

Der Reaktorunfall in Fukushima Daiichi

Folge fehlerhafter Auslegung und
unzureichender Sicherheitstechnik



Am 11. März 2011 ereignete sich mit einem Seebeben der Stärke 9,0 (Magnitude) und einer dadurch ausgelösten Serie von Tsunamis (Flutwellen) an der Nordostküste Japans eine verheerende Naturkatastrophe. Ganze Landstriche wurden verwüstet, ca. 16.000 Menschen kamen ums Leben. Auch vier Kernkraftwerksstandorte waren in dieser Region direkt betroffen; am schwerwiegendsten der Standort Fukushima Daiichi, 250 km nördlich von Tokio.

Dort befinden sich sechs Siedewasserreaktoren mit einer elektrischen Nettoleistung von insgesamt 4.547 Megawatt, die zwischen 1971 und 1979 in Betrieb genommen wurden und zur ältesten Generation der in Japan gebauten und betriebenen Kernkraftwerke gehören.



Kernkraftwerksstandort Fukushima Daiichi an der Ostküste Japans in der Präfektur Fukushima, ca. 250 km nördlich von Tokio vor dem 11. März 2011 (links) und nach dem verheerenden Tsunami und den nachfolgenden Wasserstoffexplosionen (rechts)

(Quelle: TEPCO)

Unfallhergang – Was ist passiert?

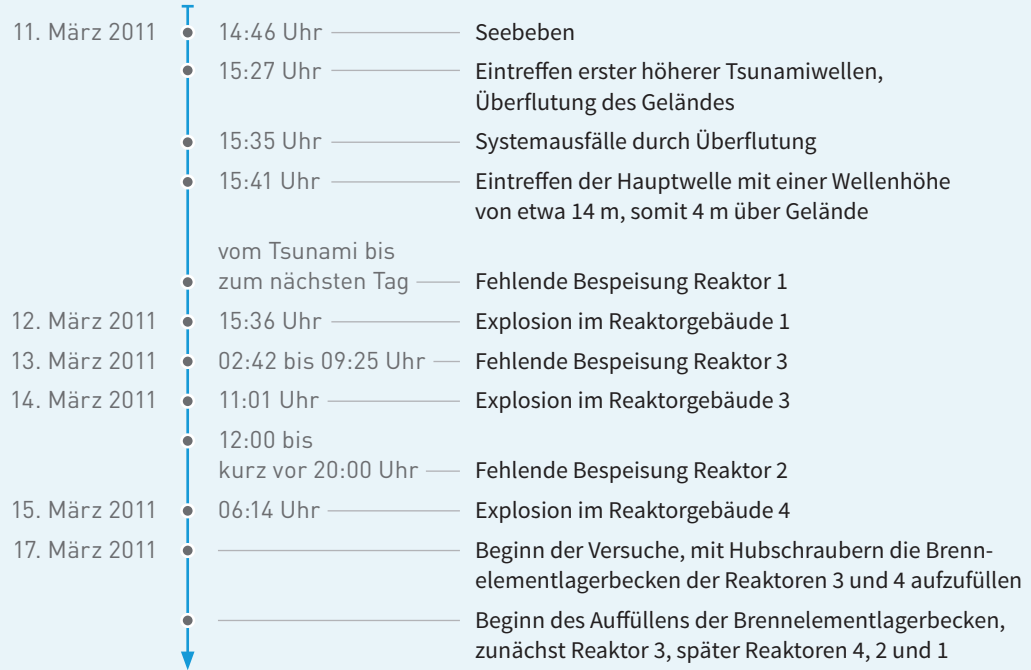
Auslegungsgemäß schalteten sich die Reaktoren 1 bis 3, die zum Zeitpunkt des Bebens in Betrieb waren, automatisch ab. Infolge des Seebebens brach das Stromnetz der Region zusammen. Da Reaktorkerne auch nach einer Abschaltung weiter Wärme erzeugen (Nachwärme), mussten diese weiter gekühlt werden. Aufgrund der fehlenden externen Stromversorgung sprangen auslegungsgemäß alle 13 Notstromdieselgeneratoren an und stellten die Nachkühlung der Reaktorkerne und der Brennelementlagerbecken sicher. Die Reaktoren 4 bis 6 waren für Revisionen abgeschaltet. Im Block 4 war dazu der Reaktorkern vollständig in das Brennelementlagerbecken entladen. Das Seebeben verursachte keine signifikanten sicherheitsrelevanten Schäden an den Anlagen.

Der erste von insgesamt sieben Tsunamis traf 41 Minuten nach dem Seebeben am Standort ein. Nach dem Auftreffen der größten, mehr als 14 Meter hohen Flutwelle versagten 12 von insgesamt 13 Notstromdieseln, die zum Großteil in den nicht gegen Wassereinbruch geschützten Kellern der Maschinenhäuser untergebracht waren. Da die Reaktoren 1 bis 4 etwa 10 Meter oberhalb des Meeresspiegels errichtet worden waren – die Reaktoren 5 und 6 etwas höher auf 13 Metern Höhe –, stand das Anlagengelände im Bereich der Reaktoren 1 bis 4 während der größten Flutwelle einige Minuten lang 4 bis 5 Meter unter Wasser. Dadurch drang Wasser in die Kellerräume der Maschinenhäuser ein, in denen neben

den ungeschützten Notstromdieseln auch Schaltanlagen für die Wechsel- und Gleichstromversorgung sowie Batterien untergebracht waren. Dadurch fiel die Stromversorgung der Nachkühlssysteme aus, die insbesondere zur Abfuhr der Nachwärme aus den Reaktoren 1 bis 3 sowie aus den Lagerbecken 1 bis 4 notwendig gewesen wären.

Die Notfallmaßnahmen waren nach Meinung von Experten nicht ausreichend und wurden zu spät eingeleitet, um Schäden an den Reaktorkernen der aktiven Blöcke 1 bis 3 zu vermeiden. Wegen einer teilweise über mehrere Stunden fehlenden bzw. unzureichenden Kühlwassereinspeisung kam es in diesen drei Blöcken zur Freilegung der Reaktorkerne durch Ausdampfen des Kühlwassers und zur Überhitzung der Brennstoffhüllrohre. Die Bildung von Wasserstoff durch die chemische Oxidation des überhitzten Brennstabhüllrohrmaterials (eine Zirkoniumlegierung) mit Kühlwasserdampf führte zu einem weiteren Druckanstieg in den mit Stickstoff inertisierten Containments (Sicherheitsbehältern) und (wahrscheinlich nach Überdruckversagen der Containment-Deckeldichtungen) zur Freisetzung von Wasserstoff in die Reaktorgebäude. Die Reaktorgebäude 1, 3 und 4 wurden jeweils im oberen Bereich durch Wasserstoffexplosionen schwer beschädigt. In Block 2 trat wahrscheinlich eine Wasserstoffdeflagration auf, die nach Herausbrechen einer einzelnen Wandplatte zu einer Überdruckentlastung des Gebäudes führte.

Chronologie der
Ereignisse – Ortszeit
(Quellen: GRS, VGB)



5

Nach japanischen Angaben explodierte Block 4 auf Grund des Eintrags von Wasserstoff von Block 3 über ein gemeinsames System.

Mit dem Versagen der Notstromdiesel war auch die Kühlung der Brennelementlagerbecken der Reaktoren 1 bis 4 ausgefallen. Nach einigen Tagen gelang es, von außen Kühlwasser nachzuspeisen. Später wurden provisorische Beckenkühlkreisläufe installiert bzw. die

Kühlkreisläufe wieder in Betrieb genommen, als die externe Stromversorgung wiederhergestellt werden konnte.

In den Blöcken 5 und 6 unterblieb eine Beschädigung der Brennelemente, da einer der fünf zugeordneten Notstromdiesel (luftgekühlt) den Tsunami überstand und so durch abwechselnde Aufschaltung die Kühlung beider Blöcke sicherte.

Aktuelle Computernachrechnungen mit Schwerstörfallanalysecodes zum Zustand des Brennstoffs deuten darauf hin, dass in den Reaktoren 1 bis 3 ein Großteil der Brennelemente aufgeschmolzen wurde. Der größte Teil der Kernschmelzen dürfte sich zunächst bis auf den Boden der Reaktordruckbehälter und nach deren Durchschmelzen von dort weiter in die meterhoch gefluteten Reaktorgruben in den Sicherheitsbehältern verlagert haben. Hier dürften Wechselwirkungen zwischen den Kernschmelzen und dem Wasser sowie mit den mit rund 2,6 Meter ausreichend dicken Bodenbetonschichten dazu geführt haben, dass die Kernschmelzen nach Eindringtiefen von wahrscheinlich deutlich weniger als etwa einem Drittel dieser Fundamente durch Verdampfung und Vermischung mit Betonbestandteilen auskühlten und wiedererstarren.

Im Jahr 2014 durchgeführte Endoskopuntersuchungen haben bestätigt, dass die Böden der Reaktorgebäude im Meterbereich unter Wasser stehen. In die Reaktoren nachgespeistes Wasser sammelt sich hier, es bestehen offenbar Verbindungen mit den Maschinenhauskellern, sodass das dort abgepumpte Wasser ständig nachkontaminiert wird. Das gereinigte Wasser wird in großen Tanks auf dem Kraftwerksgelände zwischengelagert und kann nach Freimessung ins Meer geleitet werden.

Ab 2017 sind weitere Erkenntnisse über die Lokalisierung der Brennstoffreste gewonnen worden, zunächst durch die Röntgen-bildartige Auswertung kosmischer, beim Durchtritt durch Materie dichteabhängig geschwächter Hintergrundstrahlung (Myonentomografie), danach durch Kamerainspektionen mit fernbedienten Robotern. Sie lieferten zum Teil spektakuläre Bilder, unter anderem von einem intakten Brennelementkopfbügel auf fragmentierten Erstarrungsprodukten, was bedeutet, dass der zugehörige Reaktordruckbehälter mindestens eine Öffnung im Dezimeterbereich aufweisen muss. Alle Bilder zeigen feinfragmentierte, mehr oder weniger staubförmige Ablagerungen auf allen horizontalen Flächen, was typisch für einen „Blowdown“ noch unter erhöhtem Innendruck ist.

Lokale Bilder von den Unterseiten der Reaktorgefäße zeigen nach wie vor die Steuerstabantriebe. Alle drei Reaktorgruben sind heute meterhoch geflutet (d. h. mit Temperaturen deutlich unter 100 Grad) und offenbar großflächig mit den erstarrten Blowdown- und Schmelzprozessprodukten belegt.

Als nächster Schritt soll mit einem Roboter manipulator geprüft werden, inwieweit es sich um lose Schüttungen bzw. feste Lava handelt. Die Bergung des Brennstoffs und Verpackung in endlagerfähige Behälter ist für die nächsten ca. 30 Jahre vorgesehen.

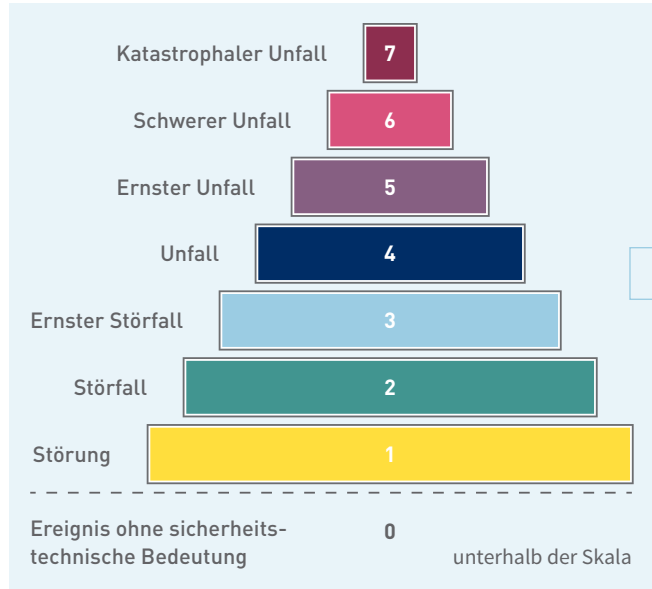
Radiologische Situation

Insgesamt wurden einige 100.000 Terabecquerel (TBq) Jod-Äquivalent freigesetzt. Die Freisetzung in Fukushima Daiichi entspricht somit 5 bis 10 Prozent der beim Reaktorunfall in Tschernobyl 1986 freigesetzten Menge. An Aerosolen gelangten hauptsächlich Jod und Cäsium in einer Menge von einigen Prozent des Gesamtbestands der drei Blöcke (1 bis 3) in die Umgebung. Der Wind trug die radioaktiven Stoffe vor allem zunächst nach Osten, also aufs offene Meer, und später kurzzeitig auch nach Nordwesten. Hohe Kontaminationen konnten im Nordwesten über die 30-Kilometer-Evakuierungszone hinaus punktuell bis in eine Entfernung von etwa 40 Kilometern gemessen werden. Rund 1.500 Quadratkilometer sind von Evakuierungsanordnungen oder Evakuierungsempfehlungen betroffen. Das entspricht rund 15 Prozent der Fläche nach dem Unfall von Tschernobyl. Teile der 30-km-Evakuierungszonen wurden inzwischen wieder freigegeben, einige Gebiete im Nordwesten jedoch auch zusätzlich einbezogen. Großflächig werden von den japanischen Behörden Dekontaminationsmaßnahmen in den belasteten Gebieten durchgeführt.

Die Expositions Dosen der Zivilbevölkerung konnten dank der Evakuierungen deutlich unter dem zulässigen Grenzwert von 20 Millisievert (mSv)/Jahr gehalten werden. Insgesamt sechs Arbeiter erhielten Strahlendosen über dem für sie geltenden Grenzwert von 250 mSv, maximal ca. 680 mSv. Für den zum Beispiel höchstbelasteten Arbeiter erhöht sich das persönliche Krebsrisiko um 3,4 Prozentpunkte, d. h. von 25 auf 28,4 Prozent.

Nach Angaben der World Health Organization (WHO) und des United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR) konnten keine akuten gesundheitlichen Schäden aufgrund der unfallbedingten Strahlung beobachtet werden.

Einstufung des Unfalls nach INES-Skala



Die japanischen Behörden haben die Ereignisse aufgrund der gesamtradiologischen Belastung in die Stufe 7 der siebenstufigen International Nuclear and Radiological Event Scale INES der Internationalen Atomenergieagentur (IAEA) eingeordnet.

INES-Skala

8

Auslegung gegen Naturereignisse

Die Auslegung gegen Erdbeben und Überflutungen für Kernkraftwerke erfolgte in Japan in den 1960er-Jahren. Der Erdbebenschutz war strenger ausgelegt und wurde im Laufe der Jahre immer wieder optimiert, während der Schutz gegen Tsunamis lediglich die historische maximale Wellenhöhe am Standort mit einer geringen, nicht systematisch festgelegten Reserve berücksichtigte.

Für den Kernkraftwerksstandort Fukushima Daiichi mit einer Geländehöhe von 10 Metern betrug die Tsunami-Auslegungshöhe 5,7 Meter. Der Tsunami am 11. März 2011 erreichte am Kernkraftwerksstandort allerdings eine Höhe von mehr als 14 Metern. Derartige Flutwellenhöhen sind nicht selten für die japanischen Küsten. Tatsächlich tritt im Durchschnitt ca. alle 30 Jahre ein

Tsunami mit mehr als 10 Metern Höhe an Japans Küsten auf, für die Nordostküste Honshus im Bereich von 300 Jahren, zuletzt 1933, 1896, 1611 und 869. Die deutlich unzureichende Auslegung der Anlagen gegen solche Tsunamis ist die wesentliche Ursache für die Ereignisabläufe.

Das anlagentechnische Gesamtrisiko, definiert als Schadensausmaß mal Eintrittswahrscheinlichkeit, wurde für Fukushima Daiichi nachweislich falsch bewertet. Die Anlagen waren schlicht nicht gegen große, aber in Japan immer wieder vorkommende Tsunamis ausgelegt. Damit fällt die Katastrophe nicht in den Bereich des über die

Anlagenauslegung nicht mehr abgedeckten Restrisikos, sondern betrifft die Gestaltung der Basisauslegung. Diese bot gegenüber diesen durchaus absehbaren Einwirkungen von außen keinen ausreichenden Schutz.

In Deutschland wurde der Restrisikobereich bereits bei der Bemessung der Auslegungswerte für Kernkraftwerke gegen Einwirkungen von außen und bei der Genehmigung von Anfang an klar vorgegeben: Alle Anlagen sind so ausgelegt, dass sie mindestens dem 100.000-jährlichen Erdbeben und dem 10.000-jährlichen Hochwasser, bemessen am statistischen Mittel für den jeweiligen Standort, standhalten.

Wesentliche Unterschiede im sicherheitstechnischen Vergleich

9

Zum Unfallablauf hat aber auch die zum Beispiel gegenüber deutschen Kernkraftwerken geringere sicherheitstechnische Ausstattung der japanischen Anlagen maßgeblich beigetragen. Eine für deutsche Kernkraftwerke typische Sicherheitsauslegung hätte einen Unfallablauf wie in Fukushima verhindert.

Dazu zählen auch verbunkerte, das heißt gegen Einwirkungen von außen geschützte, und an verschiedenen Standorten aufgestellte Dieselmotor-Notstromeinrichtungen. Bereits wasserdichte Maschinenhaustüren hätten den Unfall und seine Folgen in Fukushima Daiichi verhindern können.

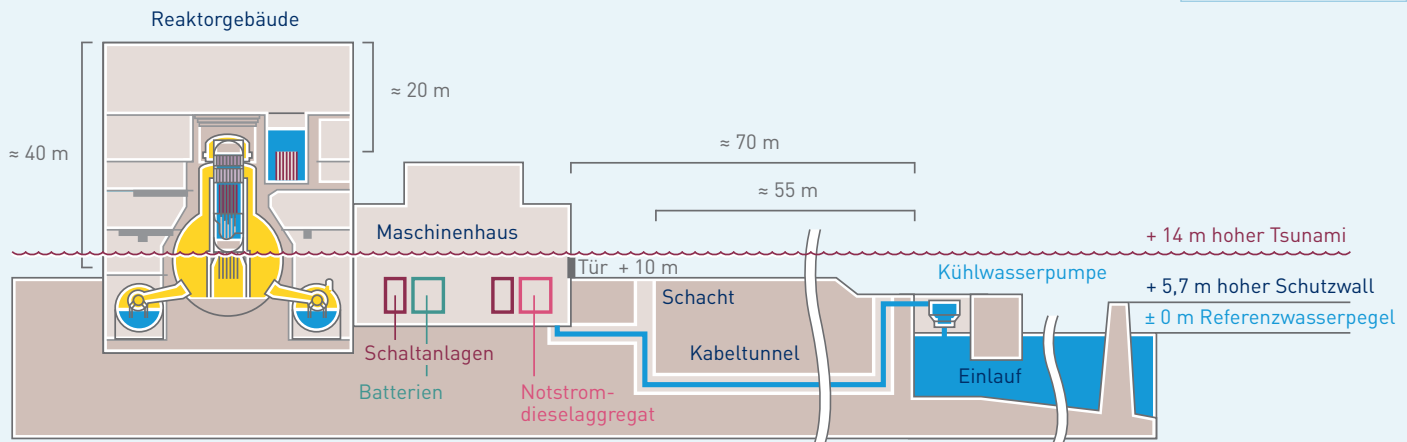
Deutsche Kernkraftwerke weisen im Vergleich zu den Anlagen in Fukushima Daiichi weitere Unterschiede in der sicherheitstechnischen Auslegung auf: beispielsweise in der Anzahl der mehrfach (Redundanz) sowie unterschiedlich und unabhängig (Diversität) ausgelegten Systeme zur Nachwärmeabfuhr, Notkühlung und zur Notstromversorgung. In Fukushima Daiichi waren jeweils nur drei Notstromdiesel je Doppelblock und ein zusätzlicher als Reserve für den gesamten Standort vorhanden. In Deutschland gibt es in der Regel mindestens vier Notstromsysteme für jeden Reaktor plus weitere voneinander unabhängige Systeme. Dazu gehören die normale Netzanbindung, die Reservenetzanbindung, die Versorgung über den eigenen Generator

(Eigenbedarfsversorgung), eine weitere diversitäre Notstromverbraucherversorgung (Notspeisediesel), sowie eine weitere unabhängige, kurzfristig verfügbare Drehstromversorgung (sogenannte 3. Netzeinspeisung). Die Annahme eines Totalausfalls der Drehstromversorgung setzt somit die Unverfügbarkeit aller oben genannten Versorgungsoptionen voraus.

In den deutschen Kernkraftwerken sind für den Extremfall neben diesen Vorsorgemaßnahmen umfangreiche Notfallschutzmaßnahmen zur Vermeidung bzw. Entschärfung der Folgen eines Kernschadens vorgesehen, so der Abbau

von Wasserstoff über passiv wirkende Rekombinatoren (Geräte, die gasförmigen Wasserstoff mit Sauerstoff in Wasser umwandeln) und eine gefilterte Druckentlastung des Containments. Solche technischen Maßnahmen, aber auch das administrative Vorgehen beim Krisenmanagement sind in Notfallplänen beschrieben und werden regelmäßig geübt. Das gilt auch für die rechtzeitige Einleitung der Notfallschutzmaßnahmen. Damit soll auch in Extremsituationen ein Kernschaden rechtzeitig und dauerhaft vermieden und damit eine Belastung der Umgebung verhindert oder minimiert werden.

Lage der Reaktoren am Standort Fukushima Daiichi, schematische Darstellung
 (Quelle: atw - International Journal for Nuclear Power)



Deutsche Kernkraftwerke sind hochgradig robust

Nach den Ereignissen in Fukushima hat die Bundesregierung die Reaktor-Sicherheitskommission (RSK) mit der Überprüfung der deutschen Kernkraftwerke beauftragt. Die RSK hat im Mai 2011 eine anlagenspezifische Sicherheitsüberprüfung unter Berücksichtigung der Ereignisse in Fukushima entsprechend der zu diesem Zeitpunkt vorliegenden Informationen durchgeführt: Untersucht wurden Auslegungsgrenzen und Robustheitsgrad bei Erdbeben, Hochwasser oder Starkregen. Die RSK stellte fest, dass „initiierte Ereignisse, die zu derartigen Tsunamis führen können, ... nach dem jetzigen Kenntnisstand für Deutschland praktisch ausgeschlossen [sind]... Die Stromversorgung der deutschen Kernkraftwerke ist durchgehend robuster als in Fukushima I [Daiichi]. Alle deutschen Anlagen haben mindestens eine zusätzlich gesicherte Einspeisung und mehr Notstromaggregate, wobei mindestens zwei davon gegen äußere Einwirkungen geschützt sind.“

Zusätzlich wurden deutsche Anlagen dem EU-Stresstest, einer Überprüfung aller Kernkraftwerke in der Europäischen Union anhand EU-weiter Kriterien durch die Europäische Kommission und die Europäische Gruppe der Regulierungsbehörden für nukleare Sicherheit (ENSREG) unterzogen. In Deutschland ging die Überprüfung über den in der EU festgelegten Rahmen hinaus: Untersucht wurden auch menschlich beeinflusste Ereignisse wie Flugzeugabsturz, Gasexplosionen außerhalb der Anlage, terroristische Angriffe sowie der Einfluss von Unfällen in benachbarten Anlagen.

Der EU-Stresstest in Deutschland hat die Ergebnisse der RSK bestätigt, nach denen deutsche Kernkraftwerke hochgradig robust sind. Danach verfügen die deutschen Kernkraftwerke bei allen unterstellten Szenarien über große Sicherheitsreserven, die über die in Gesetzen, Genehmigungen und Regelwerken festgelegten Anforderungen weit hinausgehen. In den deutschen Kernkraftwerken finden sich darüber hinaus laut Europäischer Kommission zahlreiche Beispiele für vorbildliche Vorgehensweisen (Good Practices).

Wie geht es weiter in Fukushima?

Der Kernbrennstoff aller Reaktoren befindet sich in einem stabilen, gekühlten Zustand. Die Freisetzung radioaktiver Stoffe ist gestoppt. Die durch die Wasserstoffexplosionen beschädigten Gebäude der Reaktoren 1, 3 und 4 sind luftdicht durch neue umhüllende Gebäude und Unterdruckhaltung eingeschlossen, dasselbe gilt für den Reaktor 2, dessen Gebäudehülle repariert wurde. Das kontaminierte Wasser aus den Maschinenhauskellern wird seit Mitte 2011 aufbereitet und soweit nötig als Kühlwasser für die Reaktoren wiederverwendet. Allerdings konnten bis zur Inbetriebnahme einer zusätzlichen Wasserreinigungsanlage im Jahr 2014 nicht alle Radionuklide aus dem Kühlwasser entfernt werden, sodass die Zwischenlagerung nötig wurde. Inzwischen kann Grundwasser, das noch nicht durch die Maschinenhauskeller gelaufen ist, ins Meer abgegeben werden. Der japanische Betreiber der Kernkraftwerke am Standort Fukushima Daiichi, TEPCO, hat Anträge gestellt, auch die weitgehend dekontaminierten Wasserrückstände aus der neuen Aufbereitungsanlage ins Meer abgeben zu dürfen.

Den zuständigen japanischen Ministerien hat der Betreiber einen Fahrplan für alle notwendigen Arbeitsschritte zur Stabilisierung, Stilllegung und Entsorgung der Reaktoren 1 bis 4 vorgelegt und konkrete Ziele formuliert. Danach werden die Arbeiten in drei Phasen durchgeführt und können sich über einen Gesamtzeitraum von 30 bis 40 Jahren erstrecken.

Als erste Maßnahme wurden bis Dezember 2014 alle Brennelemente aus dem Lagerbecken von Block 4 geborgen und per Transportbehälter in das ebenfalls am Standort befindliche unbeschädigte Zwischenlager gebracht. Hierbei zeigte sich, dass die Brennelemente unbeschädigt waren, das Lagerbeckeninventar während der Ausdampfphase in den ersten Tagen nach dem Tsunami also nicht freigelegt worden ist.

Schlussfolgerungen

Der schwerwiegende Reaktorunfall in Fukushima Daiichi war Folge einer fehlerhaften Auslegung des Kraftwerks gegen Tsunamis und damit unzureichender Sicherheitsstandards, die nicht dem Stand der internationalen Sicherheitsphilosophie und den genehmigungsrechtlichen Anforderungen entsprachen, wie sie zum Beispiel in Deutschland üblich sind.

Eine fehlerhafte Auslegung liegt dann vor, wenn kein ausreichender Schutz gegen Einwirkungen von außen gegeben ist, die absehbar bzw. wahrscheinlich sind. Der Unfall kann daher nicht dem sogenannten anlageninternen Restrisiko zugeordnet werden. Nach dem offiziellen Abschlussbericht der unabhängigen Untersuchungskommission des Japanischen Parlaments (The National Diet of Japan Fukushima Nuclear Accident Independent Investigation Commission) sind die Ereignisabläufe als Folge von Fahrlässigkeit zu bewerten.

Von den ehemals 54 japanischen Kernkraftwerken sind inzwischen neun wieder in Betrieb. Für 16 Reaktoren sind Anträge zur Wiederinbetriebnahme gestellt. Insgesamt 17 sind stillgelegt worden, inklusive der sechs Reaktoren in Fukushima Daiichi. Über die Zukunft von weiteren 12 Kernkraftwerken werden noch Entscheidungen getroffen.

Quellen und weiterführende Informationen

- B. Kuczera, L. Mohrbach, W. Tromm, J. Knebel: „Fukushima auch in Deutschland?“, Spektrum der Wissenschaft, August 2011
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB): www.bmub.bund.de
- Kerntechnik Deutschland e. V. (KernD): KernD.eu
- Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI): www.ensi.ch
 - „Ablauf Fukushima 11032011 – Ereignisabläufe Fukushima Daiichi und Daini infolge des Tohoku-Chihou-Taiheiyou-Oki Erdbebens vom 11.03.2011“
- European Nuclear Safety Regulators Group (ENSREG): www.ensreg.eu
- Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: www.grs.de
 - „Fukushima Daiichi 11. März 2011 – Unfallablauf | Radiologische Folgen – 5. Auflage 2016“
 - „Der Unfall in Fukushima: Zwischenbericht zu den Abläufen in den Kernkraftwerken nach dem Erdbeben vom 11. März 2011“, August 2011; „Analyse zum Grad der Kernschmelze in Fukushima Daiichi (Stand: 30.11.2011) – UPDATE“
- Institute of Nuclear Power Operations (INPO): www.inpo.info
- Japan Atomic Industry Forum (JAIF): www.jaif.or.jp/english
- Ministry of Economy, Trade and Industry (METI): www.meti.go.jp/english
- Reaktor-Sicherheitskommission (RSK): www.rskonline.de
 - „RSK-Stellungnahme 11.–14.05.2011 (437. RSK-Sitzung)“
- The National Diet of Japan: The official report of „The Fukushima Nuclear Accident Independent Investigation Commission“ <http://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/3856371/naiic.go.jp/en>
- Tokyo Electric Power Company (TEPCO): www.tepco.co.jp/en
- VGB PowerTech e.V.: www.vgb.org
 - L. Mohrbach, Essen: „Unterschiede im gestaffelten Sicherheitskonzept: Vergleich Fukushima Daiichi mit deutschen Anlagen“, atw – International Journal for Nuclear Power, Vol. 56 (2011), Issue 4/5

Herausgeber:



Kerntechnik Deutschland e.V.

Robert-Koch-Platz 4
10115 Berlin
M info@KernD.eu

Mai 2019
Alle Rechte vorbehalten.

www.KernD.eu