

## dossier.

# Fukushima – Analyse und Lehren

---

FEBRUAR 2012 (Update)

### Impressum

Nuklearforum Schweiz  
Geschäftsstelle  
Postfach 1021, 3000 Bern 14  
www.nuklearforum.ch

---

### Die wichtigsten Ergebnisse in Kürze

- Das bisher stärkste Erdbeben in der Geschichte Japans löste eine Reihe grosser Tsunamis aus, die über 20 000 Menschen das Leben kosteten.
- Bei allen betroffenen Kernkraftwerken wurden unmittelbar nach dem Erdbeben die Schutzziele «Abschalten», «Kühlen mit Notstromdieseln» und «Einschluss der radioaktiven Stoffe im Reaktorgebäude» erfüllt.
- Während 11 von 15 Kernkraftwerksblöcken auch die nachfolgenden Tsunamis ohne Unfall überstanden, eskalierte in den Blöcken 1 bis 4 von Fukushima-Daiichi die Lage durch den totalen Ausfall der Notstromversorgung. Die Reaktoren konnten nicht mehr ausreichend gekühlt werden und der Kernbrennstoff begann zu schmelzen.
- In der Folge gelang es den Operateuren nicht, den Unfall auf die Anlage zu beschränken. Es kam in drei Reaktorgebäuden zu Wasserstoffgas-Explosionen, die in grossem Mass zum Austritt von radioaktiven Stoffen beitrugen. Die Bevölkerung in der Umgebung war zuvor evakuiert worden.
- Bis heute wurden bei den Menschen in der betroffenen Region und beim Kraftwerkspersonal keine Anzeichen für gesundheitliche Beeinträchtigungen festgestellt.
- In ihrer vorläufigen Gesamtwertung kommt die japanische Regierung zum Schluss, dass die nukleare Sicherheitskultur ungenügend war.
- Die Anlagen in Fukushima-Daiichi sind seit ihrem Bau nie grundlegend sicherheitstechnisch nachgerüstet worden. Die Gefahr durch Tsunamis wurde entgegen besseren Wissens massiv unterschätzt und die Sicherheitssysteme waren nicht ausreichend gegen eine Überflutung geschützt.
- Das weltweit für die nukleare Sicherheit zentrale Prinzip der «Verteidigung in die Tiefe» wurde in Fukushima-Daiichi nicht eingehalten. So war es möglich, dass eine einzige Ursache – die Tsunamis – auf einen Schlag alle Sicherheits- und Notfallvorkehrungen wirkungslos machte.
- Die erneute Untersuchung der Schweizer Kernkraftwerke belegt, dass in unseren Anlagen alles das vorhanden ist, was in Japan zur Beherrschung des Unfalls fehlte – weil in der Schweiz die dafür nötigen Systeme von Anfang an eingebaut wurden oder vor Jahren nachgerüstet worden sind.

**Nukleare Sicherheit ist eine Daueraufgabe. Sie muss immer wieder neu überprüft werden, so auch nach der Naturkatastrophe von Mitte März 2011 in Japan. Am 7. Juni 2011 hat die japanische Regierung einen ersten Bericht zum schweren Unfall im Kernkraftwerk Fukushima-Daiichi veröffentlicht.**

**Seither sind weitere Berichte publiziert worden, die ein immer deutlicheres Bild der Ereignisse zeichnen. Sie beschreiben den Unfallablauf, identifizieren die Mängel bei den Schutzvorkehrungen und belegen die fehlende Unabhängigkeit der nuklearen Aufsicht. Die japanische Regierung hat daraus erste Lehren gezogen.**

**Dieses Dossier fasst die bisher vorliegenden Berichte zusammen und setzt sie in Relation zur Sicherheit der Schweizer Kernkraftwerke. Daraus geht hervor, dass die Schweizer Anlagen dank konsequenter Vorsorge um ein entscheidendes Mass besser geschützt sind. Sie können ein ähnliches Extremereignis in der Schweiz ohne Schaden für die Bevölkerung und die Umwelt überstehen.**

## Die Naturkatastrophe und ihre unmittelbaren Folgen

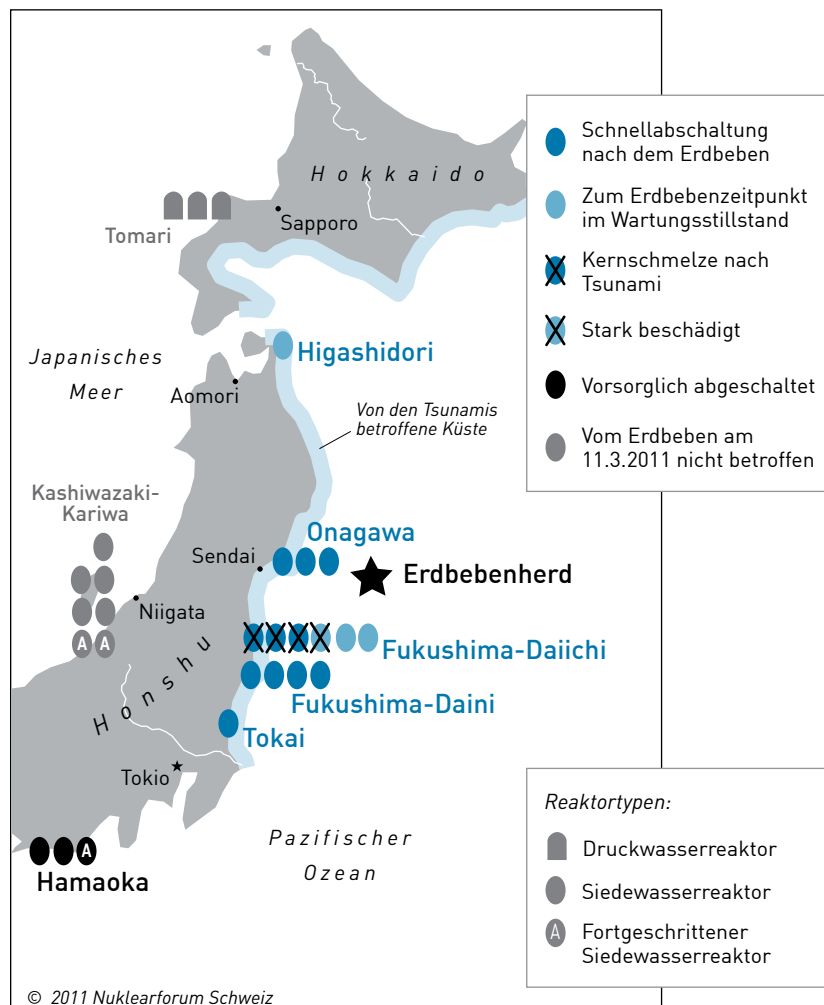
### Erdbeben

Am 11. März 2011 um 14.46 Uhr Ortszeit ereignete sich in Japan das bisher stärkste Erdbeben in der Geschichte des Landes. Der auslösende Erdbebenherd mit einer Magnitude von 9,0 lag im Pazifischen Ozean rund 130 Kilometer vor der Nordostküste der Hauptinsel Honshu. Durch das Erdbeben und durch Hunderte von teils starken Nachbeben verschob sich der Ozeanboden um bis zu 25 Meter nach Osten. Das benachbarte Küstengebiet Japans senkte sich um bis zu 1,2 Meter.

Die Plattenverschiebung löste eine Serie von sieben Tsunamis aus, die auf die Nordostküste Japans aufprallten und rund 560 Quadratkilometer Land überschwemmten. Durch die Naturkatastrophe kamen in den verwüsteten Küstengebieten über 20 000 Menschen ums Leben. 792 000 Gebäude wurden beschädigt oder zerstört.

### Schnellabschaltungen

An den von der Naturkatastrophe betroffenen Küsten stehen an fünf Standorten insgesamt 15 Kernkraftwerksblöcke (siehe Karte unten und Tabelle auf Seite 5). Zum Zeitpunkt des Erdbebens standen elf dieser Anlagen in Betrieb und vier waren für Wartungsarbeiten abgestellt. Die Erschütterungen lösten bei allen in Betrieb stehenden Anlagen die automatische Schnellabschaltung aus. Dabei werden die Steuerstäbe innert Sekunden in den Reaktor eingefahren und die Spaltung des Kernbrennstoffs Uran sofort unterbrochen. Die von den Erdstößen ausgelösten Schnellabschaltungen funktionierten in allen Kernanlagen wie für diesen Fall vorgesehen.



### Wärmeabgabe nach der Abschaltung

Nach einer Schnellabschaltung erzeugt ein Reaktor weiterhin eine grosse Wärmemenge. Sie entsteht durch spontane Kernumwandlungen der im Reaktor vorhandenen Spaltprodukte des Urans. Unmittelbar nach der Abschaltung sinkt die Reaktortleistung auf etwa 6 Prozent des Betriebswerts. Nach einer Stunde liegt die Wärmeabgabe noch bei 1,5 Prozent, nach einem Tag unter 0,7 Prozent. Diese grosse Wärmeleistung muss auch nach der Abschaltung des Reaktors abgeführt werden. Dies geschah in den Kernanlagen von Fukushima-Daiichi normalerweise durch das Kühlen des Kernbrennstoffs über mehrere Zwischenkreisläufe durch Meerwasser. Dazu muss Strom für die Pumpen und weitere Aggregate vorhanden sein sowie der Zugang zu Kühlwasser aus dem Meer.

*Bei allen betroffenen Kernkraftwerken wurden unmittelbar nach dem Erdbeben die Schutzziele «Abschalten», «Kühlen mit Notstromdieseln» und «Einschluss der radioaktiven Stoffe im Reaktorgebäude» erfüllt.*

### Erdbebenschäden

Durch das Erdbeben fiel das Stromnetz im Nordosten Japans grösstenteils aus. Bei den Anlagen Higashidori, Fukushima-Daiichi und Tokai wurden alle externen Hochspannungsleitungen unterbrochen. Bei den Anlagen Onagawa und Fukushima-Daini blieb je eine Leitung in Betrieb. In allen vom Stromausfall betroffenen Blöcken – Higashidori, Onagawa Block 1, Fukushima-Daiichi Blöcke 1 bis 6 und Tokai – starteten die für diese Situation vorgesehenen Notstrom-Dieselaggregate und versorgten die Anlagen mit Strom. Zwei Feuer in den Anlagen Onagawa und Fukushima-Daini wurden rasch gelöscht.

An einzelnen Stellen in Onagawa, Fukushima-Daiichi und Tokai wurden erdbebenbedingte Beschleunigungen gemessen, welche die Auslegungswerte<sup>1</sup> übertrafen. In Fukushima-Daiichi wurden einzelne Beschleunigungswerte gemessen, welche die Auslegung um bis zu 25 Prozent übertrafen. In Onagawa, wo die Auslegungswerte höher liegen, betrug die Überschreitung rund 10 Prozent.

### Sicherheitsreserven

Aufgrund der zusätzlich zu den Auslegungswerten eingerechneten hohen Sicherheitsreserven überstehen Kernkraftwerke auch sehr schwere, auslegungsüberschreitende Erdbeben. Ob in den betroffenen Anlagen, insbesondere in Fukushima-Daiichi, das Erdbeben einzelne sicherheitsrelevante Komponenten dennoch beschädigt hat, ist noch nicht im Detail geklärt. Nach dem heutigen Stand des Wissens hat das Erdbeben in keiner Anlage zu einer sicherheitsbedrohenden Situation geführt.

In Fukushima-Daini wurde ein Mitarbeiter durch das Erdbeben in einem Kran eingeklemmt und getötet. Durch die Tsunamis starben in Fukushima-Daiichi zwei weitere Mitarbeiter. Im April 2011 starb ein Mitarbeiter an Herzversagen.

### Tsunami

30 bis 40 Minuten nach dem Hauptstoss des Erdbebens traf der erste von mehreren Tsunamis auf die Küste. Die Flutwellen hatten höchst unterschiedliche Auswirkungen auf die Nuklearanlagen:

#### **Higashidori (Betreiberin: Tohoku Electric Power Co.):**

Die Anlage war zum Zeitpunkt des Bebens im Wartungsstillstand. Weder Erdbeben noch Tsunami hatten signifikante Auswirkungen auf die Sicherheit. Bis zur Wiederherstellung des externen Netzes versorgten Notstromdiesel die Anlage mit Strom.

<sup>1</sup>Auslegung: technischer Wert, der aus der Sicherheitsanalyse so abgeleitet wird, dass Störfälle beherrscht werden können. Ein Auslegungswert beinhaltet zudem weitere Sicherheitsreserven.

### **Onagawa (Betreiberin: Tohoku Electric Power Co.):**

Diese Anlage liegt am nächsten zum Epizentrum des Hauptbebens. Block 1 hatte nach dem Beben wegen eines Kurzschlusses bei den Transformatoren keinen externen Strom mehr und wurde von den Notstromdieseln versorgt.

In Onagawa wurde mit Tsunami-Überschwemmungshöhen von 13,6 Metern über dem Meeresspiegel gerechnet. Die Anlage befindet sich auf 14,8 Metern Höhe. Durch das Erdbeben senkte sich die Anlage um rund einen Meter auf 13,8 Meter. Der Tsunami erreichte geschätzte 13 Meter. Das Wasser drang dennoch über die unterirdischen Leitungskanäle in die Anlage ein und beschädigte einzelne sicherheitsrelevante Systeme, doch blieben genügend weitere solcher Systeme unbeschädigt, um die Kühlfunktionen in allen Blöcken sicherzustellen.

#### <sup>2</sup> «Cold Shutdown»

Die japanische nukleare Aufsichtsbehörde (Nisa) definiert «Kaltabschaltung» für die von Erdbeben und Tsunami betroffenen Reaktoren folgendermaßen:

- Die Temperaturen im Reaktor-druckbehälter liegen stabil unter 100° Celsius.
- Kettenreaktionen können keine mehr auftreten.
- Die Strahlendosis am Anlagenzaun liegt tiefer als 1 Millisievert pro Jahr.
- Die stabile Kühlung des Kernbrennstoffs bzw. der Schmelzefragmente ist sichergestellt und gegen erneute Störungen geschützt.

Am 12. März 2011 um 1.17 Uhr hatten alle Blöcke den «Cold Shutdown»<sup>2</sup> erreicht, d.h. im Reaktordruckgefäß herrschte normaler Atmosphärendruck und die Wassertemperatur lag unter 100 Grad Celsius. Am 7. April 2011 erschütterte ein Nachbeben der Magnitude 7,1 die Anlage, wobei erneut Beschleunigungen gemessen wurden, welche die Auslegung übertrafen, aber keinen weiteren Schaden anrichteten.

Der Kernbrennstoff blieb in allen Reaktorblöcken intakt. Während des Unfallablaufs kam es zu keiner Freisetzung von radioaktiven Stoffen. Die Tohoku Electric Power Co. hat bauliche Massnahmen angekündigt, um das Eindringen von Wasser in die Anlage künftig zu verhindern und die Sicherheitsreserven zu erhöhen.

### **Tokai (Betreiberin: Japan Atomic Power Co.):**

Der Tsunami überschwemmte das Areal bis auf eine Höhe von 5,4 Metern über dem Meeresspiegel. In Tokai war eine maximale Überflutungshöhe von 4,9 Metern angenommen worden; die meisten Gebäude befinden sich 8 Meter über Meer. Der Tsunami überflutete einen der drei Notstromdiesel für die Meerwasserpumpen, da die Abdichtwände gegen Flutwellen zwar im Bau standen, aber noch nicht fertig ausgeführt worden waren. Die beiden funktionsfähig verbliebenen Notstromdiesel versorgten die Anlage bis zur Wiederherstellung des Netzes mit Strom. Der Reaktor erreichte den «Cold Shutdown» am 15. März 2011 um 0.40 Uhr.

Der Kernbrennstoff blieb intakt. Während des Unfallablaufs kam es zu keiner Freisetzung von radioaktiven Stoffen. Die Anlage wird künftig weiter nachgerüstet. Dadurch erhöhen sich die Sicherheitsreserven gegen Hochwasser.

### **Fukushima-Daini (Betreiberin: Tokyo Electric Power Co., Tepco):**

Bei dieser Anlage wurde die maximale Überschwemmungshöhe ursprünglich mit 3,1 bis 3,7 Metern über dem Meeresspiegel angenommen. Auslegungsgrundlage bildete ein Tsunami im Jahr 1960, der Japan nach einem Erdbeben der Magnitude 9,5 im 15000 Kilometer entfernten Chile erreichte – dem weltweit bisher stärksten je gemessenen Erdbeben. Eine Neubeurteilung durch die Japan Society of Civil Engineers (JSCE) kam im Jahr 2002 auf Maximalwerte von 5,1 bis 5,2 Metern bei einem Erdbeben der Magnitude 8,0 vor der japanischen Küste. Die Anlage ist auf einer Plattform 12 Meter über dem Meer errichtet worden.

Die Tsunamis erreichten in Fukushima-Daini eine Überflutungshöhe von 6,5 bis 7 Metern auf der dem Meer zugewandten Seite und beim Umspülen der Anlage bergseitig 14 bis 15 Meter. Dadurch wurden bei allen Blöcken ausser dem Block 3 die Meerwasserpumpen unter Wasser gesetzt und durch elektrische Defekte zerstört. Dies unterbrach die Wärmeabfuhr auf dem normalen Weg. Die Notstromdiesel

wurden in den Blöcken 1 und 2 überschwemmt und fielen aus; jene in den beiden anderen Blöcken blieben funktionsfähig. Zudem blieb eine externe Stromleitung zur Anlage in Betrieb.

Durch den Einsatz der Notkühlsysteme, das Verlegen von zwei Stromkabeln zu den Blöcken 1 und 2 und den Ersatz der beschädigten Pumpenmotoren konnte die Kühlung wieder ausreichend sichergestellt werden. Block 3 erreichte den «Cold Shutdown» am 12. März 2011 um 12.15 Uhr, Block 1 am 14. März 2011 um 17.00 Uhr, Block 2 am 14. März 2011 um 18.00 Uhr und Block 4 am 15. März 2011 um 7.15 Uhr. Der Kernbrennstoff blieb in allen Reaktorblöcken intakt. Während des Unfallablaufs kam es zu keiner Freisetzung von radioaktiven Stoffen. Auch bei dieser Anlage werden Massnahmen in die Wege geleitet, um grössere Sicherheitsreserven gegen Hochwasser zu schaffen.

Merkmale der 15 von der Naturkatastrophe unmittelbar betroffenen Kernkraftwerksblöcke.

	Elektrische Leistung (Megawatt)	Erste Stromabgabe ans Netz	Status Ende März 2011
<b>Fukushima-Daiichi (Fukushima-I), Betreiberin: Tokyo Electric Power Co. (Tepco)</b>			
Block 1	460	1970	Kernschmelze und Brennstoffschaden im Lagerbecken, Reaktorgebäude schwer beschädigt <sup>3</sup>
Block 2	784	1973	Kernschmelze und Brennstoffschaden im Lagerbecken, Containment beschädigt <sup>3</sup>
Block 3	784	1974	Kernschmelze und Brennstoffschaden im Lagerbecken, Reaktorgebäude schwer beschädigt <sup>3</sup>
Block 4	784	1978	Brennstoffschaden im Lagerbecken, Reaktorgebäude schwer beschädigt <sup>3</sup>
Block 5	784	1977	Kaltabschaltung
Block 6	1100	1979	Kaltabschaltung
<b>Tokai, Betreiberin: Japan Atomic Power Co.</b>			
Block 2	1100	1978	Kaltabschaltung
<b>Fukushima-Daini (Fukushima-II), Betreiberin: Tokyo Electric Power Co. (Tepco)</b>			
Block 1	1100	1981	Kaltabschaltung
Block 2	1100	1983	Kaltabschaltung
Block 3	1100	1984	Kaltabschaltung
Block 4	1100	1986	Kaltabschaltung
<b>Onagawa, Betreiberin: Tohoku Electric Power Co.</b>			
Block 1	524	1983	Kaltabschaltung
Block 2	825	1994	Kaltabschaltung
Block 3	825	2001	Kaltabschaltung
<b>Higashidori, Betreiberin: Tohoku Electric Power Co.</b>			
Block 1	1100	2005	Kaltabschaltung

<sup>3</sup> Kaltabschaltung erreicht Mitte Dezember 2011

## **Fukushima-Daiichi (Betreiberin: Tokyo Electric Power Co., Tepco):**

Diese Anlage wurde durch die Tsunamis am schwersten beschädigt, und es traten in der Folge erhebliche Mengen radioaktiver Stoffe in die Umwelt aus.

Wie bei der jüngeren Schwesteranlage Fukushima-Daini wurde bei der Anlage Fukushima-Daiichi ursprünglich eine maximale Überschwemmungshöhe von 3,1 bis 3,7 Metern über dem Meeresspiegel angenommen. Eine ebenfalls durchgeführte Neu Beurteilung durch die JSCE kam im Jahr 2002 auf einen Maximalwert von 5,4 bis 5,7 Metern bei einem Erdbeben der Magnitude 8,0. Daraufhin hob Tepco im Block 6 (und nur dort) unter anderem Teile der Notstromdiesel an.

Die Blöcke 1 bis 4 stehen auf einer Plattform 10 Meter über dem Meer; die Blöcke 5 und 6 auf 13 Metern. Nach dem Erdbeben sank die Küste bei Fukushima um rund 0,8 Meter ab. Schätzungen zufolge erreichte die höchste Tsunamiwelle am Wellenbrecher im Hafen eine Mächtigkeit von gut 10 Metern und überflutete das Gelände bis auf eine Höhe von 15 bis 16 Metern.

### Verlust der Stromversorgung

Unmittelbar nach dem Erdbeben beruhte die Stromversorgung der sechs Blöcke auf den (funktionierenden) Notstrom-Dieselaggregaten, da alle externen Stromleitungen zum Kraftwerk unterbrochen waren. Die Flutwelle überschwemmte die Meerwasserpumpen der Anlage, die elektrischen Schaltanlagen und alle Notstromdiesel (zwei pro Block) sowie die Räume mit den Batterien. Dabei dürfte das Wasser vor allem über die unter dem Werk liegenden Rohr- und Kabelkanäle eingedrungen sein, die nicht ausreichend abgedichtet waren. Zudem drückten die Wassermassen die Türen des Maschinenhauses ein. Die Strukturen der Hauptgebäude hielten hingegen der Flutwelle stand.

Einzig im Block 6 überstand ein luftgekühltes Notstrom-Dieselaggregat die Flut, weil es auf einem höheren Niveau installiert war und die zugehörigen Stromverteilanlagen intakt blieben. Dieses Aggregat blieb als einziges funktionstüchtig. Zwei gleichartige zusätzliche Dieselaggregate in den Blöcken 2 und 4 fielen aus, da die zugehörigen Stromverteilanlagen überschwemmt wurden. Damit waren alle Blöcke ausser Block 6 von der Wechselstromversorgung abgetrennt. Zur Verfügung stand nur noch Gleichstrom aus Batterien.

In der Folge gelang es, den Block 5 mit Wechselstrom aus dem benachbarten Block 6 zu versorgen und eine neue Meerwasserpumpe zu installieren. Diese beiden Blöcke konnten daher ausreichend gekühlt und am 20. März 2011 in einen sicheren Zustand überführt werden («Cold Shutdown»).

---

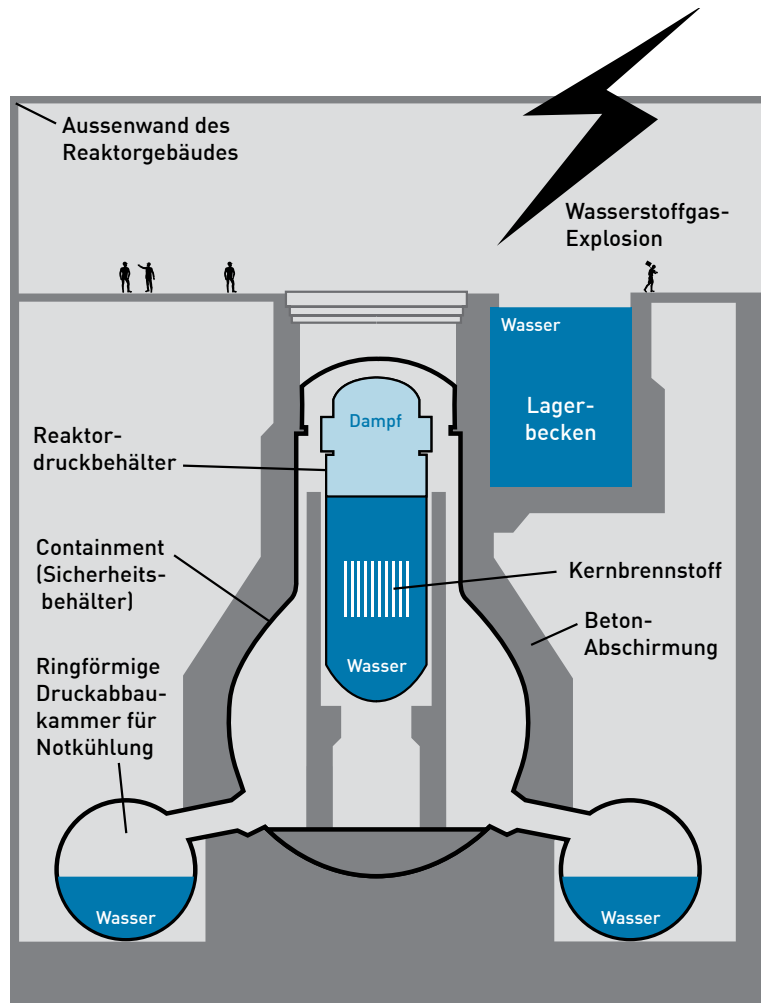
## **Der Unfallablauf in Fukushima-Daiichi**

### Kernschmelze

Die Blöcke 1 bis 3 in Fukushima-Daiichi konnten wegen des Ausfalls der Meerwasserpumpen und der Notstromdiesel nicht mehr ausreichend gekühlt werden. Alle Versuche, die Stromversorgung notdürftig wieder herzustellen, scheiterten.

Im Block 1 zerstörte die Überflutung auch die Batterien. Daher fielen wichtige Störfallinstrumentierungen, motorbetriebene Armaturen und die Beleuchtung des Kommandoraums frühzeitig aus, so dass die Betriebsmannschaft bald die Kontrolle über das Geschehen verlor. Nach dem späteren Erschöpfen der Gleichstrombatterien in den Blöcken 2 und 3 fielen zusätzlich noch die wechselstromunabhängigen, dampfbetriebenen Hilfs-Notkühlsysteme aus.

Stark vereinfachte  
Schnittzeichnung der  
verunfallten Reaktorblöcke  
in Fukushima-Daiichi.  
(Quelle: VGB Power Tech)



Im Block 1 versagte durch einen Operateurfehler – verbunden mit dem frühen Ausfall der Batterien – die wechselstromunabhängige Notkühlung bereits am 11. März 2011 vor Mitternacht. In der Folge begann der Reaktorkern zu schmelzen. Im Block 3 fielen die wechselstromunabhängigen Kühlmöglichkeiten erst am 13. März 2011 kurz vor 3.00 Uhr aus und die Kernschmelze dürfte nach diesem Zeitpunkt eingesetzt haben. Im Block 2 wurde dieser Punkt am 14. März 2011 um etwa 16.30 Uhr erreicht. Die Betreibergesellschaft Tepco vermutet, dass in allen drei Blöcken ein Teil der Kernschmelze auf den Boden des Reaktordruckbehälters gefallen ist.

### Druckentlastung

Durch die ungenügende Kühlung und das fortlaufende Verdampfen des Wassers stieg der Druck in den Reaktorsystemen der Blöcke 1 bis 3. Wegen des Ausfalls der Batterien hatten die Operateure Schwierigkeiten, den sich aufbauenden Druck durch das kontrollierte Öffnen der Sicherheits- und Entlastungsventile zeitgerecht zu reduzieren<sup>4</sup>. Der Druckabbau erfolgte unkontrolliert und unvollständig über automatische Sicherheitsventile zunächst in die Druckabbaukammer (siehe Grafik) und danach in das Containment. Zudem entstanden durch das Überhitzen des Kernbrennstoffs grosse Mengen an Wasserstoffgas.

### Wasserstoff-Explosionen

Am ersten Tag nach dem Erdbeben, am 12. März 2011 um 15.36 Uhr, zerstörte eine Wasserstoffexplosion den oberen Teil des Reaktorgebäudes von Block 1, nachdem

<sup>4</sup>Damit notfallmässig Wasser mit Feuerweherschläuchen in den Reaktor gepumpt werden kann, muss der Druck im Inneren des Reaktorsystems tief sein.

der Wasserstoff aus dem Containment ins Reaktorgebäude gelangt war, statt durch den Hochkamin zu entweichen.

Die Ende der 1990er-Jahre nachgerüstete ungefilterte Containment-Druckentlastungsanlage, die bei einem solchen schweren Störfall das Versagen des inneren Stahl-Containments durch Überdruck vermeiden sollte, war offensichtlich in Fukushima-Daiichi nicht störfalltauglich. Da in japanischen Siedewasserreaktoren das Druckentlastungssystem mit Teilen der Betriebsabluft verbunden ist, könnten wegen des vollständigen Stromausfalls wichtige Abschlussventile zwischen den beiden Systemen offen gewesen sein. Zudem könnte wegen der grossen Wärme der obere Abschluss des Containments undicht geworden sein. Dadurch gelangten beträchtliche Wasserstoffgasmengen in das Reaktorgebäude und lösten dort die Explosionen aus. Weitere Abklärungen dazu sind im Gange.

Am 14. März 2011 um 11.01 Uhr passierte das gleiche im Block 3. Durch die Explosionen wurden insgesamt 16 Personen verletzt. Die zusätzlichen Schäden wie auch die erhöhte Strahlung führten zu einem schweren Rückschlag der Sicherungsarbeiten. Die bereits provisorisch eingerichtete Stromversorgung und Notkühlung wurde zerstört und musste neu aufgebaut werden. Dabei ging wertvolle Zeit zur Eindämmung des Unfalls verloren.

Am 15. März 2011 um 6.00 Uhr explodierte wahrscheinlich Wasserstoffgas in der Druckabbaukammer von Block 2, wobei vermutlich das Containment beschädigt wurde. Das Reaktorgebäude blieb intakt. Später wurde eine Öffnung in die Gebäudehülle gebrochen, um allfällig weiter gebildeten Wasserstoff gezielt aus der Anlage zu leiten.

Ebenfalls am 15. März 2011 um 6.00 Uhr zerstörte eine Explosion das Reaktorgebäude von Block 4. Dieser Block befand sich im Wartungsstillstand; im November 2010 war dessen Kernbrennstoff vollständig aus dem Reaktordruckgefäss entnommen und ins danebenliegende Lagerbecken überführt worden. Tepco vermutet, dass Wasserstoffgas aus dem Block 3 über die Leitungen zum gemeinsamen Hochkamin in den Block 4 gelangt war. Damit lag das Abklingbecken des Blocks 4 mit dem aus dem Reaktorgefäss ausgeladenen Kernbrennstoff unter freiem Himmel.

Durch den Totalausfall der Stromversorgung wurde auch die Kühlung der Lagerbecken der Blöcke 1 bis 4 mit ausgedientem Kernbrennstoff für längere Zeit unterbrochen und die Temperatur des Wassers in den Lagerbecken stieg allmählich an. Als Folge sank der Wasserspiegel in den Becken ab.

#### Kühlung mit Feuerwehrmitteln

Als Notmassnahme wurde mit Feuerwehrmitteln und Betonpumpen zum Teil Meerwasser über Schläuche in die Reaktorsysteme und die Lagerbecken gepumpt. Analysen und Inspektionen haben gezeigt, dass in allen Lagerbecken der Kernbrennstoff ständig mit Wasser bedeckt geblieben ist. Videoaufnahmen belegen, dass in den Lagerbecken keine Brennelemente geschmolzen sind. Signifikante Schäden sind dort bisher nicht entdeckt worden. Möglicherweise haben herabfallende Trümmer zu Beschädigungen an oben liegenden Brennelementen geführt.

*Durch diesen Ablauf der Ereignisse in den Blöcken 1 bis 4 von Fukushima-Daiichi wurden alle technischen Barrieren gegen den Austritt von radioaktiven Stoffen durchbrochen.*



---

## Die Folgen des Austritts radioaktiver Stoffe

### Evakuierung

Vom 12. bis 25. März 2011 kam es wiederholt zu grösseren Freisetzungen von radioaktiven Stoffen aus der Anlage Fukushima-Daiichi, mit einer markanten Spitze am 15./16. März 2011 als Folge der Wasserstoffgas-Explosionen. Seither sind die Abgaben an die Umgebung auf geringe Werte zurückgegangen. Noch am Abend des 11. März 2011 rief die japanische nukleare Atomaufsichtsbehörde (Nisa) den nuklearen Notfall aus. Deshalb begann rechtzeitig am Abend des 11. März 2011 die Evakuierung der Bevölkerung aus einem 3-Kilometer-Radius um das Werk. Am 12. März 2011 morgens wurde diese Zone auf 10 Kilometer erweitert, und am Abend des gleichen Tages auf 20 Kilometer.

Am 15. März 2011 wurden die Bewohner der Zone zwischen 20 und 30 Kilometer angewiesen, ihre Häuser möglichst nicht zu verlassen und Fenster und Türen zu schliessen. Am 22. April 2011 wurde diese Anweisung wieder aufgehoben und – aufgrund von Messungen in den einzelnen Gebieten (siehe Karte Seite 10) – im Nordwesten eine weitere Evakuierungszone ausserhalb der 20-Kilometer-Sperrzone festgelegt (jene Gebiete, in denen die mutmassliche Folgedosis im ersten Jahr nach dem Unfall 20 Millisievert übersteigt).

In der 20-Kilometer-Zone lebten rund 78 200 Menschen, in der Zone zwischen 20 und 30 Kilometern waren etwa 62 400 Menschen betroffen.

### Freisetzung radioaktiver Stoffe

Seit dem 16. März 2011 führt das zuständige Ministerium für Bildung, Kultur, Sport, Wissenschaft und Technologie (Mext) regelmässig umfassende radiologische Messungen in Luft, Boden und Wasser durch. Die verschiedenen Messmethoden ergaben gut übereinstimmende Daten. Die Nisa hat die Gesamtmenge an Freisetzungen von radioaktiven Stoffen aus den vier verunfallten Blöcken aufgrund verschiedener Rechenmodelle abgeschätzt. Demnach wurden die radiologischen Kriterien für die Zuordnung des Unfalls in die höchste Stufe 7 der Internationalen Störfallbewertungsskala (Ines) erreicht. Laut Nisa und dem Eidgenössischen Nuklearsicherheitsinspektorat (Ensi) waren die Freisetzungen jedoch etwa zehnmals geringer als diejenigen des Unfalls von 1986 in Tschernobyl.

### Cäsium und Jod

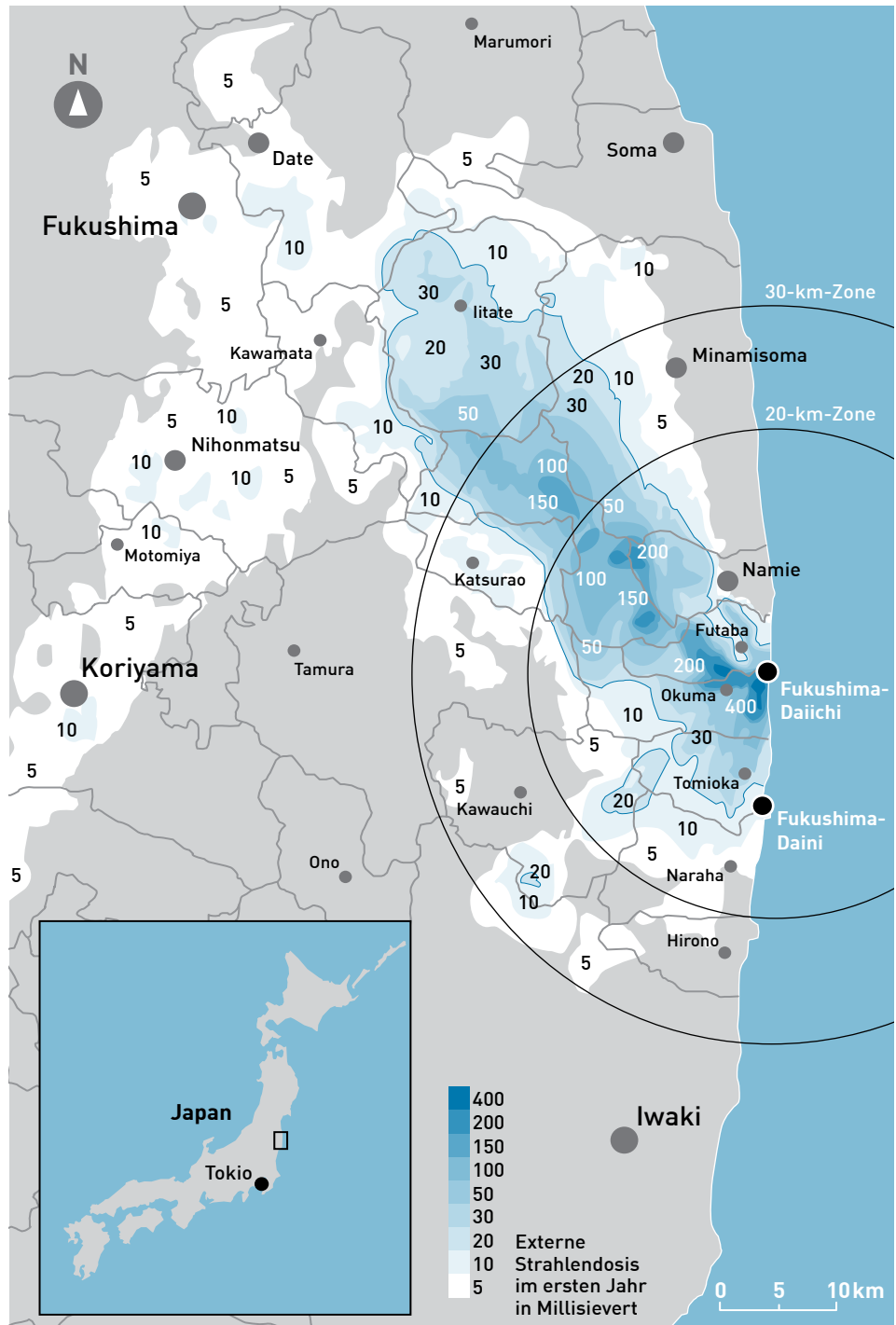
Die beiden wichtigsten aus Fukushima-Daiichi entwichenen radioaktiven Stoffe sind Jod-131 und Cäsium-137. Jod-131 hat eine Halbwertszeit von acht Tagen und zerfällt daher rasch in nichtradioaktive Atome. Gegen Ende April 2011 normalisierte sich daher in den betroffenen Gebieten die Strahlenbelastung durch Jod-131 auf Werte, wie sie beispielsweise für das Schweizer Mittelland typisch sind.

Jod reichert sich vor allem in der Schilddrüse an, wobei Kinder besonders empfindlich sind. Mit der Einnahme von nichtradioaktivem Jod kann die Schilddrüse gesättigt werden, so dass sich das radioaktive Jod dort nicht mehr ansammelt. Die einmalige Einnahme von nichtradioaktivem Jod wurde bestimmten Personengruppen empfohlen; die Behörden warnten jedoch die Bevölkerung vor unkontrollierter Verwendung dieser Präparate. Da die Evakuierung vor der Freisetzung erfolgte, war diese Massnahme bei den meisten Betroffenen nicht nötig. Schulen und Kindergärten werden bis heute besonders intensiv überwacht.

Weiter fand das Mext sehr geringe Mengen von radioaktivem Strontium-90 (Halbwertszeit knapp 29 Jahre), das sich in den Knochen einlagern kann. In unmittelbarer Umgebung des Kernkraftwerks fand die Tepco Spuren von Plutonium, das aufgrund des Isotopenverhältnisses aus einem der Reaktoren stammen könnte. Die Konzentrationen sind allerdings sehr tief und liegen in der Grössenordnung, wie sie in der Schweiz als Folge der Kernwaffentests in den 1950er- und 1960er-Jahren nachge-

Geschätzte externe Strahlendosis für einen Menschen, der sich im ersten Jahr nach dem Unfall (bis zum 11. März 2012) dauernd im Freien aufhält.

(Quelle: Mext, Ministerium für Bildung, Kultur, Sport, Wissenschaft und Technologie, 11. Oktober 2011)



Zum Vergleich:

Durchschnittliche Strahlendosis in der Schweiz (inkl. natürliches Radongas und Medizin): 4,0 bis 5,6 Millisievert pro Jahr (je nach Gewichtung des Radons)

Ganzkörper-Computertomographie: bis 20 Millisievert pro Aufnahme

Gesetzlich zulässige Strahlendosis für beruflich exponiertes Personal in Kraftwerken oder in der Medizin (Japan und Schweiz): 20 Millisievert pro Jahr

Maximale örtliche natürliche Strahlendosis in Teilen von Südindien aufgrund der Geologie: 55 Millisievert pro Jahr

Maximale örtliche natürliche Strahlendosis im Osten Brasiliens aufgrund der Geologie: 175 Millisievert pro Jahr

wiesen werden können. Im Vergleich zum Cäsium sind diese Stofffreisetzungen ohne radiologische Bedeutung.

### Nahrungskette

Während das radioaktive Jod rasch zerfällt, hat das Cäsium-137 eine Halbwertszeit von rund 30 Jahren. Seit Ende April 2011 dominiert das Cäsium die Strahlenbelastung in der kontaminierten Zone. Es lagert sich im Boden ab und kann über die Pflanzen und weidende Nutztiere in die Nahrungskette der Menschen gelangen. Die japanischen Behörden verfügen daher fallweise aufgrund von Messungen Einschränkungen für den Verzehr und Verkauf von belasteten Lebensmitteln. Bei der Kontrolle von 23 000 Reisanbaubetrieben wurden auf 38 Bauernhöfen Cäsiumwerte über dem zulässigen Grenzwert entdeckt. Trinkwasser ist überall weit unter dem zulässigen Grenzwert. Aufgrund der getroffenen Massnahmen ist die zusätzliche Strahlendosis durch den Verzehr von Lebensmitteln für die Bevölkerung von untergeordneter Bedeutung.

*Bis Ende Mai 2011 wurden bei 195 345 untersuchten Menschen keine Anzeichen für gesundheitliche Beeinträchtigungen festgestellt. Bei keinem der 1080 untersuchten Kinder wurde in der Schilddrüse eine erhöhte Jod-Strahlendosis gefunden. Ebenso wurde bis dahin bei Menschen keine Aufnahme von radioaktivem Strontium festgestellt.*

### Kontaminierte Zone

Aufgrund der Windverhältnisse und der Regenfälle in der frühen Phase des Unfalls wurde eine Zone von etwa 50 Kilometern Länge und 20 Kilometern Breite im Nordwesten der Kernanlage stärker kontaminiert. Die Karte auf Seite 10 zeigt die Verteilung der im ersten Jahr nach dem Unfall zu erwartenden externen Strahlendosen aufgrund der bisher durchgeführten umfassenden Messungen.

Innerhalb einer Zone von etwa 40x15 Kilometern wurde vom Mexi eine Strahlendosis über 20 Millisievert pro Jahr ermittelt (entspricht dem in der Schweiz zulässigen Strahlungsgrenzwert für beruflich exponiertes Personal). Der grösste Teil der vom Unfall betroffenen Landstriche liegt dagegen weit unter diesem Wert. Diese weniger kontaminierte Region von etwa 2600 Quadratkilometern Fläche (entspricht einem Quadrat von 50 Kilometern Seitenlänge) zeigt Strahlendosen zwischen 5 und 20 Millisievert pro Jahr für Personen, die sich während des gesamten Jahres in der freien Natur aufhalten würden.

Inzwischen wurden ausserhalb der 20-Kilometer-Sperrzone grosse Gebiete zur Rückkehr der Bevölkerung freigegeben.

Zurzeit kann der Umfang des Gebiets, in dem die Landwirtschaft allenfalls über längere Zeit eingeschränkt werden muss, noch nicht definiert werden. Wie stark das radioaktive Cäsium von Pflanzen aufgenommen wird, hängt vom Bodentyp ab. Bodenanalysen sind im Gang. Die Kontamination schwankt lokal sehr stark. Punktuell gibt es «Hot spots», insbesondere dort, wo sich das abfliessende Regenwasser gesammelt hat.

Die japanische Regierung hat für das Jahr 2012 ein ambitioniertes Dekontaminationsprogramm projektiert, das die sukzessive Säuberung der bewohnten Bereiche sowie bestimmter Naturbereiche vorsieht. Erste Arbeiten zur lokalen Dekontamination sind eingeleitet.

### Kontamination des Ozeans

Als Folge des Unfalls gelangte Anfang April 2011 stark kontaminiertes Wasser aus den Reaktorgebäuden ins Meer. Die Leckagen sind inzwischen verschlossen. Seit Sommer 2011 liegen die Konzentrationen von radioaktiven Stoffen im Meerwasser unter der Nachweisgrenze. Deutlich erhöhte Konzentrationen wurden punktuell auf

dem Meeresboden in der Nähe des Kraftwerks festgestellt. Die Auswirkungen auf Fische und Meeresfrüchte dürften deutlich geringer sein als bei einer direkten Kontamination des Meerwassers. Bis heute werden nur noch wenige Fischereiprodukte gefunden, bei denen der Grenzwert für Cäsium-137 überschritten ist.

#### Strahlenbelastung innerhalb der Anlage

Anders als in der Umgebung von Fukushima-Daiichi ist die Strahlung innerhalb der Reaktor- und Turbinengebäude der Blöcke 1 bis 4 noch immer sehr hoch. Zudem befindet sich in den Schächten und in den tiefer gelegenen Räumen unter der Anlage teilweise stark kontaminiertes Wasser.

Um leichtflüchtige radioaktive Stoffe (Staub etc.) auf dem Anlagengelände zu binden, wurde ein spezielles Bindemittel versprüht. Anfang Mai 2011 installierte die Tepco Filtersysteme für die Abluft aus den Reaktorgebäuden. Dadurch können die Gebäude belüftet werden, ohne dass weitere radioaktive Stoffe in die Umgebung gelangen. Ebenso wird seit dem Sommer 2011 das Kühlwasser der Reaktoren in einem geschlossenen Kreislauf rezykliert und gefiltert. Dabei werden die radioaktiven Stoffe abgeschieden und als betonierte Abfälle zwischengelagert. Dies dient der sukzessiven Dekontamination der Anlage und dem Schutz der Umgebung.

Zur langfristigen Sicherung der Anlage werden die stark beschädigten Blöcke mit einer Stahlkonstruktion umgeben, die mit einer wasserdichten, verstärkten Kunststoff-Folie bespannt ist. Beim Block 1 sind diese Arbeiten Ende Oktober 2011 erfolgreich abgeschlossen worden. Der Bau der Schutzhüllen der Blöcke 3 und 4 kann nach Angaben der Tepco frühestens im Sommer 2012 beginnen, da vorerst die Trümmer beseitigt werden müssen.

#### Strahlenbelastung der Werksmannschaft

Bis Ende September 2011 sind insgesamt rund 14 800 Personen untersucht worden, die das Werksgelände für Sicherungsarbeiten betreten haben. Von ihnen haben 99 eine akkumulierte Dosis von über 100 Millisievert erhalten. Darunter befinden sich 14 Personen mit Strahlendosen von 200-250 Millisievert und 6 Personen mit einer Dosis über 250 Millisievert. Die maximale bisher bei einem Mitarbeiter festgestellte Individualdosis beträgt etwa 670 Millisievert. Die Dosismessung und -bilanzierung des zum Einsatz kommenden Personals wird von der Behörde laufend kontrolliert.

Der international empfohlene Grenzwert für Arbeiten in Notstandssituationen beträgt 100 Millisievert pro Jahr. Für die Arbeiten zur Verhinderung der Ausweitung des Unfalls erlaubte die japanische Regierung individuelle Dosen bis 250 Millisievert pro Jahr.



Langfristige Sicherung: Ende Oktober 2011 wurde die Schutzhülle des Blocks 1 fertiggestellt. (Foto: Tepco)

*Bisher sind durch die Strahlung in Fukushima-Daiichi keine Menschen gestorben oder akut gesundheitlich geschädigt worden. Dank der rechtzeitigen Evakuierung und dem Strahlenschutz im Werk sind durch Strahlung ausgelöste Gesundheitsschäden wenig wahrscheinlich, weder beim Personal noch in der Bevölkerung.*

Die Erfahrung von Tschernobyl hat jedoch gezeigt, dass bei einer langfristigen Evakuierung psychologisch ausgelöste Krankheitsbilder auftreten können – etwa durch den Verlust der angestammten Wohnsitzes, den Verlust des Arbeitsplatzes oder als Folge desolater Familienverhältnisse.

---

## Analyse des Unfallablaufs

### Unfallursache

Die Grundursache für die Kernschmelzen, die möglichen Schäden am Kernbrennstoff in den Lagerbecken und den Austritt erheblicher Mengen radioaktiver Stoffe in Fukushima-Daiichi liegt im anhaltenden Verlust der gesamten Stromversorgung. Der Black-out trat ein, nachdem 11 von 12 Notstrom-Dieselaggregaten samt den elektrischen Bauteilen der Meerwasserpumpen vom Tsunami überschwemmt worden waren und gleichzeitig ausfielen. Die stromunabhängigen Notkühlsysteme konnten das Verdampfen des Wassers aus den Reaktordruckbehältern nicht lange verhindern. Der Wasserstand sank ab, der nicht mehr mit Wasser bedeckte Kernbrennstoff überhitzte und begann zu schmelzen.

Die japanische Regierung kommt zu folgendem Schluss:

*In allen von der Naturkatastrophe betroffenen Kernanlagen haben die Betriebs- und Sicherheitssysteme das Erdbeben überstanden und wie für diesen Fall vorgesehen funktioniert. Die Gefahr von Tsunamis wurde hingegen massiv unterschätzt und die Sicherheitssysteme waren nicht gegen Überschwemmung geschützt.*

### Tsunami-Statistik

Tsunamis von über 10 Metern Wellenhöhe sind in Japan keine Seltenheit. Aus den historischen Aufzeichnungen geht hervor, dass in den vergangenen 500 Jahren mindestens 14 solche Grossüberflutungen stattgefunden haben, oder im Schnitt rund alle 30 Jahre einmal. Die beiden jüngsten grossen Tsunamis ereigneten sich 1993 im Nordosten Japans (ca. 31 Meter Höhe) und 1994 auf den benachbarten Kurilen-Inseln (11 Meter Höhe)<sup>5</sup>.

In ihrem Bericht vom 7. Juni 2011 hält die japanische Regierung fest, dass die Vorsorge gegen Tsunamis ungenügend war. In den vergangenen 20 Jahren hatten Wissenschaftler und Sicherheitsexperten die Betreiberin Tepco wiederholt gewarnt, dass durchaus höhere Tsunamis möglich seien als die ursprünglich bei Auslegung und Bau der Anlagen in Fukushima angenommenen. Dies hatte jedoch keine wesentlichen Verbesserungen der Widerstandsfähigkeit der Anlagen zur Folge.

*Die Anlagen in Fukushima sind seit ihrem Bau nie grundlegend sicherheitstechnisch nachgerüstet worden. Bislang ist noch unklar, weshalb die offensichtliche Gefahr eines grossen Tsunamis an der Küste von Fukushima während der vergangenen Jahrzehnte nicht in die Sicherheitserwägungen von Betreiberin und Aufsichtsbehörde einfließen.*

---

<sup>5</sup> [www.tsunami-alarm-system.com](http://www.tsunami-alarm-system.com)

### Behördenaufsicht

Im Licht der Kernkraftwerksunfälle in Three-Mile-Island (USA) und Tschernobyl (in der damaligen Sowjetunion) wurden in Japan 1992 die Sicherheits-Richtlinien für den Fall von schweren Unfällen überarbeitet. Diese Richtlinien wurden von den Betreibern entwickelt und seither nicht mehr verändert. Ihre Umsetzung ist in Japan freiwillig und nicht gesetzlich vorgeschrieben. Dies steht in scharfem Gegensatz zur Praxis in anderen Ländern wie der Schweiz, Deutschland, Frankreich oder den USA, wo die Behörden Richtlinien erstellen und deren Befolgung verbindlich vorschreiben und überwachen.

Vor der vom Unfall ausgelösten Reorganisation war in Japan die Aufsichtsbehörde Nisa direkt in das Wirtschafts- und Handelsministerium (Meti) integriert und unterstand dem Wirtschaftsminister. Der Premierminister seinerseits wurde von der Nuklearen Sicherheitskommission (NSC) beraten, die ihre Berichte dem Wirtschaftsminister vorlegte. Der Informationsfluss zwischen NSC und Nisa verlief nicht direkt, sondern über den Wirtschaftsminister. Die von der IAEO geforderte Unabhängigkeit der Aufsichtsbehörde von den kernenergiefördernden Regierungsinstitutionen war nicht erfüllt.

---

## Lehren der japanischen Regierung

Aufgrund ihrer ersten Analyse zieht die japanische Regierung eine Reihe von Lehren:

### «Verteidigung in die Tiefe»

- Das allerwichtigste Prinzip der Sicherheit bei nuklearen Anlagen ist die sogenannte «Verteidigung in die Tiefe». Demnach muss ein Kernkraftwerk so ausgelegt, gebaut, ausgerüstet und organisiert sein, dass vielfache, voneinander unabhängige Sicherheitssysteme und Notfallvorkehrungen derart hintereinander gestaffelt sind, dass das Versagen eines Systems von den anderen aufgefangen wird und eine Betriebsstörung nicht zum Unfall, geschweige denn zur Katastrophe eskaliert.

*Dieses zentrale Prinzip wurde in den Kernanlagen von Fukushima-Daiichi nicht eingehalten. So war es möglich, dass eine einzige Ursache – die Tsunamis – auf einen Schlag alle Sicherheits- und Notfallvorkehrungen wirkungslos machte.*

In Fukushima-Daiichi handelt es sich um den klassischen Fall eines «Common cause»-Fehlers (Fehler aus einer gemeinsamen Ursache). Dieser Fehlertypus ist seit über 30 Jahren bekannt und wurde im Rahmen von internationalen Programmen intensiv untersucht. Gegenmassnahmen sind seit langem vorhanden und haben in vielen Ländern zur Verbesserung der Anlagen beigetragen.

Die japanische Regierung zieht daraus die Lehre, dass die sicherheitsrelevanten Systeme gegen diesen Fehlertyp (im konkreten Fall das Eindringen von Wasser aufgrund eines Tsunamis) wirksam geschützt werden müssen.

### Diversifikation

- Weder die Notstromversorgung noch die Wärmesenke waren diversifiziert. Notstromdiesel, Batterieräume und Schaltanlagen befanden sich alle auf gleichem Höhenniveau mit gleichem Schutzgrad gegen Überflutung. Nach deren gleichzeitigem Ausfall durch die Tsunamis war ausser im Block 6 keine alternative Stromquelle mehr verfügbar. Als einzige Wärmesenke diente das Meer. Nach dem Ausfall der Meerwasserpumpen gab es keine diversitäre weitere Notkühl-Wärmesenke, wie beispielsweise Grundwasserbrunnen oder Luftkühler, um die Nachzerfallswärme der Reaktoren auf anderem Weg abzuführen.

Die japanische Regierung zieht daraus die Lehre, dass zusätzliche Stromquellen mit unterschiedlicher Technik und an verschiedenen Standorten vorhanden sein müssen. Weiter fordert sie die zusätzliche Einrichtung diversitärer Notkühl-Wärmesenken.

#### Druck- und Wasserstoffabbau

- Nachdem die Kühlsysteme versagt hatten, konnte – vor dem Kernschmelzen – dem Druckaufbau in den Reaktorsystemen nicht wirksam begegnet werden, da die Druckabbausysteme für diesen Fall ungenügend waren. Der drucklose Zustand der Reaktoren wurde nicht rechtzeitig erreicht. Ein alternatives Einspeisen von Wasser mittels Feuerwehrpumpen zur ausreichenden Wasserüberdeckung der Reaktorkerne war deshalb nicht möglich. Andererseits waren nach dem Kernschmelzen auch die Containment-Druckabbausysteme für die Milderung der Unfallfolgen ungenügend. Die Notwendigkeit von gefilterten Druckentlastungssystemen, die den allergrössten Teil der radioaktiven Stoffe hätten zurückhalten können, wurde zwar vom Innenministerium im Jahr 2009 erkannt, doch ergriff die Nisa keine konkreten Schritte zur Behebung dieses Mangels. Zudem gab es in den Reaktorgebäuden keine Systeme zum Abbau von Wasserstoffgas – auch hier waren Vorkehrungen im Sinne einer «Verteidigung in die Tiefe» nicht vorhanden. Diese Mängel sollen künftig in anderen japanischen Kernkraftwerken durch Nachrüstungen behoben werden.

#### Wasserdichtheit

- Die Hochwassergefahr durch Tsunamis wurde massiv unterschätzt. Die japanische Regierung zieht daraus die Lehre, dass die zentralen Sicherheitssysteme auch gegen Überschwemmungen geschützt sein müssen, die wesentlich grösser sind als bei der ursprünglichen Auslegung und beim Bau der Anlagen erwartet. Der Schlüssel dazu liegt darin, die wichtigen Sicherheitssysteme wasserdicht auszulegen. Vor diesem Hintergrund fordert die japanische Regierung, die Wasserdichtigkeit von Gebäuden, Türen, wasserseitig exponierten Kühlpumpen sowie die Dichtheit von unterirdischen Rohr- und Kabelkanälen sicherzustellen.

#### Notfallbereitschaft

- Die Notfallbereitschaft, die ebenfalls ein Element der «Verteidigung in die Tiefe» ist, war ungenügend. Es gab nur unzureichende Notfallmanagement-Pläne, um auch im Fall eines schweren Unfalls die Reaktorsysteme und die Lagerbecken durch alternative Wasserzuführung oder durch Luftkühlung ausreichend zu kühlen – beispielsweise über Feuerweherschläuche oder Wasserleitungen, die von den überschwemmten Meerwasserpumpen unabhängig sind, oder mit Luftkühlern nach dem Prinzip von Kühltürmen. Praktische Schwierigkeiten ergaben sich, da in den Anlagen keine vorgefertigten Notfall-Einspeisemöglichkeiten vorhanden waren. Dadurch ging wertvolle Zeit bei der Eindämmung des Unfalls verloren.

Das Notfallmanagement wird in Japan nicht durch das Gesetz und die Behörden vorgegeben, sondern unterliegt der Freiwilligkeit und dem Verantwortungsbewusstsein des Betreibers. Diese betreibereigenen Notfallrichtlinien waren lückenhaft und seit 1992 nicht mehr revidiert worden. Offiziell genehmigte Anforderungen zur Beherrschung schwerer Störfälle fehlten. So gab es in japanischen Kernkraftwerken auch keine verbindlichen Vorgaben für regelmässige Notfallübungen. Der nicht klar definierte und geübte Entscheidungsweg zwischen Betriebsmannschaft, Tepco, Präfektur und Regierung führte zu erheblichen Verzögerungen bei der Unfallbekämpfung mit massgeblich negativen Konsequenzen.

Insgesamt bemängelt die japanische Regierung eine unzureichende Notfallbereitschaft aller involvierten Stellen, die auf das Fehlen von regelmässigen Notfallübungen zurückzuführen ist. Sie zieht daraus die Lehre, dass das Notfallmanagement auf allen Ebenen gestärkt und professionalisiert werden muss. Die Regierung will jetzt das Notfallmanagement gesetzlich verankern.

### Multiblockanlage

- Die Naturkatastrophe führte zur Notfallsituation in mehreren eng benachbarten Reaktorblöcken gleichzeitig, wodurch die nach dem Tsunami noch vorhandenen Notfallmittel und das Personal aufgeteilt werden mussten. Dies führte zu sub-optimaler Notfallbekämpfung und zu Zeitverlusten. Zudem waren die einzelnen Blöcke nicht konsequent baulich und systemtechnisch getrennt, so dass ein Problem von einem Block auf den benachbarten übergreifen konnte.

Die japanische Regierung zieht daraus die Lehre, dass bei Anlagen mit mehreren Blöcken diese ingenieurtechnisch getrennt sein müssen und die Belegschaft jedes Blocks in der Lage sein muss, unabhängig von den anderen die jeweiligen Notfallmassnahmen durchzuführen.

### Aufsichtsbehörde

- Die Nisa war dem Wirtschafts- und Handelsministerium (Meti) unterstellt. Dies entspricht nicht den internationalen Anforderungen zur Unabhängigkeit von Sicherheitsbehörden. Ab Anfang April 2012 wird die Nisa aus dem Meti herausgelöst und als unabhängige Abteilung dem Umweltministerium unterstellt. Überprüft wird auch der Aufgabenbereich der Nuklearen Sicherheitskommission (NSC).

### Sofortmassnahmen

Im Juli 2011 beschloss die japanische Regierung, in allen Kernkraftwerken des Landes einen zweistufigen Stresstest durchzuführen. Abgeklärt werden zunächst die Sicherheitsreserven bei Naturereignissen, welche die Annahmen bei der Auslegung der Anlagen übertreffen. Im zweiten Teil wird eine Sicherheitsüberprüfung ähnlich dem Stresstest der EU durchgeführt. Der Nachweis genügender Sicherheitsreserven ist die Voraussetzung für das Wiederanfahren einer Anlage nach dem Wartungsstillstand. Der zweite Teil zielt auf die weitere Verbesserung des Sicherheitsniveaus. Dieser Prozess wird von der IAEO begleitet; die Ergebnisse der Stresstests werden von ihr überprüft.

*Insgesamt zeigt die Analyse der Ereignisse, dass der Unfall in Fukushima-Daiichi nicht das vielzitierte «Restrisiko der Kernenergie» darstellt.*

### Versagen des japanischen Systems

Der Unfall wäre nicht geschehen, wenn die NSC, die Nisa und die Betreiberin das offensichtlich beträchtliche Risiko grosser Tsunamis in der Region anerkannt hätten und die Anlage rechtzeitig auf einen modernen Stand der Sicherheitstechnik nachgerüstet worden wäre. Wäre ausserdem im Vorfeld ein wirksameres – formell von den Behörden gefordertes – Notfallmanagement implementiert gewesen, so hätte dies zweifellos zu einem mildereren Unfallablauf mit geringeren Auswirkungen auf die Umgebung geführt.

*In ihrer Gesamtwertung kommt die japanische Regierung zum Schluss, dass die Sicherheitskultur im Kernenergiebereich ungenügend war. Eine bittere Folge davon war, dass die Einschätzung der Risiken weder von der Betreiberin noch von der zuständigen Atom-sicherheitsbehörde kritisch hinterfragt und der zunehmende Wissensstand nicht in eine entsprechende Nachrüstung der Anlagen umgesetzt wurde.*

Weshalb die Sicherheitskommission, die Aufsichtsbehörde und die Betreiberin des Kernkraftwerks Fukushima über so lange Zeit zu keiner realistischen Einschätzung des tatsächlichen Tsunamirisikos gelangten und entsprechende unfallverhütende Massnahmen unterblieben, bleibt vorderhand ungeklärt.





---

## Lehren für die Schweiz

Auf eine schwere Naturkatastrophe sind die Schweizer Kernkraftwerke sehr viel besser vorbereitet als die Anlagen in Fukushima-Daiichi. Ziel der schweizerischen Vorsorgepolitik ist, dass ein gravierender Unfall in einem Kernkraftwerk – auch wenn dessen Eintrittswahrscheinlichkeit sehr klein ist – so beherrscht werden kann, dass Bevölkerung und Umwelt keinen grösseren Schaden durch austretende Radioaktivität erleiden.

### Sicherheitskultur

In der Schweiz ist die Sicherheit der Kernanlagen für die Betreiber der Anlagen wie für die Aufsichtsbehörde eine Daueraufgabe. Die Sicherheit wird vom unabhängigen Eidgenössischen Nuklearsicherheitsinspektorat (Ensi) und den Betreibern selbst laufend überprüft und die Anlagen wurden und werden laufend gemäss neuer Erkenntnisse nachgerüstet.

Das Einhalten des jeweiligen Standes der Technik wird vom Kernenergiegesetz ausdrücklich gefordert<sup>6</sup> und die Schweizer Kernkraftwerke werden zusätzlich regelmässig im 10-Jahres-Rhythmus auf ihre Sicherheit überprüft. Im untersuchten Risikospektrum sind auch sehr unwahrscheinliche Ereignisse wie extreme Naturkatastrophen enthalten.

### Vorsorge und Nachrüstungen

Dieser Überprüfungsprozess setzte in der Schweiz bereits in den 1970er-Jahren ein, kurz nach Inbetriebnahme der ersten Kernkraftwerke. In den vergangenen Jahrzehnten und insbesondere nach dem Kernschmelzunfall im amerikanischen Kernkraftwerk Three-Mile-Island im Jahr 1979 haben die Betreiber der schweizerischen Kernkraftwerke Modernisierungen in Milliardenhöhe vorgenommen.

---

<sup>6</sup> *Kernenergiegesetz, Art. 22 g*: Der Bewilligungsinhaber «muss die Anlage soweit nachrüsten, als dies nach der Erfahrung und dem Stand der Nachrüstungstechnik notwendig ist, und darüber hinaus, soweit dies zu einer weiteren Verminderung der Gefährdung beiträgt und angemessen ist».

### Neubewertung von Erdbebenrisiken

Und die Vorsorge geht weiter: Bereits im Jahr 2000 begann in der Schweiz aufgrund des wissenschaftlichen Fortschritts die Neubewertung des Erdbebenrisikos, die auch äusserst seltene Beben mit einer Wahrscheinlichkeit von einmal in zehn Millionen Jahren einschliesst (Projekt Pegasos). Diese neuen Erkenntnisse fliessen laufend in die weitere Verbesserung der Anlagen ein.

*Seit dem Bau der ersten Kernkraftwerke in der Schweiz Ende der 1960er-Jahre hat die Schweizer Sicherheitskultur bewirkt, dass das Sicherheitsniveau der dienstälteren Kraftwerke bis heute um das Hundertfache erhöht worden ist. Sicherheit und Wirtschaftlichkeit gehen Hand in Hand: Nur eine sichere Anlage ist auch eine wirtschaftliche Anlage.*

### Fünf entscheidende Unterschiede

Die Schweizer Kernkraftwerke unterscheiden sich in fünf entscheidenden Merkmalen von der verunglückten Anlage Fukushima-Daiichi:

1. Die Sicherheitsanalysen wurden regelmässig überprüft und entsprechen dem aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik. Sie berücksichtigen auch extrem seltene Naturereignisse wie Erdbeben und Hochwasser, die nach heutigem Stand des Wissens höchstens einmal in 10 000 Jahren zu erwarten sind.
2. Die Gefahr durch Hochwasser ist bereits bei der Projektierung berücksichtigt worden. Die im Zusammenhang mit der Planung der Ersatz-Kernkraftwerke im Jahr 2009 aktualisierten Standortstudien haben die früheren Annahmen und Ergebnisse weitestgehend bestätigt.
3. Alle schweizerischen Kernkraftwerke verfügen bereits heute über mehrfache, unterschiedliche und voneinander unabhängige Not- und Nachkühlsysteme. Zudem sind alle Anlagen zusätzlich mit gebunkerten, gegen schwere Erdbeben, Überschwemmung, Flugzeugabsturz und Terrorangriff geschützten Notstandssystemen ausgerüstet. Sie stehen auch dann noch zur Verfügung, falls die anderen Not- und Nachkühlsysteme versagen würden.
4. Ebenfalls vor zwei Jahrzehnten eingebaut wurden Systeme, die Wasserstoffgas abbauen, bevor es explodieren kann. Die Nachrüstungen umfassten auch den Einbau eines störfallfesten, unabhängigen Systems zur gefilterten Containment-Druckentlastung. Mit diesem System kann der Dampf im extremen Notfall über den Kamin in die Umwelt entlassen werden, wobei weit über 99 Prozent der darin vorhandenen radioaktiven Stoffe im Filter zurückgehalten werden. Die Systeme erlauben zudem im absoluten Notfall (gleichzeitiger Ausfall der Notstrom- und der Notstandsdiesel) die langfristige, passive, stromunabhängige Abgabe der Nachzerfallswärme an die Umgebung.
5. Die Notfallvorbereitungen in den Schweizer Kernkraftwerken sind auf hohem Niveau und umfassen zahlreiche robuste Prozeduren, mit denen auch in Notstandssituationen einer Beschädigung des Reaktorkerns vorgebeugt werden kann. Mehrmals pro Jahr werden unter Aufsicht der Behörden Notfallübungen durchgeführt, die auch besonders schwerwiegende Unfallszenarien mit Kernschaden einschliessen.

*Da die Schweizer Kernkraftwerke aus den Unfällen von Three-Mile-Island (1979) und Tschernobyl (1986) die wichtigen Lehren zu Vorsorge- und Nachrüstmassnahmen gegen schwere Unfälle gezogen und umgesetzt haben, ergeben sich für die Schweiz nur wenig grundlegend neue Lehren aus dem Fukushima-Unfall.*

## Massnahmen nach Fukushima

Als Sofortmassnahme nach dem Unfall in Japan hat das Ensi ein zentrales externes Lager mit zusätzlichen Notfallausrüstungen verlangt. Dieses Lager ist termingerecht am 1. Juni 2011 von den Kernkraftwerkbetreibern bereitgestellt worden. Es befindet sich in einem erdbeben- und überflutungssicheren ehemaligen Bunker der Schweizer Armee. In diesem Depot lagern unter anderem Notstromaggregate, Pumpen, Treibstoff und zahlreiches weiteres Material, das bei Bedarf sofort per Helikopter an den Einsatzort geflogen werden könnte.

Im Licht der Analyse der Ereignisse in Fukushima-Daiichi hat das Ensi weitere vorsorgliche Massnahmen identifiziert, die schrittweise bis Ende März 2012 in den Kernkraftwerken umgesetzt werden. Dazu gehört insbesondere eine weitere, vertiefte Analyse eines unerwartet lang andauernden Ausfalles der externen Stromversorgung und seiner notfallmässigen Beherrschung hinsichtlich der Kühlung von Reaktor und Lagerbecken.

Das Ensi hat dazu am 5. Mai 2011 entsprechende Verfügungen erlassen. Sie verpflichten die Betreiber der Kernkraftwerke, ihre Anlagen auf weitere Verbesserungsmöglichkeiten bei der Beherrschung sehr seltener Erdbeben und Hochwasser (10 000-jährliches Ereignis) wie auch der Kombination von Erdbeben mit gleichzeitigem Versagen von Staumauern zu überprüfen. Als ein Ergebnis aus diesem Prozess hat das Kernkraftwerk Mühleberg den Umbau der Wasserfassung für das Notstandssystem in Angriff genommen und dafür im Sommer 2011 die Anlage für rund zwei Monate abgestellt.

## «Stresstest» der EU

Das Ensi hat zudem die Betreiber verpflichtet, den «Stresstest» der EU zur Feststellung der effektiven Sicherheitsreserven durchzuführen. An diesem Test nahmen während des Jahres 2011 rund 160 Kernkraftwerke im europäischen Umfeld teil. Der EU-Stresstest hat erneut den hohen Sicherheitsstandard der Schweizer Kernkraftwerke bestätigt. Das Ensi hat dennoch weitere Punkte identifiziert, die noch optimiert werden sollen. Die Behörde verlangt von den Betreibern, dass sie bis Ende 2012 diese Punkte überprüfen und gegebenenfalls Verbesserungen vorschlagen.

Unabhängig vom EU-Stresstest hat das Ensi 37 weitere Prüfpunkte identifiziert, die unter anderem die Notfallschutzmassnahmen bei Extremereignissen betreffen. Bis 2015 werden diese Punkte dahingehend überprüft, ob sie noch up-to-date sind.

*Die nüchterne Bewertung der Schweizer Kernkraftwerke zeigt, dass in unseren Anlagen alles das vorhanden ist, was in Fukushima-Daiichi zur Beherrschung des Unfalls fehlte – weil in der Schweiz die dafür nötigen Sicherheitsausrüstungen von Anfang an eingebaut wurden oder bereits in den frühen 1990er-Jahren nachgerüstet worden sind.*

*Das Nuklearforum Schweiz bedankt sich bei Johannes Nöggerath, Präsident der Schweizerischen Gesellschaft der Kernfachleute (SGK), für die umfassende fachliche Unterstützung bei der Erarbeitung dieses Dossiers.*

Das haben auch verschiedene japanische Institutionen erkannt, die derzeit die Schweizer Kernkraftwerke und das Ensi besuchen, um unsere Sicherheitstechnik und Sicherheitskultur zu studieren. Inzwischen gelten sie aber auch in weiteren Ländern, die im Stresstest einen Verbesserungsbedarf ihrer Anlagen identifiziert haben, als gutes Beispiel. Die schweizerische Sicherheitskultur bei Behörden wie bei den Betreibern wird auch in Zukunft dafür sorgen, dass die weiteren Erkenntnisse aus dem Unfall in Fukushima-Daiichi in praktische Massnahmen umgesetzt werden und so die bereits sehr hohe Sicherheit der Schweizer Kernkraftwerke weiter erhöhen. Der Lernprozess ist noch längst nicht abgeschlossen.

Quellen:

Government of Japan, Nuclear Emergency Response Headquarters: The accident at Tepco Fukushima Nuclear Power Stations. Report of the Japanese Government to the IAEA Ministerial Conference on Nuclear Safety. Tokyo, June 2011, ~ 750 p.  
<http://www.iaea.org/newscenter/focus/fukushima/japan-report/>

Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat: Ensi-Berichte zu Fukushima (I: Chronologie, II: Mensch und Organisation, III: Lessons Learned, IV: Radiologische Auswirkungen). Brugg, 2011.  
<http://www.ensi.ch/de/dossiers/fukushima-2/>

Nöggerath J., Geller R.J. & Gusiakov V.K.: Fukushima: The myth of safety, the reality of geoscience. Bulletin of the Atomic Scientists. September/October 2011, vol. 67 no. 5, 37-46.  
<http://bos.sagepub.com/content/67/5/37>

Japan Nuclear Technology Institute: Review of Accident at Tokyo Electric Power Company Incorporated's Fukushima Daiichi Nuclear Power Station and Proposed Countermeasures (Summary). Tokyo, October 2011, 23 p.  
[www.gengikyo.jp/english/shokai/Tohoku\\_Jishin/summary.pdf](http://www.gengikyo.jp/english/shokai/Tohoku_Jishin/summary.pdf)

Institute of Nuclear Power Operations (INPO): Special Report on the Nuclear Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station. Atlanta, GA/USA, November 2011, 97 p.  
<http://www.nei.org/resourcesandstats/documentlibrary/safetyandsecurity/reports/>

Investigation Committee on the Accidents at Fukushima Nuclear Power Stations of Tokyo Electric Power Company: Executive Summary of the Interim Report. Tokyo, 26 December 2011, 22 p.  
<http://icanps.go.jp/eng/111226ExecutiveSummary.pdf>