen. Die Reaktoren sind für Erdbeben der Stärke 8,2 auf der Richterskala ausgelegt gewesen. Die Richterskala ist eine logarithmische Skala. Das bedeutet, dass ein Erdbeben der Stärke 9 über sechs mal soviel Energie freisetzt wie eines der Stärke 8,2. Natürlich liegt das Kernkraftwerk nicht im Epizentrum des Erdbebens, aber es ist erstaunlich, dass das Kernkraftwerk dieses Erdbeben ohne Schäden am Reaktorgebäude überstanden hat. Die Notstromaggregate wurden durch den Tsunami zerstört.

Das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) hat die Ereignisse in Fukushima Daiichi auf seiner Internetseite detailliert aufgezeichnet.<sup>6</sup>

Hier seien einige der Hauptereignisse in chronologischer Reihenfolge für jeden Block des Kraftwerks aufgelistet. Für alle Blöcke des Kraftwerks gilt, dass die Notstromaggregate in Folge des Tsunamis ausgefallen sind. Es wurden mobile Dieselgeneratoren aufgefahren, welche jedoch zuerst

nicht benutzt werden konnten, da keine Verbindung zum elektrischen Netz der Reaktoren hergestellt werden konnte. Inzwischen ist die Versorgung mit Elektrizität allerdings wieder gewährleistet.

## Fukushima Daiichi – Block 1

Aufgrund des Erdbebens wurde der Reaktor automatisch abgeschaltet, das bedeutet, dass die Kontrollstäbe in den Reaktor gefahren und die nukleare Kettenreaktion gestoppt wurde. Der Tsunami zerstörte jedoch die Notstromaggregate, so dass diese die Pumpen für die Kühlung nicht antreiben konnten. Mit den Notfallbatterien konnte der Kühlkreislauf dennoch für 8 Stunden aufrecht erhalten werden. Es wurden dann mobile Notstromaggregate zum Kraftwerk gebracht. Allerdings konnten diese zuerst nicht angeschlossen werden, da sie mit einem falschen Anschluss versehen waren.

Im Laufe des 12.03. stieg der Druck im Containment an, so dass hier eine gefilterte Druckentlastung durch Ablassen von Gas erfolgte. Um 15:36 Uhr fand dann die Explosion des Reaktorgebäudes statt. Inzwischen wird davon ausgegangen, dass es sich dabei um eine Knallgasexplosion handelte, d.h., dass bei der Entlüftung des Containments Wasserstoff an die Luft gelangte. Wasserstoff und Sauerstoff können ein hochexplosives Gemisch bilden, welches sich wahrscheinlich aufgrund der Hitzeentwicklung im Reaktor dann auch entzündete. Wasserstoff entsteht im Reaktor durch eine Reaktion an der Brennstabummantelung aus Zirkonium. Durch die Hitze im Reaktor wird das Wasser des Reaktorkerns am Zirkonium in seine Bestandteile zerlegt. Das Zirkonium wirkt hier als Katalysator, welcher diese Reaktion bei den vorherrschenden Temperaturen erst möglich macht. Das ist in zweierlei Hinsicht gefährlich. Erstens entsteht der bereits erwähnte Wasserstoff und zweitens korrodiert bei diesem Vorgang die Ummantelung der Brennstäbe. Aufgrund der Schutzatmosphäre außerhalb des Reaktorkerns entzündete sich der Wasserstoff nicht im Containment, sondern erst, als er aus dem Containment an die sauerstoffhaltige Atmosphäre gelangte.

Leider war diese Explosion nur die erste von dreien. Wegen der Gefahr, die vom Wasserstoff ausgeht, verfügen modernere Atomkraftwerke über Wasserstoffvernichtungssysteme, die den Wasserstoff kontrolliert abbrennen.

Um den Reaktor endlich effektiv zu kühlen, wurde nun boriertes Meerwasser in den RDB eingeleitet. Bor ist Teil des SLCS (s.o.). Es bremst die Neutronen der Kettenreaktion und wirkt somit als eine Art flüssiger Kontrollstab.

<sup>5</sup>: <http://www.grs.de/informationen-zur-lage-den-japanischen-kernkraftwerken-fukushima-onagawa-und-tokai>, Stand: 23.03.2011

<sup>6</sup>: [http://www.bmu.de/atomenergie\\_sicherheit/doc/47088.php](http://www.bmu.de/atomenergie_sicherheit/doc/47088.php), Stand: 15.03.2011



Am 13.03. wurde zum ersten Mal von der Möglichkeit einer Kernschmelze gesprochen. Die Stromversorgung mittels mobiler Generatoren ist gesichert und die Meerwasser-einleitung wurde durchgeführt.

Wegen zu hoher Strahlungswerte wurde Block 1 am 16.03. zeitweise komplett geräumt. Laut Informationen des BMU stieg der Anteil an beschädigten Brennstäben von 43% auf 70%. Der Wasserstand im Reaktorkern reichte nicht mehr, um die Brennstäbe vollständig mit Wasser zu bedecken. Er lag gegen 17:00 Uhr 1,8 m unter dem oberen Ende der Brennstäbe.

Am 20.03. wurden Kabel zur elektrischen Versorgung der Schaltwarten von Block 1 und 2 gelegt.

### Fukushima Daiichi – Block 2

Der Reaktorkern in Block 2 wurde bis zum 14.3. trotz zu niedrigem Füllstand mit Hilfe eines Notkühlsystems gekühlt. Die elektrische Versorgung wurde auch hier über mobile Generatoren gewährleistet.

Um 13:25 Uhr fiel dann das Kühlsystem aus und es wurde eine Kühlung mit Meerwasser hergestellt. Um 20:00 Uhr stieg der Druck im RDB auf 4,15 bar. Dies entspricht dem Druck für

den diese Art von Reaktoren ausgelegt ist. Das Containment wurde zur Druckentlastung entlüftet. Es wurde ein Loch im Reaktorgebäude geschaffen, um eine erneute Explosion des Reaktorgebäudes zu verhindern.

Am Morgen des 15.03. fand dann auch am Block 2 eine Explosion statt. Der Druck im RDB sank, weshalb man von einem Leck an der Kondensationskammer des Reaktors ausging. Nach Angaben der Betreiberfirma waren zu diesem Zeitpunkt 33% der Brennstäbe in Block 2 beschädigt. Auch hier kam es also zu einer Kernschmelze.

Am 18.03. wurde die Einspeisung von Meerwasser in den RDB fortgesetzt. Dafür wurde das Feuerlöschsystem genutzt.

Am 20.03. erfolgte eine Einspeisung von Meerwasser in das Abklingbecken von Block 2.

Am 22.03. wurden noch einmal 18 Tonnen Meerwasser in das Abklingbecken eingespeist. Die Meerwassereinspeisung in den RDB wurde ebenfalls fortgesetzt.

### Fukushima Daiichi – Block 3

Am 13.03. versagte im Block 3 das Kühlsystem, in Folge dessen auch hier boriertes Meerwasser eingeleitet wurde. Außerdem wurde ebenfalls eine Druckentlastung



Zustand des Kernkraftwerks in Fukushima Nr. 1 (Daiichi) am 21. März 2011 um 14:00 Uhr (MEZ)

Kernkraftwerk	Fukushima Nr. 1 (Daiichi)					
	I	II	III	IV	V	VI
INES-Bewertung	5	5	5	3	k.A.	k.A.
Zustand Kern und Brennstäbe	beschädigt	beschädigt	beschädigt	keine Brennstäbe im Kern	unbeschädigt	unbeschädigt
Zustand Sicherheitsbehälter	unbeschädigt	Schaden vermutet	evtl. nicht beschädigt	unbeschädigt	unbeschädigt	unbeschädigt
Reaktorkühlsystem (Wechselstrom)	nicht funktionsfähig	nicht funktionsfähig	nicht funktionsfähig	nicht notwendig	nicht notwendig, Stromversorgung läuft	nicht notwendig, Stromversorgung läuft
Reaktorkühlsystem (dampfbetrieben)	nicht funktionsfähig	nicht funktionsfähig	nicht funktionsfähig	nicht notwendig	nicht notwendig	nicht notwendig
Reaktorgebäudezustand	schwer beschädigt, Wasserstoffexplosion	leicht beschädigt	schwer beschädigt, Wasserstoffexplosion	schwer beschädigt, Wasserstoffexplosion	Lüftungsloch im Dachbereich geschaffen zur Vermeidung einer Wasserstoffexplosion	
Wasserstand im Reaktordruckbehälter	Brennstäbe teilweise oder ganz freiliegend	Brennstäbe teilweise oder ganz freiliegend	Brennstäbe teilweise oder ganz freiliegend	sicher	sicher („cold shutdown“)	Sicher („cold shutdown“)
Druck im Reaktordruckbehälter	stabil	unbekannt	stabil	sicher	sicher	sicher
Druck im Sicherheitsbehälter (Containment)	stabil	stabil	sinkt nach Zunahme am 20.03.2011	sicher	sicher	sicher
Wassereinspeisung in Reaktorkern	wird fortgesetzt (Meerwasser)	wird fortgesetzt (Meerwasser)	wird fortgesetzt (Meerwasser)	nicht notwendig	nicht notwendig	nicht notwendig
Wassereinspeisung in Sicherheitsbehälter	wird fortgesetzt (Meerwasser)	noch zu entscheiden (Meerwasser)	wird fortgesetzt (Meerwasser)	nicht notwendig	nicht notwendig	nicht notwendig
Druckentlastung Containment (Venting)	zeitweise gestoppt	zeitweise gestoppt	zeitweise gestoppt	nicht notwendig	nicht notwendig	nicht notwendig
Zustand der Brennstäbe im Abklingbecken	Wassereinspeisung wird erwogen	Wassereinspeisung durchgeführt am 20.03.2011	niedriges Niveau, Meerwasserbesprühung wird fortgesetzt und gewisser Effekt wurde bestätigt	niedriges Niveau, Meerwasserbesprühung wird fortgesetzt, Wasserstoffexplosion im Becken	Abklingbecken-kühlungsfähigkeit wurde wieder hergestellt, Wassertemperatur gesunken	Abklingbecken-kühlungsfähigkeit wurde wieder hergestellt, Wassertemperatur gesunken
Umweltauswirkungen	Messpunkt Westtor: 269,5 µ Sv/h um 05:40 (Ortszeit) – Messpunkt nördlich des Versorgungsgebäudes: 2019,0 µ Sv/h um 15:00 (Ortszeit) Radionuklide wurden in der Präfektur Fukushima produzierten Milch und im Spinat aus der Präfektur Ibaragi entdeckt.					
Evakuierungszone	20 km um Kernkraftwerk *Menschen, die zwischen 20 und 30 km von KKW Fukushima 1 entfernt leben, müssen im Haus bleiben.					
Quelle: Governmental Emergency Headquarters: News release (-3/21 19:00); Pressekonferenz; Nuclear and Industrial Safety Agency (NISA): News release (-3/21 15:30), Pressekonferenz; Tokyo Electric Power Company, Inc. (TEPCO): Pressemitteilung (-3/21 15:00), Pressekonferenz.				Sicherheitstechnische Benwertung durch JAIF:		
				hoch	mittel	niedrig

Tabelle des JAIF, Jap. Atomic Industrial Forum, Inc

\*

Übersetzt durch Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit mbH, Köln.

Abb.5: Übersicht über den Zustand der Reaktoren von Fukushima Daiichi. Stand: 21.03.2011 aus [http://www.grs.de/sites/default/files/Status%20KKW%20Fukushima%20Daiichi%20Uhr%20am%2021-03-2011\\_1400.pdf](http://www.grs.de/sites/default/files/Status%20KKW%20Fukushima%20Daiichi%20Uhr%20am%2021-03-2011_1400.pdf)

durchgeführt. Am 14.03. um 11:00 Uhr ereignete sich auch hier eine Wasserstoffexplosion. Das Containment und der RDB blieben dabei aber laut IAEA unbeschädigt.

Am 16.03. wurde eine Dampffahne über dem dritten Block beobachtet. Es wurde vermutet, dass das Containment des Reaktors beschädigt wurde. Die Versuche, mit einem Helikopter Wasser in das Brennelementebecken des Blocks zu schütten, blieben erfolglos. Sie mussten wegen zu hoher Radioaktivität abgebrochen werden. Das Militär hat daraufhin begonnen das Abklingbecken mit Wasserwerfern zu füllen. Auf diese Weise wurden dem Becken bis zum 17.03. 30 Tonnen Wasser zugeführt.

Auch in diesem Reaktor lagen die Brennstäbe im RDB am 16.03. zu ca. 2,3 m frei.

Am 20.03. stieg der Druck im Containment auf 3,2 Bar, konnte aber erfolgreich verringert werden.

Am 22.03. wurde wieder begonnen, den Reaktor mit Hilfe von Wasserwerfern zu besprühen.

Am 23.03. wurde die Umgebung von Block 3 und 4 evakuiert, da über Block 3 schwarzer Rauch aufstieg.

#### Fukushima Daiichi – Block 4

Im RDB des vierten Blocks befinden sich keine Brennelemente. Für eine Revision wurde der Reaktor heruntergefahren. Alle Brennelemente wurden in das

Abklingbecken umgelagert. Im Abklingbecken lagern normalerweise verbrauchte Brennelemente, bis die Restwärme, die durch die Spaltprodukte noch erzeugt wird, soweit reduziert wurde, dass die Elemente weitertransportiert werden können.

Gegen 6 Uhr des 15.03. kam es in der Nähe dieses Beckens zu einer Explosion und zu einem Brand, der gelöscht werden konnte. Durch den Brand und die Explosion wurde ein Loch in das Reaktorgebäude gerissen. Außerdem sank der Wasserstand im Becken. Man versuchte, den Wasserstand mit Hubschraubern und Feuerwehrspritzen wieder zu heben. Am 16.03. brach erneut ein Brand beim Abklingbecken aus. Seit den Löscharbeiten gelten hier zwei Arbeiter als vermisst.

Die Brennelemente wurden vermutlich beschädigt und laut Presseinformation vom 16.03. siedete das Wasser im Abklingbecken. Daher sollte das Becken über die Feuerlöscheinrichtung mit Wasser gespeist werden. Weiterhin wurde ein Wasserwerfer der Polizei zum Standort gebracht, konnte aber zunächst nicht eingesetzt werden, da erst Schutt weggeräumt werden musste.

Am 21.03. wurde das Abklingbecken von 13 Wasserwerfern mit Wasser besprüht.

Am 22.03. wurde die Schaltanlage an das Stromnetz angeschlossen. Ab ca. 17 Uhr wurde das Abklingbecken für über drei Stunden von einer Autobetonpumpe mit Wasser befüllt.

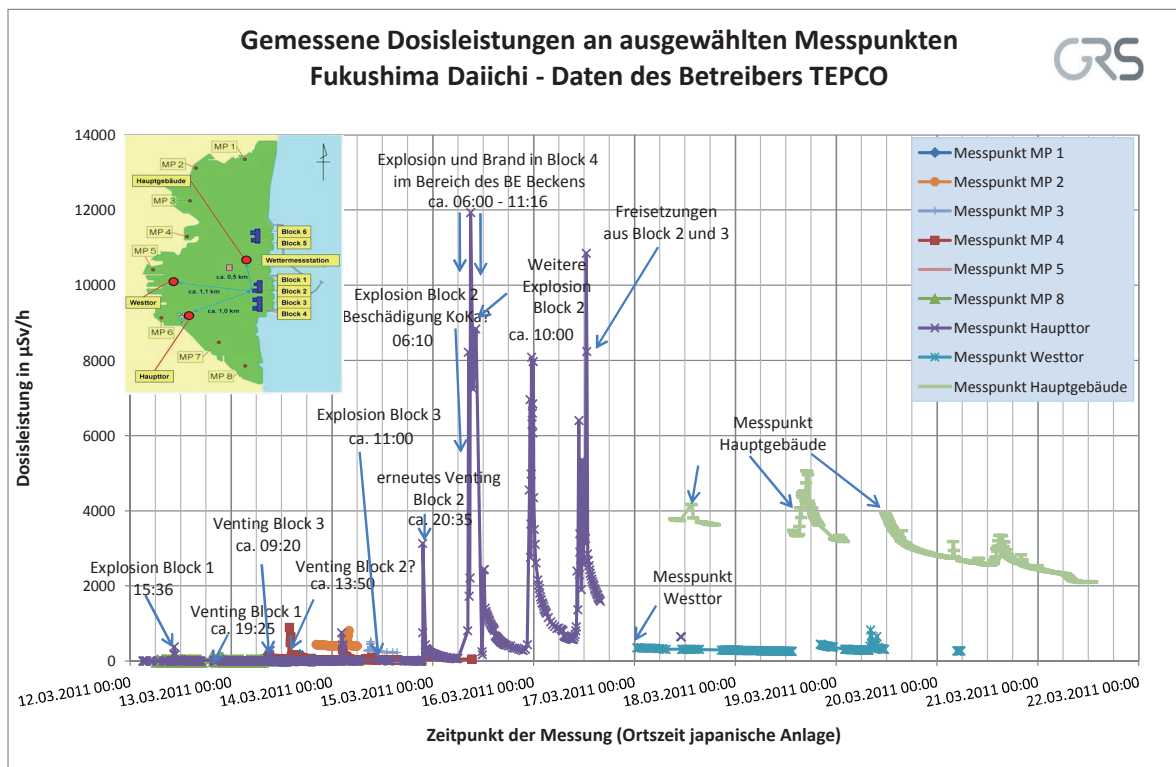


Abb. 6: Messungen des Kraftwerksbetreibers zur Dosisleistung (Dosis pro Zeit), die an unterschiedlichen Orten des Kraftwerksgeländes gemessen wurde. Aus [http://www.grs.de/sites/default/files/images/Radiation-Data\\_Daiichi\\_20110321-0800.pdf](http://www.grs.de/sites/default/files/images/Radiation-Data_Daiichi_20110321-0800.pdf)

## Fukushima Daiichi – Blöcke 5 und 6

Am 15.03. wurde berichtet, dass der Wasserstand im Abklingbecken von Reaktor 5 sinkt. Am 16.03. war sicher, dass die Wasserstände in den Abklingbecken beider Reaktoren sinken. Die Temperaturen in den Becken betragen ca. 60 °C. Der Normalwert liegt unter 25 °C. Um 17:30 Uhr wurde mitgeteilt, dass ein Notstromdieselgenerator die Energieversorgung der Wassereinspeisung in die Abklingbecken der Blöcke 5 und 6 übernommen hat.

Am 19.03. war die Reparatur an einem zweiten Notstromgenerator abgeschlossen. Damit konnten die Nachkühlsysteme für beide Abklingbecken wieder in Betrieb genommen werden. Am 20.03. wurde in beiden Blöcken der Zustand „kalt, unterkritisch“ erreicht.

## Radiologie – Gesundheitliche Folgen<sup>7</sup>

### Energiedosis, Organdosis und Effektivdosis

Die gesundheitsgefährdende Wirkung von radioaktiver Strahlung liegt in der Eigenschaft begründet, dass radioaktive Strahlung andere Stoffe ionisieren kann. Bei der Ionisierung gibt die Strahlung ihre Energie oder einen Teil ihrer Energie an den ionisierten Stoff ab. Eine feste Menge Strahlungsenergie kann also nur eine feste Menge Stoff ionisieren. Die Strahlung wird dabei verbraucht oder absorbiert. Wieviel Energie von einem Kilogramm Stoff absorbiert werden kann, hängt von dem Stoff ab. Der Bleimantel zum Schutz des medizinischen Personals beim Röntgen absorbiert sehr viel Röntgenstrahlung, so dass hinter den Bleimantel keine oder nur noch wenig Strahlung gelangt. Der menschliche Körper absorbiert in verschiedenen Bereichen unterschiedlich viel Röntgenstrahlung. Darum sind Knochen auf einem Röntgenbild sichtbar. Sie absorbieren mehr Röntgenstrahlung als das umliegende Gewebe.

Wie kann die Strahlendosis, der ein Mensch ausgesetzt wird, gemessen werden und was bedeutet dies für die Gesundheit dieses Menschen? In den Medien wird die Einheit Millisievert pro Stunde verwendet. Die Einheit Sievert ist die Einheit für die so genannte *Organdosis*. Betrachtet man, wie Strahlung generell gemessen wird, so kommt man zuerst auf die so genannte *Energiedosis*.

Der Quotient „absorbierte Energie pro Masse“ eines Stoffes wird Energiedosis genannt. Die Einheit der Energiedosis ist das Gray (Gy).

Diese Größe ist allerdings noch ungeeignet, um eine

<sup>7</sup>: <http://www.kernenergie.de/kernenergie/documentpool/Service/018basiswissen2007.pdf>, Stand: 18.03.2011

biologische Auswirkung der Strahlung anzugeben. Das liegt an den unterschiedlichen Wirkungen, die die verschiedenen Arten von Strahlung mit der gleichen Energie erzeugen. Als Beispiel sei der Unterschied zwischen Alpha- und Betastrahlung genannt. Werden zwei gleiche Gewebe mit derselben Energiedosis, die eine jedoch mit Alpha-, die andere mit Betastrahlung bestrahlt, so weist das mit Alphastrahlung bestrahlte Gewebe eine ca. 20-mal größere Schädigung auf als das Vergleichsgewebe.

Um diese Unterschiede vergleichbar zu machen, hat die Internationale Strahlenschutzkommission (ICRP) 1991 eine Tabelle mit Gewichtungsfaktoren für die verschiedenen Strahlungsarten herausgegeben. Wird der Mensch einer Mischung von verschiedenen Strahlungen ausgesetzt, so ergibt sich die Organdosis aus der Summe aller Energiedosen der einzelnen Strahlungsarten, gewichtet mit den Gewichtungsfaktoren. Die Einheit für die Organdosis ist das Sievert.

Die Angabe Sievert pro Stunde gibt also an, wie vielen Sievert man ausgesetzt wäre, würde man sich eine Stunde in dem Strahlengebiet aufhalten.

Darüber hinaus muss betrachtet werden, dass verschiedene Organe des Menschen unterschiedlich sensibel auf Bestrahlung reagieren. Auch für die Organe des Menschen gibt es eine Tabelle mit Gewichtungsfaktoren aus der sich mit den einzelnen Organdosen die so genannte Effektivdosis errechnet. Dieser Wert kann zur Risikoabschätzung genutzt werden, um einschätzen zu können, welche Spätfolgen von der Bestrahlung zu erwarten sind.

### Wirkungen auf den menschlichen Körper

Die Schäden, die ein Mensch durch Strahlung erleiden kann, werden in zwei Kategorien unterteilt: somatische Schäden und genetische Schäden. Somatische Schäden sind Schäden, die sich direkt auf den Körper der bestrahlten Person auswirken. Genetische Schäden betreffen das Erbgut des Menschen und werden an die Kinder der bestrahlten Personen weitervererbt.

Die somatischen Schäden werden noch einmal in somatische Spät- und somatische Frühschäden unterteilt. Die Einteilung ist leicht zu verstehen. Frühschäden beschreiben die Symptome der Strahlenkrankheit, also Verbrennungen durch Strahlung, Kopfschmerzen, Übelkeit usw. Die Spätschäden werden noch ein weiteres Mal unterteilt in maligne (bösartig wuchernde, z.B. Leukämie) und nicht maligne (nicht bösartig wuchernde, z.B. Unfruchtbarkeit) Spätschäden.

Man kann eine ungefähre Einschätzung geben, ab welchen

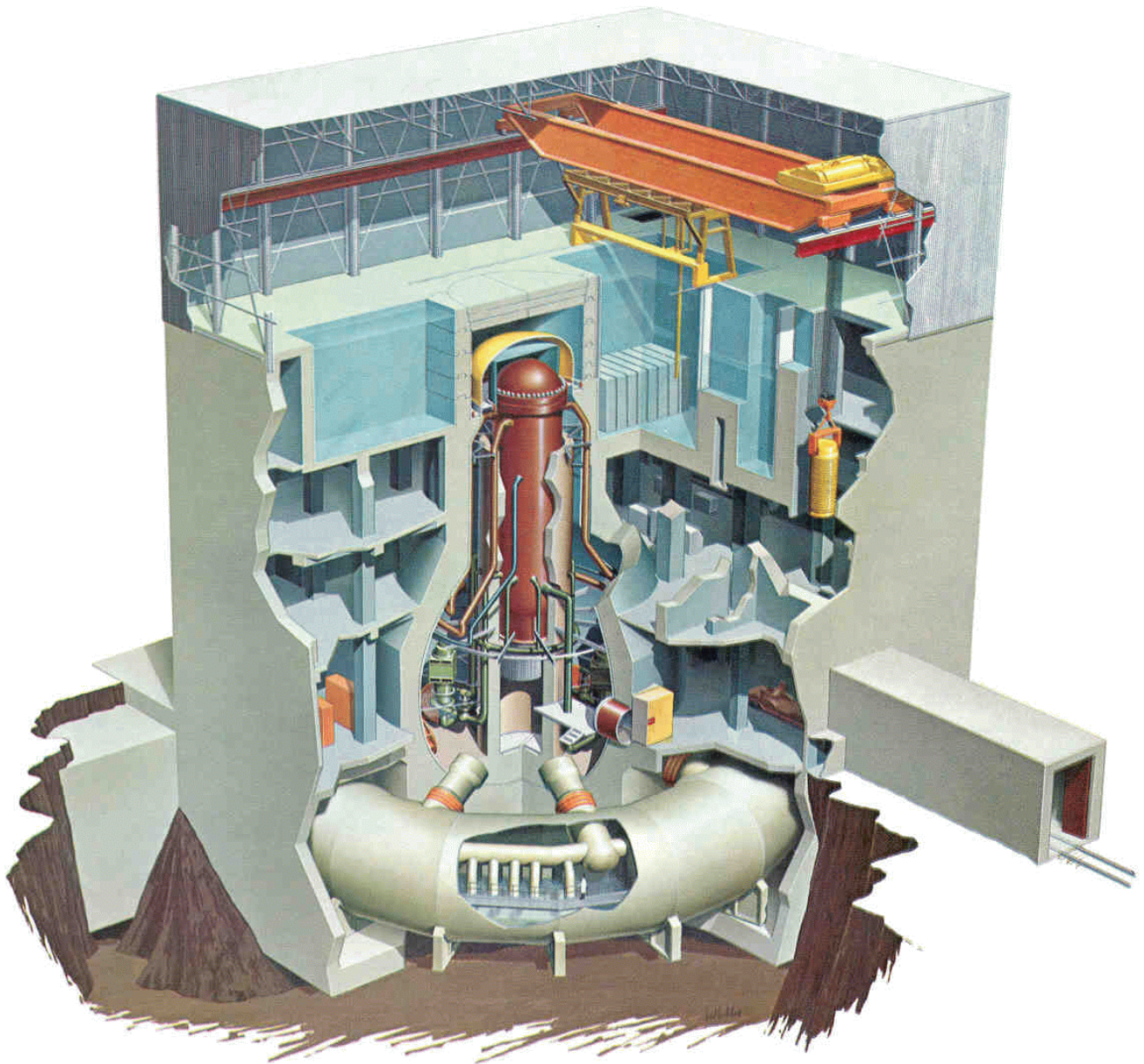
Dosen welche Schäden auftreten. Nur bei den Spätschäden ist man sich noch nicht einig, ob es hier den Schwellenwert einer Dosis gibt, wenn, dann ist dieser wahrscheinlich sehr klein. Für Spätschäden gilt: eine höhere Strahlendosis verursacht keinen schwereren Krankheitsverlauf, aber ein höheres Risiko zu erkranken.

Die natürliche Strahlenexposition in Deutschland beträgt im Mittel 2,1 mSv/a (per anno, also pro Jahr). Zum Vergleich: bei einer medizinischen Strahlenanwendung beträgt die effektive Dosis etwa 1,8 mSv/a. Das Wohnen in Granit- oder Betonbauten verursacht noch einmal 3 mSv/a.

Erste unmittelbar messbare Auswirkungen auf den menschlichen Körper treten ab einer Belastung von ca. 250 mSv auf. Etwa 1000 mSv führen zu einer vorübergehenden Strahlenkrankheit, dem so genannten Strahlenkater. 4000 mSv führt zu schwerer Strahlenkrankheit. Diese überleben nur ca. 50% der Betroffenen, wenn keine Therapiemaßnahmen durchgeführt werden.

Als tödliche Dosis gelten ca. 7000 mSv. Ohne medizinische Therapiemaßnahmen sterben 100% der betroffenen Personen.





## DRYWELL TORUS

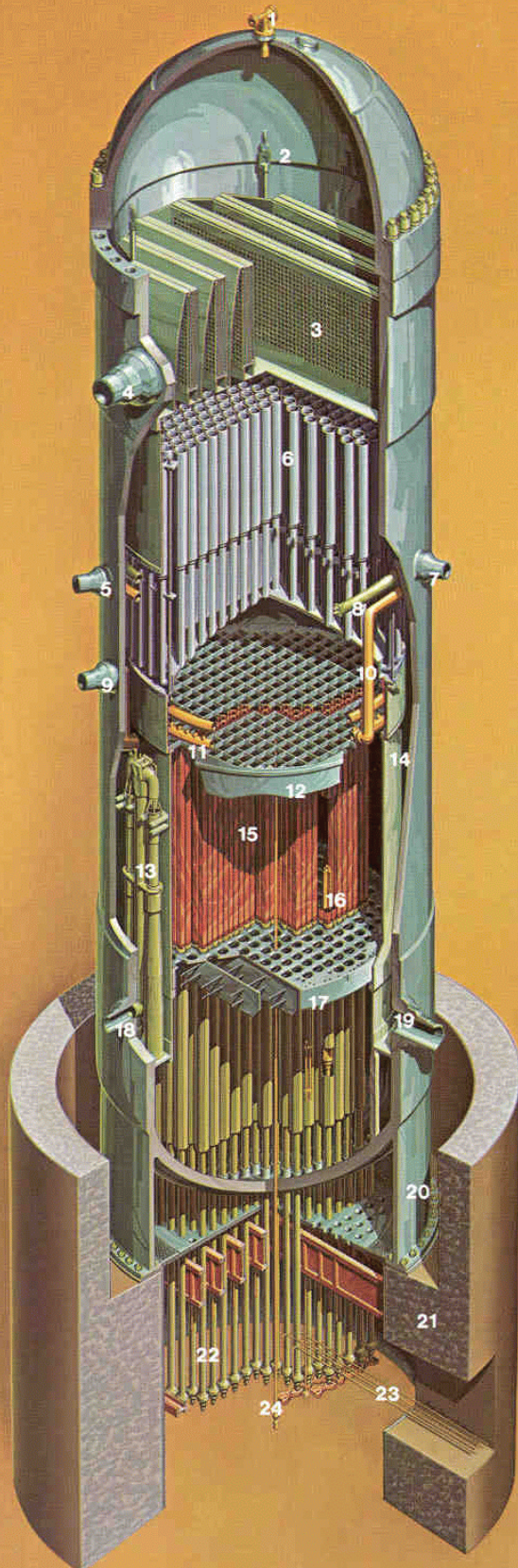
GENERAL  ELECTRIC

GEZ-4396



# BWR/6

## REACTOR ASSEMBLY



1. VENT AND HEAD SPRAY
2. STEAM DRYER LIFTING LUG
3. STEAM DRYER ASSEMBLY
4. STEAM OUTLET
5. CORE SPRAY INLET
6. STEAM SEPARATOR ASSEMBLY
7. FEEDWATER INLET
8. FEEDWATER SPARGER
9. LOW PRESSURE COOLANT INJECTION INLET
10. CORE SPRAY LINE
11. CORE SPRAY SPARGER
12. TOP GUIDE
13. JET PUMP ASSEMBLY
14. CORE SHROUD
15. FUEL ASSEMBLIES
16. CONTROL BLADE
17. CORE PLATE
18. JET PUMP / RECIRCULATION WATER INLET
19. RECIRCULATION WATER OUTLET
20. VESSEL SUPPORT SKIRT
21. SHIELD WALL
22. CONTROL ROD DRIVES
23. CONTROL ROD DRIVE HYDRAULIC LINES
24. IN-CORE FLUX MONITOR

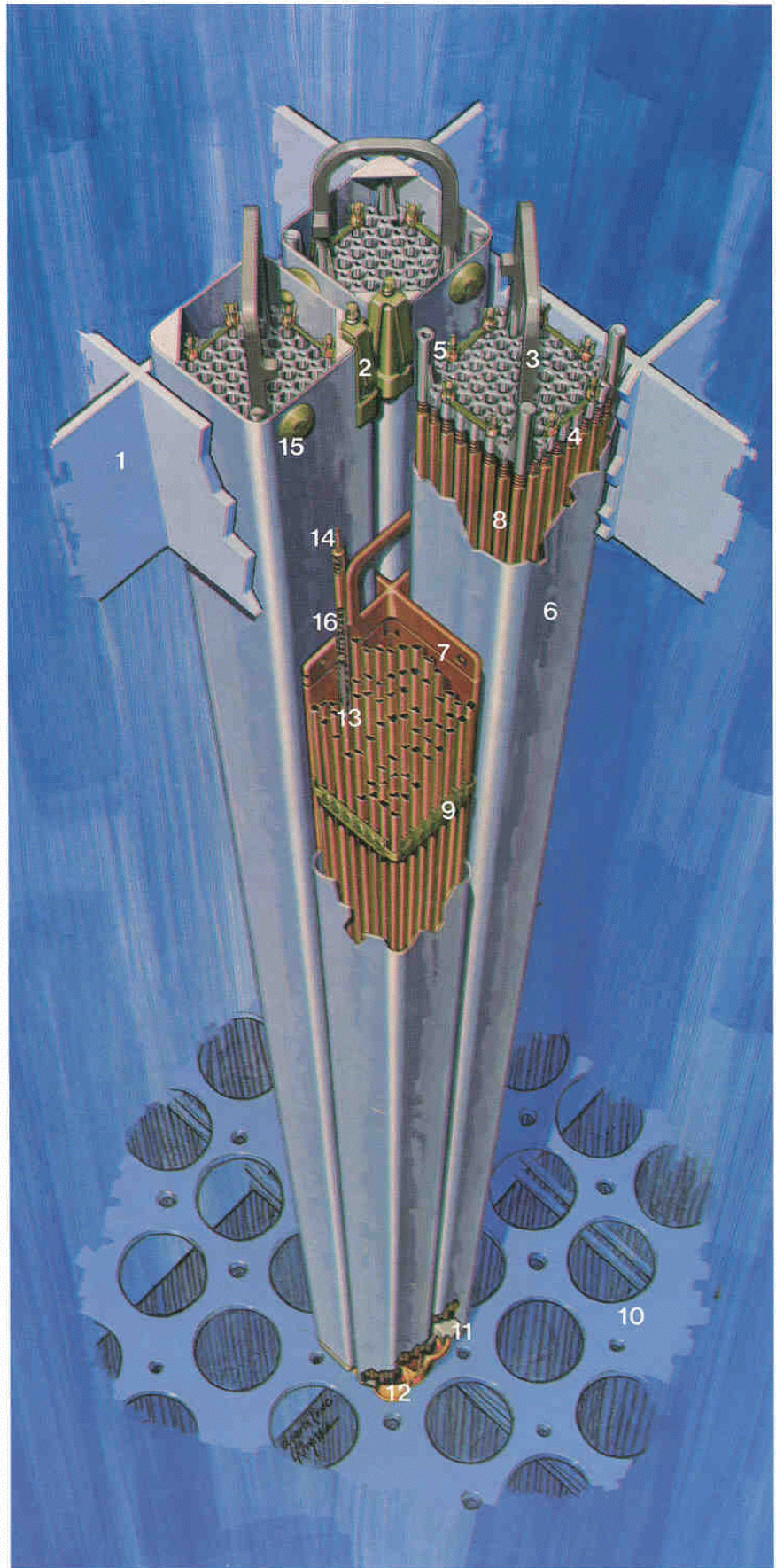
GENERAL  ELECTRIC



# BWR/6 FUEL ASSEMBLIES & CONTROL ROD MODULE

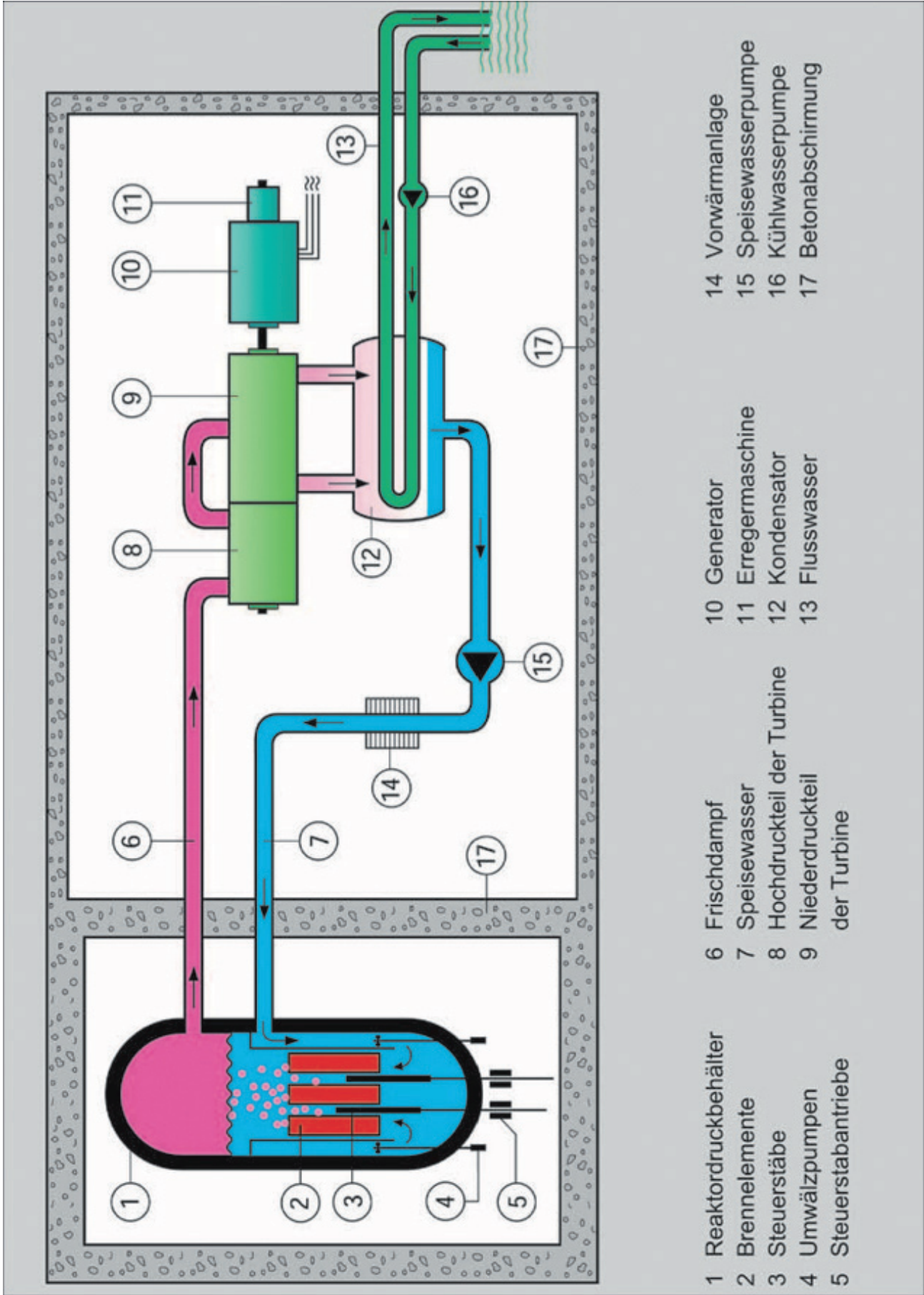
- 1.TOP FUEL GUIDE
- 2.CHANNEL FASTENER
- 3.UPPER TIE PLATE
- 4.EXPANSION SPRING
- 5.LOCKING TAB
- 6.CHANNEL
- 7.CONTROL ROD
- 8.FUEL ROD
- 9.SPACER
- 10.CORE PLATE ASSEMBLY
- 11.LOWER TIE PLATE
- 12.FUEL SUPPORT PIECE
- 13.FUEL PELLETS
- 14.END PLUG
- 15.CHANNEL SPACER
- 16.PLENUM SPRING

GENERAL  ELECTRIC



GEZ-4383





- |   |                      |    |                             |    |                   |
|---|----------------------|----|-----------------------------|----|-------------------|
| 1 | Reaktordruckbehälter | 6  | Frischdampf                 | 14 | Vorwärmanlage     |
| 2 | Brennelemente        | 7  | Speisewasser                | 15 | Speisewasserpumpe |
| 3 | Steuerstäbe          | 8  | Hochdruckteil der Turbine   | 16 | Kühlwasserpumpe   |
| 4 | Umwälzpumpen         | 9  | Niederdruckteil der Turbine | 17 | Betonabschirmung  |
| 5 | Steuerstabantriebe   |    |                             |    |                   |
|   |                      | 10 | Generator                   |    |                   |
|   |                      | 11 | Erregermaschine             |    |                   |
|   |                      | 12 | Kondensator                 |    |                   |
|   |                      | 13 | Flusswasser                 |    |                   |

Abb. 4: Schema eines Siedewasserreaktors. Aus <http://www.kernenergie.de/kernenergie/documentpool/Service/o18basiswissen2007.pdf>

Zustand des Kernkraftwerks in Fukushima Nr. 1 (Daiichi) am 21. März 2011 um 14:00 Uhr (MEZ)

Kernkraftwerk	Fukushima Nr. 1 (Daiichi)					
	I	II	III	IV	V	VI
<b>Block</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>3</b>	<b>k.A.</b>	<b>k.A.</b>
<b>INES-Bewertung</b>						
Zustand Kern und Brennstäbe	beschädigt	beschädigt	beschädigt	keine Brennstäbe im Kern	unbeschädigt	unbeschädigt
Zustand Sicherheitsbehälter	unbeschädigt	Schaden vermutet	evtl. nicht beschädigt	unbeschädigt	unbeschädigt	unbeschädigt
Reaktorkühlsystem (Wechselstrom)	nicht funktionsfähig	nicht funktionsfähig	nicht funktionsfähig	nicht notwendig	nicht notwendig, Stromversorgung läuft	nicht notwendig, Stromversorgung läuft
Reaktorkühlsystem (dampfbetrieben)	nicht funktionsfähig	nicht funktionsfähig	nicht funktionsfähig	nicht notwendig	nicht notwendig	nicht notwendig
Reaktorgebäudezustand	schwer beschädigt, Wasserstoffexplosion	leicht beschädigt	schwer beschädigt, Wasserstoffexplosion	schwer beschädigt, Wasserstoffexplosion	Lüftungsloch im Dachbereich geschaffen zur Vermeidung einer Wasserstoffexplosion	Lüftungsloch im Dachbereich geschaffen zur Vermeidung einer Wasserstoffexplosion
Wasserstand im Reaktordruckbehälter	Brennstäbe teilweise oder ganz freiliegend	Brennstäbe teilweise oder ganz freiliegend	Brennstäbe teilweise oder ganz freiliegend	sicher	sicher („cold shutdown“)	Sicher („cold shutdown“)
Druck im Reaktordruckbehälter	stabil	unbekannt	stabil	sicher	sicher	sicher
Druck im Sicherheitsbehälter (Containment)	stabil	stabil	sinkt nach Zunahme am 20.03.2011	sicher	sicher	sicher
Wassereinspeisung in Reaktorkern	wird fortgesetzt (Meerwasser)	wird fortgesetzt (Meerwasser)	wird fortgesetzt (Meerwasser)	nicht notwendig	nicht notwendig	nicht notwendig
Wassereinspeisung in Sicherheitsbehälter	wird fortgesetzt (Meerwasser)	nicht zu entscheiden (Meerwasser)	wird fortgesetzt (Meerwasser)	nicht notwendig	nicht notwendig	nicht notwendig
Druckentlastung Containment (Venting)	zeitweise gestoppt	zeitweise gestoppt	zeitweise gestoppt	nicht notwendig	nicht notwendig	nicht notwendig
Zustand der Brennstäbe im Abklingbecken	Wassereinspeisung wird erwogen	Wassereinspeisung gestoppt	niedriges Niveau, Meerwasserbesprühung wird fortgesetzt und gewisser Effekt wurde bestätigt	niedriges Niveau, Meerwasserbesprühung wird fortgesetzt, Wasserstoffexplosion im Becken	Abklingbecken-kühlungsfähigkeit wieder hergestellt, Wassertemperatur gesunken	Abklingbecken-kühlungsfähigkeit wurde wieder hergestellt, Wassertemperatur gesunken
Umweltauswirkungen	Messpunkt Westtor: 269,5 µ Sv/h um 05:40 (Ortszeit) – Messpunkt nördlich des Versorgungsgebäudes: 2019,0 µ Sv/h um 15:00 (Ortszeit) Radionuklide wurden in der Präfabrikur Fukushima produziert Milch und im Spinat aus der Präfabrikur Ibaragi entdeckt.					
Evakuierungszone	*Menschen, die zwischen 20 und 30 km von KKW Fukushima 1 entfernt leben, müssen im Haus bleiben.					

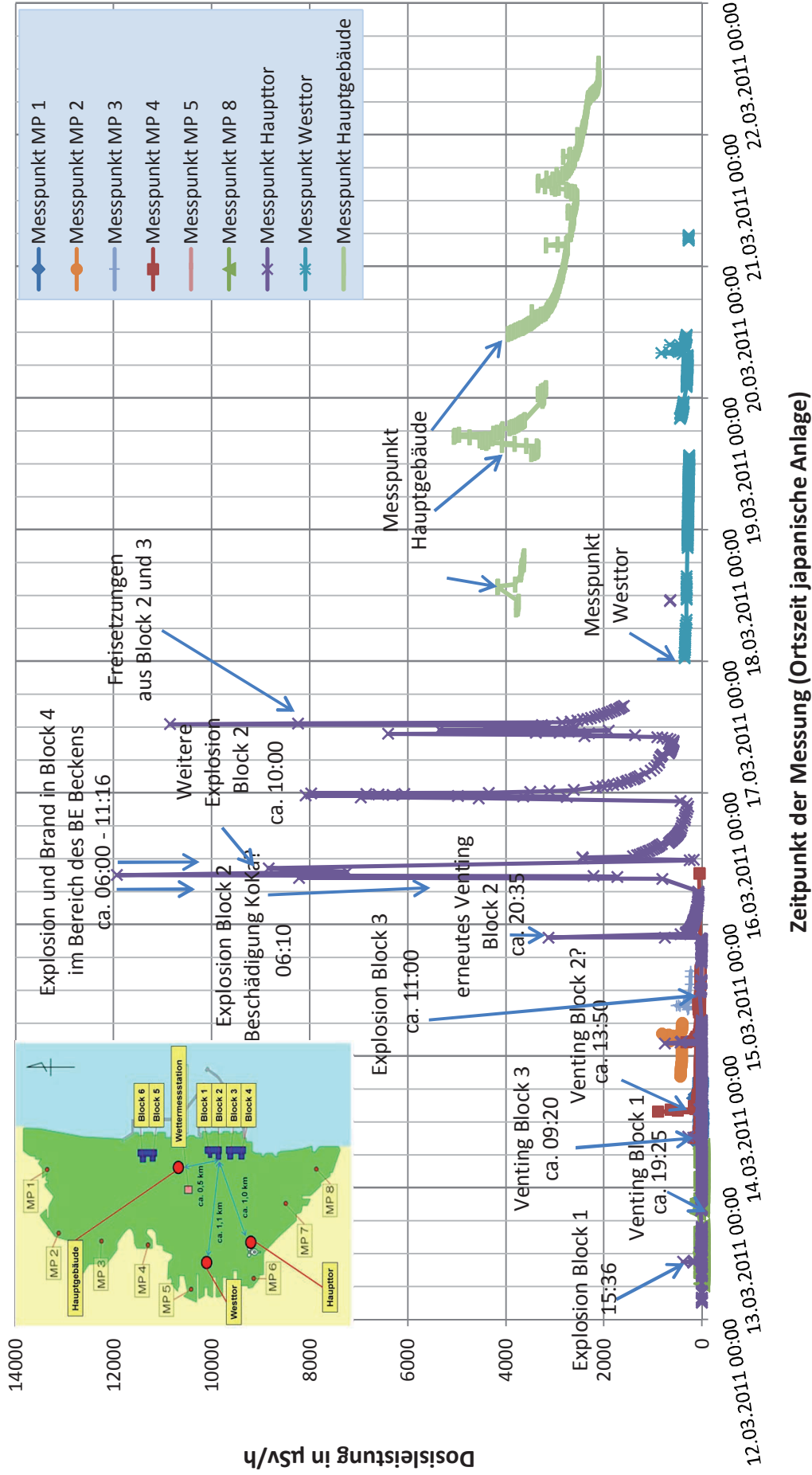
Quelle: Governmental Emergency Headquarters: News release (-3/21 19:00); Pressekonferenz: Nuclear and Industrial Safety Agency (NISA): News release (-3/21 15:30), Pressekonferenz; Tokyo Electric Power Company, Inc. (TEPCO); Pressemitteilung (-3/21 15:00), Pressekonferenz.	Sicherheitstechnische Bewertung durch JAIF:
	hoch mittel niedrig

Tabelle des JAIF, Jap. Atomic Industrial Forum, Inc \* Übersetzt durch Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit mbH, Köln.

Anlage 5: Übersicht über den Zustand der Reaktoren von Fukushima Daiichi. Stand: 21.03.2011 aus [http://www.grs.de/sites/default/files/Status%20KW%20Fukushima%20Daiichi%20Uhr%20am%2021-03-2011\\_1400.pdf](http://www.grs.de/sites/default/files/Status%20KW%20Fukushima%20Daiichi%20Uhr%20am%2021-03-2011_1400.pdf)



# Gemessene Dosisleistungen an ausgewählten Messpunkten Fukushima Daiichi - Daten des Betreibers TEPCO



Anlage 6: Messungen des Kraftwerksbetreibers zur Dosisleistung (Dosis pro Zeit), die an unterschiedlichen Orten des Kraftwerksgeländes gemessen wurde.  
Aus [http://www.grs.de/sites/default/files/images/Radiation-Data\\_Daiichi\\_20110321-0800.pdf](http://www.grs.de/sites/default/files/images/Radiation-Data_Daiichi_20110321-0800.pdf)