

Fukushima: eine vorläufige Bilanz im Juli 2011

Rolf Michel

Institut für Radioökologie und Strahlenschutz
Leibniz Universität Hannover

Mehr als vier Monate nach dem Unfall im Kernkraftwerk Fukushima Dai-ichi ist es möglich eine vorläufige Bilanz des Geschehens in Bezug auf den Unfallablauf und die radiologischen Folgen zu ziehen.

1 Informationsquellen

Dieser Beitrag behandelt zuerst die generelle Fragestellung der ersten Tage, den Unfall im Kernkraftwerk Fukushima-Dai-ichi zu verstehen und erste Schätzungen der möglichen radiologischen Konsequenzen auf der Basis der verfügbaren, jedoch unvollständiger Information abzugeben. Dabei erwiesen sich japanische Nachrichtensender, in denen die Wasserstoffexplosionen der Blöcke 1 und 3 live zu sehen waren, z.B. NHK World (http://www3.nhk.or.jp/daily/english/07_07.html), als schnellste Informationsquelle aktueller Entwicklungen. Mit der dort verfügbaren Information war es möglich die Details aktueller Entwicklungen und die Anlagenzustände über die Nuclear and Industrial Safety Agency NISA (<http://www.nisa.meti.go.jp/english/>), das Japan Atomic Industrial Forum JAIF (<http://www.jaif.or.jp/english/>) und den Betreiber TEPCO (<http://www.tepco.co.jp/en/index-e.html>) zu erhalten. Ab 12.3.2011 waren zusammenfassende Darstellungen der Entwicklung der Anlagenzustände durch die Gesellschaft für Reaktorsicherheit GRS (www.grs.de) im Internet verfügbar, die auch über die BMU-Webseite zusammen mit Stellungnahmen des BMU (<http://www.bmu.de>) der Öffentlichkeit zur Verfügung gestellt wurden. Die IAEA (www.iaea.org) erwies sich als relativ langsame Informationsquelle. Als hilfreiche Quellen erwiesen sich auch die Schweizer Alarmzentrale (<https://www.naz.ch>) und das französische IRSN (<http://www.irsn.fr>). Der Deutsche Wetterdienst (www.dwd.de) stellte regelmäßig Berechnungen der Trajektorien von Fukushima ausgehender Luftmassen zur Verfügung. Daten über Kontaminationen der Umwelt und speziell von Lebensmitteln wurden später bei den zuständigen japanischen Ministerien verfügbar:

<http://www.mext.go.jp/english/incident/1303962.htm>,
<http://www.bousai.ne.jp/eng/>, <http://www.jfa.maff.go.jp/e/inspection/index.html>,
http://www.pref.miyagi.jp/kokusai/en/accidents_fukushima_nuclear.htm,
<http://www.mhlw.go.jp/english/topics/2011eq/index.html> und
<http://www.jfa.maff.go.jp/e/inspection/index.html>.

Zusammenfassende Darstellungen (in Japanisch) der Ergebnisse der Messungen von Nahrungsmitteln wurden Ende Juli 2011 publiziert und sind unter

Fehler! Hyperlink-Referenz ungültig. www.mhlw.go.jp/stf/houdou/2r9852000001d4y4-att/2r9852000001d501.xls
<http://www.mhlw.go.jp/stf/houdou/2r9852000001e050-att/2r9852000001e092.xls>
<http://www.mhlw.go.jp/stf/houdou/2r9852000001e1k4-att/2r9852000001e1o6.xls>
<http://www.mhlw.go.jp/stf/houdou/2r9852000001e0dk-att/2r9852000001e0hm.xls>
<http://www.mhlw.go.jp/stf/houdou/2r9852000001e0hu-att/2r9852000001e0lw.xls>
<http://www.mhlw.go.jp/stf/houdou/2r9852000001e0uo-att/2r9852000001e0yq.xls>
<http://www.mhlw.go.jp/stf/houdou/2r9852000001e1fu-att/2r9852000001e1jw.xls>

<http://www.mhlw.go.jp/stf/houdou/2r9852000001e0m4-att/2r9852000001e0q6.xls>
<http://www.mhlw.go.jp/stf/houdou/2r9852000001e09a-att/2r9852000001e0dc.xls>
<http://www.mhlw.go.jp/stf/houdou/2r9852000001e0qe-att/2r9852000001e0ug.xls>
<http://www.mhlw.go.jp/stf/houdou/2r9852000001e133-att/2r9852000001e175.xls>
zu finden.

Ende Juli 2011 wurden die japanischen Ausbreitungsrechnungen in Japanisch publiziert unter <http://www.nisa.meti.go.jp/earthquake/speedi/230724/230724.html>.

2 Auslösende Ereignisse und Unfallablauf

Auslösendes Ereignis des Unfalls im Kernkraftwerk Fukushima Dai-ichi war nicht das Erdbeben der Stärke 9,0, das sich am 11.3.2011 14:46 vor Tohoku vor der japanischen Ostküste ereignete. Die Kernreaktoren in den Kraftwerken Onagawa, Fukushima Dai-ichi, Fukushima Daini und Tokai wurden automatisch abgeschaltet und blieben weitgehend unbeschädigt. Jedoch brach die Stromversorgung in Nordjapan als Folge des Erdbebens zusammen, sodass die Kraftwerke über Notstromdiesel mit elektrischer Energie versorgt werden mussten. Ca. 1 Stunde nach dem Erdbeben verwüstete ein 7 m – 15 m hoher Tsunami die japanische Ostküste mit verheerenden Konsequenzen. Nach der Zählung vom 24.4.2011 gab es mehr als 28.000 Tote und Vermisste in Nordjapan als Folge des Erdbebens und des Tsunamis. In der Präfektur Miyagi wurden 8.644 Tote, in der Präfektur Iwate 4.148 Tote und in der Präfektur Fukushima 1.439 Tote gezählt. 380.000 Menschen mussten anfangs als Evakuierte leben.

Aufgrund örtlich unterschiedlicher Höhe des Tsunamis und unterschiedlicher Auslegung der Kraftwerke überstanden die Kernreaktoren in den Kraftwerken Onagawa, Fukushima Daini und Tokai den Tsunami weitgehend unbeschadet. In Fukushima Dai-ichi, einem Kraftwerk mit 6 Siedewasserreaktoren, das nur gegen 5,7 m hohe Tsunamis ausgelegt war, führte der Tsunami zur Überflutung bzw. Zerstörung der Dieselgeneratoren, der Service-Wasser-Gebäude und der Meerwasser-Einlassbauwerke und damit zu einem totalen Stromausfall mit der Folge, dass die Kühlung der Reaktorkerne nicht mehr gewährleistet war.

Der weitere Ablauf der Ereignisse war weitgehend zwangsläufig. Mit dem Ausfall der Kühlung im Reaktordruckbehälter kam es zum Verdampfen von Kühlwasser und zum Abblasen von Dampf in die Kondensationskammer. Da eine Rückführung von Wasser in den Reaktordruckbehälter nicht möglich war, fielen die Brennelemente trocken und begannen zu schmelzen. Mit Erreichen von ca. 850 °C setzte die exotherme Zr-Wasser Reaktion ($Zr + 2 \cdot H_2O \rightarrow ZrO_2 + 2 \cdot H_2$) ein, verbunden mit der Erzeugung großer Mengen an Wasserstoff, der zusammen mit dem Wasserdampf und den Spaltprodukten aus den zerstörten Brennelementen in die Kondensationskammer des Sicherheitsbehälters gelangte. Nach dem es wegen fehlender Wärmeabfuhr zum Sieden des Wassers in der Kondensationskammer kam, stieg der Druck im Sicherheitsbehälter über den Auslegungsdruck an und machte in den Blöcken 1 – 3 Druckentlastungen (Venting) erforderlich. Beim Abblasen des Überdrucks aus dem Sicherheitsbehälter in das Gebäude auf der obersten Serviceebene kam es im Block 1 am 12.3.2011 um 15:36 zu einer Wasserstoffexplosion, die das Dach des Reaktors zerstörte und radioaktive Stoffe freisetzte. Am 14.3.2011 11:00 zerstörte eine Wasserstoffexplosion das Gebäude von Block 3. Am 15.3.2011 um 6:10 kam es in Block 2 zu einer Wasserstoffexplosion, die allerdings das Gebäude weitgehend unversehrt ließ.

Ebenfalls am 15.3.2011 kam es vormittags erst zu einer Explosion und später zu einem Brand in Block 4, einem Reaktor, der – wie auch die Blöcke 5 und 6 – zum Zeitpunkt von Erdbeben

und Tsunami routinemäßig zur Wartung abgeschaltet war und dessen Reaktorkern sich nicht im Reaktordruckbehälter sondern im Brennelementlagerbecken befand. Anfängliche Befürchtungen, dass das Brennelementlagerbecken trocken gefallen sei und die Explosion ausgelöst haben könnte, erwiesen sich als nicht richtig. Wahrscheinlich wurde Block 4 durch die Explosion von Wasserstoff zerstört, der über Leitungssysteme aus Block 3 in das Gebäude von Block 4 gelangt war.

Zusammenfassende Darstellungen und Analysen des Unfallablaufs sowie der vermutete Zustand der Reaktorkerne und die wahrscheinlichen Schäden an den Reaktordruck- und Sicherheitsbehältern sind an verschiedenen Stellen zu finden; z.B. (www.grs.de, <http://www.nisa.meti.go.jp/english/>).

3 Freisetzungen und Ausbreitung radioaktiver Stoffe

Die mit den Druckentlastungen und Explosionen einhergehenden Freisetzungen radioaktiver Stoffe führten auf dem Anlagengelände bis zum 17.3.2011 zu ausgeprägten Maxima der Ortsdosisleistungen (www.grs.de). Danach gab es keine spektakulären Freisetzungen in die Atmosphäre, obwohl lokale Maxima der Ortsdosisleistungen bis zum 23.3.2011 zu verzeichnen sind. Seit Ende März 2011 sind die Ortsdosisleistungen auf der Anlage kontinuierlich gesunken.

Der Quellterm der Freisetzungen war zu diesem Zeitpunkt nicht bekannt und konnte auch angesichts der unklaren zukünftigen Entwicklung der Anlage kaum abgeschätzt werden. Ohne sinnvolle Annahmen eines Quellterms konnten kaum seriöse Schätzungen der potentiellen Strahlenexpositionen für die Bevölkerung in der näheren und weiteren Umgebung der Anlage abgegeben werden. Daher konzentrierte sich die Beurteilung der Lage auf die zu erwartete atmosphärische Verfrachtung der freigesetzten radioaktiven Stoffe. Es hing alles von der Entwicklung des Wetters ab. Ausbreitungsrechnungen konnten zwar die zu erwartenden Trajektorien und Verdünnungen bestimmen, jedoch keine lokalen Aktivitätskonzentrationen für die Luftmassen über Japan.

Glücklicher Weise überwiegen im Frühjahr aufgrund des Ostasiatischen Hochs in Nordjapan Winde aus westlicher Richtung, die den überwiegenden Teil der freigesetzten radioaktiven Stoffe auf den Pazifik verfrachteten. Am 15.3.2011 transportierten jedoch Winde in nordwestlicher Richtung radioaktive Stoffe auf die japanische Hauptinsel und es kam aufgrund lokaler Niederschläge zu beträchtlichen Kontaminationen bis in Entfernungen von 100 km. Ebenfalls am 15.3.2011 und später noch einmal am 20.3.2011 wurden freigesetzte radioaktive Stoffe Richtung Süden transportiert und erreichten den Großraum Tokyo. Jedoch zeigten die Zeitreihen der Ortsdosisleistungen aus (von Süd nach Nord) Tokyo, Chiba, Tochigi und Ibaraki (<http://www.bousai.ne.jp/eng/>), dass durch den Durchzug der radioaktiven Wolken Notfallmaßnahmen in diesen Präfekturen nicht erforderlich waren und die Strahlenexpositionen moderat bleiben würden. Die Veränderungen der Ortsdosisleistungen aufgrund des Fallouts von IOD-131, Caesium-134 und Caesium-137 nach Durchzug der radioaktiven Wolken zeigten ebenfalls, dass der Fallout keine Größenordnungen erreicht hatte, die langfristige Maßnahmen, z.B. Evakuierungen, erforderlich machen würden.

Große Befürchtungen bestanden in Deutschland, dass kontaminierte Luftmassen global verteilt würden und damit zu radiologischen Auswirkungen in Deutschland führen könnten. Obwohl dies nach wissenschaftlicher Einschätzung kein Problem darstellte, waren die Spurenmessungen des CTBTO-Netzwerks (<http://www.ctbto.org/press-centre/highlights/2011/fukushima-related-measurements-by-the-ctbto/fukushima-related->

[measurements-by-the-ctbto-page-1/](#)) und der Spurenmessstellen in Deutschland (http://www.ptb.de/de/org/6/_index.htm, <http://www.bfs.de/bfs>) sehr hilfreich, da sie den unwiderleglichen Beweis lieferten, dass die globale Kontamination in Deutschland lediglich zu Aktivitätskonzentrationen der Luft führte, die im Maximum um den Faktor 10.000 unter den Konzentrationen lagen, die 1986 als Folge des Unfalls von Tschernobyl gemessen worden waren und damit radiologisch nicht relevant waren.

Offen blieb bis zum 16.3.2011 die Frage nach der radiologischen Situation in der näheren Umgebung von Fukushima Dai-ichi. Noch am 12.3.2011 wurde die Evakuierung von 80.000 Menschen aus dem 20 km Umkreis um das Kernkraftwerk angeordnet. Am gleichen Tag wurde für Bewohner im Abstand zwischen 20 km und 30 km „Aufenthalt im Haus“ angeordnet und am 15.3.2011 wurde ihnen empfohlen „should consider leaving“. Diese Anordnungen waren im Einklang mit den in der EU gültigen und von der ICRP empfohlenen Dosiskriterien für Notfallmaßnahmen bei einem kerntechnischen Unfall.

Erste Informationen über das Ausmaß der Kontaminationen außerhalb des 20 km Umkreises wurden erst am 16.3.2011 verfügbar, als durch das japanische Ministerium für Erziehung, Kultur, Sport, Wissenschaft und Technologie, kurz MEXT, Ortsdosisleistungsmessungen von mobilen Messstationen publiziert wurden. Diese Informationen werden seitdem mehrmals täglich aktualisiert (<http://www.mext.go.jp/english/incident/1303962.htm>). Zu diesem Zeitpunkt lagen nur spärliche Informationen über die Zusammensetzung des Fallouts vor, sodass verlässliche Abschätzungen der zu erwartenden Strahlenexpositionen weder für die Schilddrüsendosen durch IOD-131 noch für die externe Strahlenexpositionen durch langlebige Radionuklide abgegeben werden konnten.

Man musste auf das Abklingen der Ortsdosis warten, um die Anteile der verschiedenen Radionuklide abschätzen zu können. Dabei konnte man die Faustregel benutzen, dass ein Fallout von Caesium-137 (oder IOD-131) von 1 MBq/m² eine Ortsdosisleistung in 1 m Höhe über dem Boden von etwa 2 µSv/h verursacht. Wenn man sich dann daran erinnerte, dass nach dem Unfall von Tschernobyl in der Sowjetunion und ihren Nachfolgestaaten Gebiete mit Caesium-137 Kontaminationen oberhalb von 0,555 MBq/m² langfristig evakuiert und umgesiedelt wurden, konnte man erwarten, dass in Gebieten, in denen die Ortsdosisleistungen langfristig oberhalb von 1 µSv/h verbleiben würden, ähnliche Maßnahmen erforderlich werden würden. Es stellte sich dabei relativ früh heraus, dass im Nordwesten auch außerhalb der 30 km Zone derart hohe Ortsdosisleistungen in den Gemeinden Iitate, Kawamata und teilweise in der Stadt Fukushima auftraten, die inzwischen zu weiteren Evakuierungs- bzw. Sanierungsmaßnahmen geführt haben.

Einen verlässlichen Überblick über die Falloutsituation in der Umgebung von Fukushima Dai-ichi ergaben dann Messflüge, die seit 17.3.2011 in Zusammenarbeit von MEXT und DOE in der Umgebung durchgeführt wurden (<http://www.mext.go.jp/english/incident/1303962.htm>). Messungen der Ortsdosisleistung in Verbindung mit Aerogammamessungen und Laboranalysen von Bodenproben erlaubten eine detaillierte Kartierung zuerst der Ortsdosisleistungen und dann der Kontaminationen mit Caesium-134 und Caesium-137. Das Aktivitätsverhältnis von Caesium-134 und Caesium-137 ist in den Freisetzen etwa 1. Mit diesen Daten war es möglich, die im ersten Jahr erwartete externe Strahlenexposition als Folge des Unfalls abzuschätzen. Ziel der japanischen Behörden ist es, die externe Strahlenexposition der Bevölkerung im ersten Jahr auf 20 mSv zu begrenzen.

Nur wenige Analysen von Strontium- und Plutonium Isotopen wurden in der frühen Phase bekannt (<http://www.tepco.co.jp/en/index-e.html>). Sie bestätigten aber das, was für diesen

Reaktortyp angesichts des Unfallablaufs zu erwarten war, dass nämlich weder Sr- noch Pu-Isotope in nennenswertem, d.h. dosisrelevantem Umfang freigesetzt worden sind.

4 Allgemeines zur Strahlenbelastung durch den Unfall im Kernkraftwerk Fukushima Dai-ichi

Durch den Unfall im Kernkraftwerk Fukushima Dai-ichi wurden radioaktive Stoffe in die Atmosphäre und den Pazifik freigesetzt. Aufgrund der Wetterlage im März 2011 wurde die überwiegende Aktivität in der Atmosphäre mit dem Wind auf den Pazifik hinausgetragen. Kurz nach dem Unfall wurde jedoch auch Radioaktivität erst nach Nordwesten Richtung Fukushima verfrachtet. Da es dort in dieser Zeit regnete und auch schneite, wurden großen Mengen der Aktivität aus der Atmosphäre ausgewaschen und am Boden abgelagert. Dabei wurden auch Pflanzenoberflächen stark kontaminiert. Später verfrachteten dann Winde aus nordöstlicher Richtung auch Radioaktivität in die Präfekturen südlich von Fukushima und bis nach Tokyo. Sowohl die Konzentrationen der Radionuklide als auch der Fallout war dort sehr viel geringer. Durch Fallout wurde auch das Oberflächenwasser in Nordjapan kontaminiert und Radionuklide gelangten in das Trinkwasser.

Bei der Strahlenexposition unterscheidet man die externe und die interne Strahlenexposition. Die externe Strahlenexposition geht ganz überwiegend von Gamma-Strahlung aus, die beim Zerfall der Radionuklide ausgesandt wird. Äußere Bestrahlung mit Beta-Strahlung bewirkt lediglich eine Hautdosis, die unter den Kontaminationsbedingungen des Unfalls von Fukushima Dai-ichi aber vernachlässigbar ist. Alpha-Strahlung gelangt nicht durch die äußeren toten Hautschichten und trägt deshalb nicht zur externen Strahlenexposition bei.

Die interne Strahlenexposition entsteht durch Inhalation radioaktiv kontaminierter Luft und durch Verzehr von kontaminierten Lebensmitteln, d.h. Trinkwasser und pflanzlichen und tierischen Nahrungsmitteln. Dabei werden die Radionuklide entsprechend den chemischen Eigenschaften ihrer Elemente verstoffwechselt, in die verschiedenen Gewebe und Organe transportiert, unterschiedlich lange gespeichert und schlussendlich zerfallen sie oder werden ausgeschieden.

Beim Durchzug einer radioaktiven Wolke wird der Mensch einer internen Strahlenexposition dadurch ausgesetzt, da er radioaktiv kontaminierte Luft einatmet, und einer externen Strahlenexposition, da ihn die Beta- und Gamma-Strahlung aus der Wolke direkt trifft.

Nach Durchzug der Wolke wird eine externe Strahlenexposition durch die Gamma-Strahlung der am Boden abgelagerten Radionuklide verursacht und eine interne Strahlenexposition wird durch den Verzehr kontaminierter Lebensmittel bewirkt. Bei der internen Strahlenexposition müssen alle drei Strahlungsarten, Alpha-, Beta- und Gamma-Strahlung, berücksichtigt werden.

Bei dem Unfall im Kernkraftwerk Fukushima Dai-ichi sind die wesentlichen Radionuklide, die im Hinblick auf die Strahlenexposition zu betrachten sind: Iod-131, Cäsium-134 und Caesium-137. Es sind nur so geringe Aktivitäten von Strontium-89, Strontium-90 und Plutonium-Isotopen freigesetzt worden, dass diese auch in der näheren Umgebung, obwohl messbar, nicht dosisrelevant sind und daher hier nicht näher betrachtet werden müssen.

Die drei relevanten Radionuklide haben ganz unterschiedliche Halbwertszeiten: 8 Tage für Iod-131, 2,1 Jahre für Cäsium-134 und 30 Jahre für Caesium-137. In der Frühphase nach einem Unfall ist Iod-131 von besonderer Bedeutung, da es durch Inhalation oder Verzehr kon-

taminierter Lebensmittel zu hohen Schilddrüsendosen führen kann. Langfristig sind die Radionuklide Cäsium-134 und vor allem Cäsium-137 dosisrelevant. Ende Juli 2011 ist das Jod-131 zerfallen und bewirkt bei Reisen nach Japan keine Strahlenexposition mehr; nur Cäsium-134 und Cäsium-137 sind noch zu betrachten.

Beide Radionuklide, Cäsium-134 und Cäsium-137 zerfallen durch Beta-Zerfall und senden dabei auch Gamma-Strahlung aus. Somit bewirken sie auf kontaminierten Flächen eine externe Strahlenexposition.

Cäsium ist gut wasserlöslich und wird vom menschlichen Organismus etwa so wie das essentielle Spurenelement Kalium aufgenommen und in allen feuchten Geweben verteilt. Es verlässt aufgrund seiner chemischen Eigenschaften den menschlichen (und tierischen) Körper aber wesentlich schneller als es die physikalischen Halbwertszeiten der Radionuklide Cäsium-134 und Caesium-137 erwarten lassen. Die biologische Halbwertszeit beträgt für den Menschen nur etwa 100 Tage. Das heißt, die interne Strahlenexposition durch radioaktives Cäsium ist nur von begrenzter Dauer und nicht „fürs Leben“. Bei Strontium-90 und Plutonium ist dieses anders, aber damit haben wir es im Fall des Unfalls von Fukushima Dai-ichi nicht zu tun.

5 Kontamination von Lebensmitteln

Durch trockene und nasse Deposition wurden Lebensmittel in Nordjapan kontaminiert. Die Daten der Überwachung von Trinkwasser und Nahrungsmitteln sind unter (<http://www.mhlw.go.jp/english/topics/2011eq/index.html>) abzurufen. Die japanische Regierung etablierte ein System provisorischer Grenzwerte für radioaktive Stoffe in Lebensmitteln, das auf Empfehlung durch die Strahlenschutzkommission (SSK) auch von der EU übernommen wurde.

Anfänglich stellte die Kontamination von Leitungswasser ein öffentlich stark wahrgenommenes Problem dar, nachdem am 22.3.2011 in 5 Proben von Leitungswasser in Fukushima Aktivitätskonzentrationen von IOD-131 oberhalb des Grenzwertes für Wasser zu Bereitung von Säuglingsnahrung von 100 Bq/L festgestellt wurden. Die Werte lagen zwischen 120 Bq/L und 220 Bq/L. Da Japan ca. 88 % des Wasserbedarfs von etwa 83.5 Milliarden m³ pro Jahr aus Flüssen, Seen und Marschland entnimmt und nur 13 % Grundwasser entstammen, waren die Trinkwasservorkommen besonders für Kontaminationen anfällig. Das Problem blieb aber auf wenige Präfekturen beschränkt, in denen Warnungen zur Nutzung des Leitungswassers zur Herstellung von Säuglingsnahrung ausgesprochen wurden, die aber Ende März 2011 aufgehoben werden konnten.

Bei der Kontamination von Nahrungsmitteln sind bei einem Fallout in der ersten Vegetationsperiode bei Blattgemüse die höchsten Kontaminationen zu erwarten. Dem entsprechend wurden von Tokyo nach Norden bis in die Präfektur Miyagi im März 2011 hohe Kontaminationen von Blattgemüsen mit IOD-131, Caesium-137 und Caesium-134 festgestellt. Mit einem System von Vermarktungsverböten und Empfehlungen, bestimmte Blattgemüse nicht zu verzehren, antworteten die japanischen Behörden auf diese Situation. Es ist derzeit nicht bekannt, ob in den betroffenen Präfekturen nicht kontaminierte Gemüse aus anderen Regionen angeboten wurden und ob die Einhaltung der Empfehlungen der Regierung kontrolliert wurde.

Anfang Mai 2011 waren die IOD-131 Kontaminationen von Feldfrüchten bereits nicht mehr relevant und auch für die Kontamination mit Cs-Isotopen ist eine rapide Abnahme in den Folgemonaten zu erwarten. Für die Ernte von Tee bleiben die Cs-Isotope im Jahr 2011 ein Problem. Es ist damit zu rechnen, dass im Jahr 2012 die Kontamination von Nahrungsmitteln eine

wesentlich geringere Rolle spielen wird, da dann nur noch die Aufnahme über den Wurzelfad und nicht die direkte Beaufschlagung oberirdischer Pflanzenteile relevant sein wird.

6 Freisetzungen in den Pazifik

Bereits eine Woche nach dem Unfall wurde festgestellt, dass hoch kontaminiertes Wasser aus den zerstörten Reaktoren in Meer gelangte. Direkt vor der Anlage in Fukushima Dai-ichi wurden Mitte April 2011 Spitzenkonzentrationen von 100 MBq/m^3 für IOD-131 und Caesium-137 festgestellt. Der Betreiber TEPCO hat sich in der Folgezeit bemüht, durch Ableitung schwächer kontaminierten Wassers in den Pazifik Raum zur Speicherung der hoch kontaminierten Wässer zu schaffen. Diese Maßnahmen waren weitgehend erfolgreich, sodass Ende April die Grenzwerte für Meerwasser wieder erreicht wurden. Das zuständige Ministerium MEXT organisierte eine großräumige Überwachung der Meeresaktivität und es erwies sich schnell, dass in einigen Kilometern Umkreis um die Einleitungsstelle aufgrund der hohen Verdünnung die Konzentrationen zwar noch hoch aber nicht Besorgnis erregend waren. Seit Ende April lagen die Konzentrationen dort unter den provisorischen japanischen Grenzwerten für Trinkwasser.

Die ins Meer durch direkte Einleitung oder durch atmosphärischen Fallout freigesetzten radioaktiven Stoffe werden im Pazifik nach Norden und Osten transportiert, gelangen in den nordpazifischen Strömungszyklus, der sie an die kanadische und amerikanische Westküste und dann nördlich des Äquators wieder nach Westen transportieren wird. Es ist damit rechnen, dass auch hier langfristig eine messbare, nahezu globale Verteilung eintreten wird, die aber radiologisch nicht relevant sein wird.

Durch die Kontamination des Meerwassers wurden auch Meerestiere kontaminiert. Bis Ende März 2011 wurden Cäsium-Isotope nur dreimal, mit Werten von 3 bis 8,1 nachgewiesen. IOD-131 wurde viermal, mit Werten zwischen 13 und 35 Bq/kg nachgewiesen; in zwei Süßwasserfischproben wurden Werte von 6,3 und 13 Bq/kg für IOD-131 gemessen. Für den Zeitraum 1. bis 4. April 2011 wurden Aktivitätswerte von 28 Fischproben aus dem küstennahen Meer berichtet. Diese Proben wiesen erhöhte Werte für Cäsium-Isotope auf, im Bereich von 10 bis 526 Bq/kg. Dazugehörige Werte von IOD-131 lagen im Bereich von 10 bis 4080 Bq/kg. Die höchsten Werte wurden im Japanischen Sandaal (*Ammodytes personatus*) gefunden. Die in Japan geltenden Grenzwerte wurden einige Male überschritten. Die japanische Regierung reagierte mit entsprechenden Vermarktungsverböten. Der aktuelle Stand kann bei der japanischen Fisheries Agency (FA) abgerufen werden (<http://www.jfa.maff.go.jp/e/inspection/index.html>). Detaillierte Modellrechnungen zu der aus dem Verzehr kontaminierten Fisches resultierenden Strahlenexposition sind unter http://www.vti.bund.de/de/startseite/startseite/faq-japan.html#h2_3 zu finden.

7 Quellterm und externe Strahlenexposition im ersten Jahr

Erste Abschätzungen des Quellterms und des Nuklidvektors der Freisetzungen wurden bereits am 17.3.2011 von IRSN publiziert (www.irsn.fr). Spätere Abschätzungen durch NISA und NSC vom 12.4.2011 (<http://www.nisa.meti.go.jp/english/>) stimmen mit diesem innerhalb eines Faktors zwei überein. Nach den Berechnungen des IRSN betragen die atmosphärischen Freisetzungen für Xe-133 $2 \text{ E}18 \text{ Bq}$, für IOD-131 $9 \text{ E}16 \text{ Bq}$, für Caesium-134 und Caesium-137 je $1 \text{ E}16 \text{ Bq}$. Die Freisetzungen aus dem Unfall von Fukushima sind damit deutlich niedriger als die aus dem Unfall von Tschernobyl mit $1,8 \text{ E}18 \text{ Bq}$ für IOD-131, $4,7 \text{ E}16 \text{ Bq}$ für Caesium-134 und $8,5 \text{ E}16$ für Caesium-137. Die direkten Ableitungen aus Fukushima Dai-ichi in den Pazifik lagen mit Freisetzung ins Meer von $2,8 \text{ E}15 \text{ Bq}$ für IOD-131 und $9,4 \text{ E}14$

Bq jeweils für Caesium-134 und Caesium-137 deutlich unter den atmosphärischen Freisetzungen (TEPCO, 21.4.2011).

Mit dem Quellterm, dem Nuklidvektor und den aktuellen Wetterdaten publizierte IRSN Dosis-schätzungen für die Schilddrüsendosis und die effektive Dosis von Kleinkindern als Konsequenz der Ausbreitung der radioaktiven Wolken über Japan (www.irsn.fr). Danach sind für den Großraum Tokyo Schilddrüsendosen unter 1 mSv, für die Präfektur Ibaraki unter 10 mSv zu erwarten. Die effektiven Dosen sollten nach diesen Rechnungen in Tokyo unter 0,1 mSv und in Ibaraki unter 1 mSv liegen.

Für die nähere Umgebung in der Präfektur Fukushima sind derartige Abschätzungen der Schilddrüsendosis wegen der kleinräumigen Variabilität des Fallouts nicht belastbar. Jedoch konnten mit Hilfe des Nuklidvektors und den Kartierungen der Ortsdosisleistungen im Umkreis von ca. 100 km Karten der im ersten Jahr erwarteten externen Strahlenexposition hergestellt werden, die als Grundlage für Evakuierungs- und Sanierungsmaßnahmen mit dem Ziel der Einhaltung eines Dosiskriteriums von 20 mSv im ersten Jahr dienen können. Danach erstreckt sich der hoch kontaminierte Bereich von Fukushima Dai-ichi nach Nordwesten über den 30km Umkreis hinaus über die Gemeinden Itate und Kawamata bis in Teile der Stadt Fukushima. Die tatsächliche Strahlenexposition der Menschen in diesen Gebieten wird entscheidend davon abhängen, welche zusätzlichen Maßnahmen der Optimierung des Schutzes von den japanischen Behörden angeordnet und durchgesetzt werden.

Bzgl. der Schilddrüsendosis von Kindern in diesen Gebieten liegen nur beschränkte Informationen vor. Nach Angaben von NISA wurden zwischen dem 28. und 30.3.2011 Messungen der Ortsdosisleistung im Kontakt zur Schilddrüse an 946 Kindern aus der Stadt Kawamata durchgeführt. Dabei wurden keine erhöhten Ortsdosisleistungen gemessen, was auf weniger als 25 mSv Schilddrüsendosis schließen ließ. Allerdings ist unklar, ob bei dieser Rechnung berücksichtigt wurde, dass zum Zeitpunkt der Messungen bereits 2 Halbwertszeiten des IOD-131 verstrichen waren. Daher kann aus diesen Berichten nur eine Obergrenze der Schilddrüsendosen bei Kindern von 100 mSv abgeleitet werden. Für die zukünftige Beurteilung möglicher Folgeerkrankungen wird es extrem wichtig sein, ob die japanischen Behörden eine hinreichende messtechnische Dokumentation der Strahlenexposition in den ersten Tagen nach dem Unfall realisieren könne.

Insgesamt kann man das derzeitige Schutzziel der Japaner so zusammenfassen, dass die externe Strahlenexposition in den hoch kontaminierten Gebieten im ersten Jahr auf 20 mSv und die interne Strahlenexposition durch Ingestion landesweit auf 1 mSv begrenzen werden soll. Dies ist im Einklang mit internationalen Empfehlungen und Regelwerken.

8 Vorläufige radiologische Bilanz

8.1 Kategorisierung von Expositionssituationen

Nach der Empfehlung 103 der International Commission on Radiological Protection (ICRP) unterscheidet man drei Kategorien von Expositionssituationen: geplante, existierende und Notfallsituationen.

- **Geplante Expositionssituationen** sind Situationen, die den geplanten Betrieb von Strahlenquellen einschließlich der Stilllegung, der Beseitigung von radioaktivem Abfall und der Sanierung zuvor belasteter Gebiete mit sich bringen.

- **Existierende Expositionssituationen** sind Situationen, die bereits bestehen, wenn eine Entscheidung über ihre Kontrolle getroffen werden muss.
- **Notfall-Expositionssituationen** sind Situationen verbunden mit Notfällen, die während Tätigkeiten oder Arbeiten auftreten oder sich daraus entwickeln können, und Sofort- oder Notfallmaßnahmen erfordern.

Bei geplanten Situationen, wie z.B. dem bestimmungsgemäßen Betrieb kerntechnischer Anlagen, erfolgt die Dosisbegrenzung über Grenzwerte und Richtwerte (constraints), die einzuhalten sind.

In existierenden und Notfall-Situationen kann die Einhaltung von Grenzwerten nicht möglich sein. Daher empfiehlt die ICRP für solche Situationen die Anwendung eines Systems von Referenzwerten. Für Notfallsituationen empfiehlt die ICRP Referenzwerte in einem Bereich zwischen 20 mSv pro Jahr und 100 mSv pro Jahr, für existierende Situationen einen Bereich der Referenzwerte zwischen 1 mSv pro Jahr und 20 mSv pro Jahr.

Ein Referenzwert gibt bei Notfallexpositionen oder bestehenden kontrollierbaren Expositionssituationen den Dosis- oder Risikowert an, bei dessen Überschreitung Expositionen als unangemessen betrachtet werden und bei dessen Unterschreitung eine Optimierung des Schutzes durchgeführt werden soll. Der genaue Zahlenwert, der als Referenzwert gewählt wird, hängt von den jeweiligen Umständen der betrachteten Exposition ab.

Die Feststellung einer Notfallsituation hängt davon ab, ob Notfallmaßnahmen, wie Evakuierung, Sheltering, Einnahme von Iod-Tabletten, erforderlich sind. Notfallmaßnahmen werden auf der Grundlage von Dosiskriterien der erwarteten Dosis für externe und interne Exposition für notwendig erachtet.

Als Dosiskriterien für Notfallmaßnahmen gelten:

Sheltering (Verbleiben im Haus)

- erwartete externe Dosis: 10 mSv - 50 mSv
- erwartete interne effektive Dosis: 100 mSv - 500 mSv
- erwartete Schilddrüsendosis bei Kindern: 100 mSv - 500 mSv

Evakuierung

- erwartete externe Dosis: mehr als 50 mSv
- erwartete interne effektive Dosis: mehr als 500 mSv
- erwartete Schilddrüsendosis bei Kindern: mehr als 500 mSv.

Sind keine Notfall- oder Sofortmaßnahmen erforderlich ist eine Expositionssituation als existierende Situation zu behandeln. Mit dem System der Referenzwerte der erwarteten effektiven Dosis von

- 20 mSv - 100 mSv in Notfallsituationen und
- 1 mSv - 20 mSv in existierenden Situationen

betont die ICRP die Bedeutung der Optimierung des Strahlenschutzes, d.h. der Minimierung der Strahlenexposition so niedrig wie sinnvoller Weise unter Berücksichtigung aller Umstände des Einzelfalls und sozialer und ökonomischer Aspekte möglich (ALARA as low as reasonably achievable). Als langfristiges Ziel der Optimierung sieht die ICRP einen Referenzwert von 1 mSv im Jahr für erstrebenswert an.

8.2 Unfallphasen

Bei einem Reaktorunfall oder –störfall sind – falls das Ereignis in der Vegetationsperiode stattfindet - 4 Phasen zu unterscheiden, die unterschiedliche Beurteilungen und Reaktionen erfordern:

1. die akute Phase mit dem Durchzug radioaktiver Wolken und Fallout

Die Strahlenexposition besteht aus einer externen Komponente durch Direktstrahlung aus der Wolke und einer internen Komponente durch Inhalation kontaminierter Luft. Beim Durchzug der Wolke kommt es zu Fallout von Radionukliden auf den Boden. Bei Niederschlag (Regen, Tau, Schnee, ...) ist der Fallout wesentlich intensiver als beim trockenen Durchzug der Wolke.

Die wichtigsten Radionuklide in dieser Phase sind die Iod-Radionuklide, vor allem Iod-131 mit 8 Tagen Halbwertszeit, die vor allem bei Kindern zu hohen Schilddrüsendosen und einem im späteren Leben erhöhten Risiko, an Schilddrüsenkrebs zu erkranken, führen.

Es ist prospektiv durch die Behörde zu prüfen, ob Dosiskriterien für Notfallmaßnahmen überschritten werden, und ggfs. sind Anordnungen der Behörde zu treffen, z.B. für die 30 km Zone, Evakuierung und Sheltering, Ausgabe und Einnahme von Jod-Tabletten.

2. die frühe Phase nach Durchzug der Wolken und nach Fallout

Die Strahlenexposition besteht aus einer externen Komponente durch Gammastrahlung der am Boden abgelagerten Radionuklide, vor allem Caesium-134 und Caesium-137, und einer internen Komponente durch den Verzehr von kontaminiertem Trinkwasser und Nahrungsmitteln. Inhalation von kontaminiertem Staub ist von geringerer Bedeutung.

Die zu wichtigsten zu betrachtenden Radionuklide sind Iod-131, Caesium-134, Caesium-137, Strontium-89, Sr-90 und die Plutonium-Radionuklide. Im Falle des Unfalls von Fukushima Dai-ichi können Strontium-89, Sr-90 und die Plutonium-Radionuklide vernachlässigt werden, da sie zum Einen in wesentlich geringerem Maße als die Iod- und Caesium-Radionuklide freigesetzt wurden und zum Zweiten außerhalb der evakuierten Zone nur in Spuren im Fallout nachzuweisen sind.

In der frühen Phase ist anhand von Messungen von Fallout, Lebensmitteln und Menschen durch die Behörde zu prüfen, ob die anhand von Vorhersagen der erwarteten Dosis angeordneten Maßnahmen sinnvoll waren, ob weitere Notfallmaßnahmen anzuordnen sind oder ob Notfallmaßnahmen aufgehoben werden können. Ggfs. sind Verbote von Vermarktung und Verzehr von Lebensmitteln auszusprechen und aufgrund des gemessenen Fallouts Evakuierungsmaßnahmen anpassen.

3. das erstes Jahr nach Abklingen Zerfall der kurzlebigen Radionuklide

Die Expositionssituation ist wenige Monate nach dem Unfall als existierende Situation anzusehen und Maßnahmen der Optimierung des Strahlenschutzes sollten im Vordergrund stehen. Notfallmaßnahmen über die bisher angeordneten hinaus sollten nicht mehr notwendig sein.

Falls der Unfall in eine Vegetationsperiode fällt, werden oberirdische Pflanzenteile, z.B. Gras, Reisstroh, Blattgemüse, ..., direkt durch den Fallout kontaminiert, was zu hohen Aktivitätskonzentrationen in Nahrungsmitteln wie Milch und Milchprodukten, Fleisch und Gemüse und Obst führt.

Generell leisten im ersten Jahr kurzlebige Radionuklide Beiträge zur externen und internen Strahlenexposition. Das Iod-131 zerfällt innerhalb der ersten 2 Monate auf Werte, die vernachlässigbar sind. Nach dem ersten Jahr sind nur noch Caesium-134, Caesium-137, Strontium-89, Sr-90 und die Plutonium-Radionuklide, in Fukushima Caesium-134 und Caesium-137, zu betrachten.

Die Strahlenexposition im ersten Jahr ist deutlich höher als in den Folgejahren. Die Verzehr- und Vermarktungsverbote für Nahrungsmittel müssen im ersten Jahr besonders streng sein, in den Folgejahren wird man sie deutlich lockern können. Generell sind Verbote von Vermarktung und Verzehr von Lebensmitteln und Evakuierungsmaßnahmen anzupassen.

Falls der Unfall oder Störfall außerhalb der Vegetationsperiode stattfindet, kann auf die Betrachtung der 3. Phase verzichtet werden und das erste Jahr zusammen mit der späten Phase betrachtet werden, da die direkte Beaufschlagung von Weidegras und oberirdischen Teilen von Gemüse entfällt.

4. die späte Phase

Die späte Phase ist grundsätzlich als existierende Situation anzusehen und entsprechend zu behandeln.

Auch in der späten Phase besteht die Strahlenexposition aus einer externen Komponente durch Gamma-Strahlung der am Boden abgelagerten Radionuklide, vor allem Caesium-134 und Caesium-137, und einer internen Komponente durch den Verzehr von kontaminiertem Trinkwasser und Nahrungsmitteln. Inhalation von kontaminiertem Staub bleibt von geringerer Bedeutung.

Die Aktivitätskonzentrationen in Weidegras und Gemüse werden im 2. Jahr deutlich niedriger liegen, da die Radionuklide nun nur noch über die Wurzeln aufgenommen werden müssen.

Aufgrund der geringeren Halbwertszeit des Caesium-134 von nur 2 Jahren, werden die Aktivitätskonzentrationen in den Umweltmedien sich in Fukushima in ca. 10 Jahren vom halbieren, wenn das Caesium-134 zerfallen ist. Die gilt dann auch für die externe Strahlenexposition. Für die folgenden Jahrzehnte kann man konservativ annehmen, dass die Halbwertszeit des Caesium-137 von 30 Jahren die Abnahme der Strahlenexposition bestimmt.

Verbote von Vermarktung und Verzehr von Lebensmitteln sind der jeweiligen Situation anzupassen, Maßnahmen zur Minimierung der Strahlenexposition durchzuführen und der Bevölkerung Hinweise zur Hilfe zur Selbsthilfe, d.h. wie jeder Einzelne seine Strahlenexposition verringern kann, zu geben. Mögliche Modifizierungen der Evakuierung, ev. Resettlement, sollte erwogen und, wo möglich, durchgeführt werden. Ziel der Optimierung des Strahlenschutzes ist ein Referenzwert von 1 mSv pro Jahr.

8.3 Voraussetzungen für eine Bilanzierung der radiologischen Situation

Für eine Bilanzierung der radiologischen Situation wenige Monate nach dem Unfall müssen gewisse Voraussetzungen gegeben sein, insbesondere Kenntnisse zum Quellterm der Freisetzungen radioaktiver Stoffe, Messungen der Radioaktivität in allen relevanten Umweltmedien und möglichst auch Messungen an Menschen. Um auch Aussagen über die Strahlenexposition im ersten Jahr machen zu können, ist es eine Grundvoraussetzung, dass der Anlagenzustand stabil ist und keine weiteren massiven Freisetzungen radioaktiver Stoffe vorkommen.

Der Betreiber TEPCO der Anlage in Fukushima Dai-ichi arbeitet seit dem Unfall daran, die Anlage zuerst in einen stabilen, später in einen sicheren Zustand zu überführen. Dabei wird einer Road Map gefolgt, die eine Fülle von Gegenmaßnahmen beinhaltet. TEPCO und die japanische Regierung haben am 19.7.2011 den erfolgreichen Abschluss der ersten Stufe der Road Map angekündigt.

Die Stufe 1 beinhaltet u.a. die Herstellung einer stabilen Kühlung der drei geschmolzenen Reaktorkerne und aller Brennelementlagerbecken, die Einrichtung geschlossener Kühlkreisläufe für die Reaktorkerne und Brennelementlagerbecken, die Verhinderung weiterer Freisetzungen hoch radioaktiver Wässer in das Meer und die Verringerung der atmosphärischen Freisetzungen radioaktiver Stoffe.

Seit Juni 2011 sind nach Angaben der Betreiber die atmosphärischen Freisetzungen radioaktiver Stoffe auf etwa 1 GBq/h zurückgegangen; ein Wert der um etwa den Faktor 2 Millionen geringer ist als Mitte März 2011. Nach Modellrechnungen der Betreiber führen diese Freisetzungen am Rande der 30 km Zone zu zusätzlichen Strahlenexpositionen von einigen μSv pro Jahr und sind damit sehr gering gegenüber den durch den Unfall verursachten Strahlenexpositionen.

In Stufe 2 der Road Map ist es u.a. geplant innerhalb von 3 bis 6 Monaten sowohl eine sichere Kühlung der Reaktorkerne und Brennelementlagerbecken zu erreichen als auch die Freisetzungen radioaktiver Stoffe in die Atmosphäre und ins Meer zu minimieren.

Unter der Voraussetzung, dass diese Road Map eingehalten wird, kann auf der Grundlage der verfügbaren Daten folgende vorläufige Einschätzung der radiologischen Situation gegeben werden.

8.4 Radiologische Situation

8.4.1 Akute Phase

Für die **Präfektur Fukushima** bestand ein radiologischer Notfall. Die Behörden haben darauf mit der Anordnung von Evakuierung und Sheltering in der 30 km Zone reagiert. Dem Autor dieser Arbeit ist nicht bekannt, wo und wann Jod-Tabletten ausgegeben wurden und ob ihre

Einnahme angeordnet wurde. Die Notfallmaßnahmen stehen im Einklang mit den einschlägigen ICRP Empfehlungen.

Für die **anderen betroffenen Präfekturen** war es prospektiv unklar, ob Notfallmaßnahmen erforderlich sein würden. Dies lag an Unklarheit über den weiteren Unfallablauf und war in höchstem Maße abhängig von der Entwicklung des Wetters. Retrospektiv kann man feststellen, dass in den anderen Präfekturen kein Notfall vorlag. Dabei waren außer der Präfektur Fukushima folgende Präfekturen in Nordjapan betroffen: Miyagi, Tochigi, Ibaraki, Gunma, Chiba, Tokyo, Satama und Kanagawa. In diesen Präfekturen können die Unfallfolgen als existierende Situation behandelt werden.

externe Strahlenexposition:

Für die **Präfektur Fukushima** ist die Evaluierung noch nicht abgeschlossen. Mangels direkter Messungen muss hier auf Ausbreitungsrechnungen zurückgegriffen werden und Dosisrekonstruktionen vorgenommen werden.

In den **anderen betroffenen Präfekturen** zeigten die Ortsdosisleistungen nach kurzzeitigen Maxima bis etwa $1 \mu\text{Sv/h}$ um den 15.3.2011 und bis $0,5 \mu\text{Sv/h}$ um den 20.3.2011 kontinuierlicher Abfall auf Werte unter $0,1 \mu\text{Sv/h}$ im Juni 2011. Die höchsten Werte wurden in Ibaraki gemessen.

interne Strahlenexposition:

In der **Präfektur Fukushima** ist die Evaluierung der internen Strahlenexposition mangels weitgehenden Fehlens direkter Messungen noch nicht abgeschlossen. Es existieren Berichte über Messung der Schilddrüsendosis von Kindern mit Ortsdosisleistungsmessgeräten, nach denen Schilddrüsendosen von 100 mSv nicht überschritten wurden. Jedoch auch hier muss auf Ausbreitungsrechnungen zurückgegriffen werden und Dosisrekonstruktionen vorgenommen werden.

Für die weiter entfernten, **anderen betroffenen Präfekturen** kann auf Modellierungen des französischen IRSN zurückgegriffen werden und pauschal die Schilddrüsendosen von Kleinkindern mit kleiner 10 mSv und die effektive Dosis von Kleinkindern mit kleiner 1 mSv abgeschätzt werden. Die Evaluationen sind jedoch auch hier noch nicht abgeschlossen.

8.4.2 Frühe Phase nach Durchzug der Wolke und nach Fallout

In den ersten Tagen lagen neben den Daten der Ortsdosisleistungen in den anderen betroffenen Präfekturen Messungen von mobilen Messstationen aus der näheren Umgebung der 30 km in der Präfektur Fukushima vor. Die Ortsdosisleistungen waren zu dieser Zeit noch von IOD-131, Caesium-134, Caesium-137 und anderen kurzlebigen Radionukliden beeinflusst und vielen ab Ende März kontinuierlich ab, sodass nur grobe Schätzungen des Fallouts langlebiger Caesium-Radionuklide möglich waren.

Erst spätere umfangreiche Messungen durch MEXT und DOE, insbesondere mittels Aero-Gamma-Spektrometrie, erlaubten zuverlässige Einschätzungen der Ortsdosisleistungen, der im ersten Jahr zu erwartenden externen Strahlenexpositionen und es Caesium-134 und Caesium-137 Fallouts in der Präfektur Fukushima und bis in einen Umkreis von 100 km um die Anlage.

externe Strahlenexposition:

In der **Präfektur Fukushima** ist die Situation dadurch gekennzeichnet, dass auch außerhalb der 30 km Zone in einem Gebiet nordwestlich bei Itate und Kawamata bis hin zur Stadt Fukushima hoher Fallout zu verzeichnen ist. Unter dem Kriterium der Begrenzung der externen Strahlenexposition im ersten Jahr auf 20 mSv und dem daraus abgeleiteten Evakuierungskriterium mit einer Ortsdosisleistung von 3,8 $\mu\text{Sv/h}$ musste die Evakuierungszone angepasst werden. Dies ist inzwischen erfolgt. Es gibt aber auch innerhalb der 30 km Zone Gebiete mit Caesium-137 + Caesium-134 Fallout unter 100 kBq/m^2 . Hier wird man, sobald die Anlage in Fukushima Dai-ichi einen sicheren Zustand erreicht hat, über die Rückkehr der Bevölkerung zu entscheiden haben.

In den **anderen betroffenen Präfekturen** sind je nach Fallout leichte Erhöhungen der Ortsdosisleistungen zu verzeichnen. Die höchsten Werte sind in Ibaraki zu finden. Jedoch auch in Ibaraki bleiben die Ortsdosisleistungen ab April 2011 innerhalb der Schwankungsbreite der natürlichen Ortsdosisleistungen in Deutschland. In den übrigen betroffenen Präfekturen verblieben die Ortsdosisleistungen innerhalb der Schwankungsbreite der Ortsdosisleistungen in Japan.

Radioaktivität in Lebensmitteln: Im März kam es zu einzelnen Überschreitungen der Grenzwerte (für die Zubereitung von Säuglingsnahrung) für Radioaktivität von Iod-131 im Leitungswasser in Fukushima und Ibaraki. Japan entnimmt ca. 88 % des Wasserbedarfs von etwa 83,5 Milliarden m^3 pro Jahr aus Flüssen, Seen und Marschland, nur 13 % entstammen Grundwasser. Oberflächenwässer sind naturgemäß besonders leicht durch Fallout zu kontaminieren. Die Aktivitätskonzentrationen im Leitungswasser nahmen schnell ab, sodass Verzehrswarnungen Ende März zurückgenommen werden konnten. Die Caesium-134 oder Caesium-137 Aktivitätskonzentrationen überschritten nie die Grenzwerte und sind tendenziell als gering einzustufen.

Im März und Anfang April wurden in 6 Präfekturen Grenzwertüberschreitungen der Aktivitätskonzentrationen in Nahrungsmitteln für verschiedenen Nahrungsmittelgruppen festgestellt. Entsprechende Vermarktungs- und Verzehrsverbote wurden ausgesprochen.

interne Strahlenexposition:

Für die **Präfektur Fukushima** und für die **anderen betroffenen Präfekturen** sind die Evaluierungen noch nicht abgeschlossen

8.4.3 Einschätzung der Strahlenexpositionen im ersten Jahr nach Zerfall der kurzlebigen Radionuklide, auf der Grundlage des Zustandes Ende Juli 2011

Ende Juli 2011 kann die Situation in allen Präfekturen als existierende Situation behandelt werden. Die japanischen Dosiskriterien entsprechen auch hier den Empfehlungen der ICRP.

Ende Juli 2011 ist ein radiologischer Zustand erreicht, in dem Iod-131 nicht mehr relevant ist, da es weitestgehend zerfallen ist. Generell leisten Strontium- und Plutonium-Radionuklide keinen nennenswerten Beitrag zur Strahlenexposition. Daher sind nur die Radionuklide Caesium-134 und Caesium-137 sind zu betrachten.

Fallout: Erneute, umfangreiche Messungen durch MEXT und DOE mittels Aero-Gamma-Spektrometrie (<http://www.mext.go.jp/english/incident/1303962.htm>) erlauben eine zuverlässige Einschätzung der großräumigen Ortsdosisleistungen und des Fallouts. Kleinräumige Messungen auf einem 2 km mal 2 km Gitter sind angekündigt, Ergebnisse liegen aber noch nicht vor.

Für die Präfektur Fukushima ergeben sich keine neuen Beurteilungen gegenüber der Frühphase.

Für die anderen betroffenen Präfekturen kann man – soweit Aero-Gamma-Messungen verfügbar sind - schließen, dass der Fallout von C-134 + Caesium-137 unter 100 kBq/m^2 liegt. Nach den publizierten Daten liegt die Nachweisgrenze der Aero-Gamma-Messungen bei etwa 100 kBq/m^2 .

Nach den gemessenen maximalen Ortsdosisleistungen lässt sich für Ibaraki der Fallout von Caesium-134 + Caesium-137 mit weniger als 50 kBq/m^2 abschätzen. Die anderen betroffenen Präfekturen liegen deutlich niedriger.

Radioaktivität in Trinkwasser: Seit Ende März 2011 ist Radioaktivität in Trinkwasser kein Thema mehr und kann für Dosisbetrachtungen außer Acht gelassen werden.

Radioaktivität in Nahrungsmitteln: Die Ergebnisse umfangreicher Messungen von Nahrungsmitteln sind bei MEXT abzurufen. Die nachfolgende Analyse stützt sich auf die Auswertung der Messungen zwischen dem 23.3.2011 und dem 26.6.2011. Für diesen Zeitraum liegen zusammenfassende Dateien der Ergebnisse (siehe Links in Kapitel 1) vor. In dieser Analyse können die Ergebnisse lediglich nach Nahrungsmittelgruppen aufgeschlüsselt betrachtet werden. Es werden dabei folgende Nahrungsmittelgruppen unterschieden:

- Milch und Milchprodukte
- Fleisch und Eier
- Gemüse und Obst
- Fisch und Nahrungsmittel aus dem Wasser.

Die Nahrungsmittelgruppe Getreide inkl. Reis konnte noch nicht betrachtet werden, da diese Produkte in diesem Jahr noch nicht geerntet wurden.

Die Messergebnisse zeigen in allen Präfekturen für alle Nahrungsmittelgruppen große Streuungen. In allen Präfekturen werden in vielen Proben keine Caesium-Radionuklide nachgewiesen und die Aktivitätskonzentrationen überstreichen generell einen Bereich von „nicht nachgewiesen“ bis zu den höchsten beobachteten Werten. In den japanischen Medien wird im Wesentlichen über Grenzwertüberschreitungen berichtet, sodass der Öffentlichkeit eindeutig ein falsches Bild der Radioaktivität in Nahrungsmitteln vermittelt wird. Die Grenzwertüberschreitungen können nur sinnvoll interpretiert werden, wenn man sie nach Ort und Zeit aufgelöst im Zusammenhang mit den sonstigen Messergebnissen betrachtet.

Im Folgenden gilt für nicht erwähnte Nahrungsmittelgruppen, dass die Werte immer unter den Grenzwerten lagen oder dass nichts nachgewiesen wurde oder nur einzelne nicht dosisrelevante Werte gemessen wurden.

In der **Präfektur Fukushima** treten Grenzwertüberschreitungen in Gemüse und Obst, Fisch und Nahrungsmitteln aus dem Wasser auch im Juni 2011 relativ häufig auf. Beim Fisch sind besonders Süßwasserfische auffällig. Die Aktivitätskonzentrationen in Milch und Milchprodukte liegen seit Mitte Mai unter den Grenzwerten, Fleisch und Eier lagen immer unter den Grenzwerten.

In den **anderen betroffenen Präfekturen** ergibt sich ein komplexes Bild. In Ibaraki sind Gemüse und Obst seit Mitte Mai, Fisch und Wasserprodukte seit Juni und Milch und Milchprodukte seit Ende April unterhalb der Grenzwerte. In Tochigi sind Gemüse und Obst seit Juni unter den Grenzwerten. In den übrigen betroffenen Präfekturen lagen die Werte entweder immer unter den Grenzwerten oder es wurde nichts nachgewiesen oder nur einzelne nicht dosisrelevante Werte gemessen.

Radioaktivität in Rindfleisch: Die Vermarktung und Verfütterung von im Freien gelagertem Reisstroh stellte sich in der 2. Juli-Woche 2011 als Expositionspfad heraus. Sowohl mit im Freien gelagertem Reisstroh gefütterte Rinder als auch das Viehfutter Reisstroh ist in verschiedenen Präfekturen vermarktet worden. Die Verfütterung bewirkte teilweise hohe Caesium-134 und Caesium-137 Aktivitätskonzentrationen in Rindfleisch. Es wurden in einzelnen Proben von Rindfleisch Überschreitungen der vorläufigen Grenzwerte festgestellt. Entsprechende Vermarktungs- und Fütterungsverbote der Regierung für Reisstroh waren nicht bei den Bauern und Händlern bekannt geworden.

Radioaktivität in Tee: In einigen Präfekturen wurden Teeblätter mit Caesium-Aktivitätskonzentrationen oberhalb der vorläufigen Grenzwerte festgestellt. Entsprechende Vermarktungsverbote wurden erlassen.

externe Strahlenexposition:

In der **Präfektur Fukushima** wird durch Messungen zu überprüfen sein, ob das Dosis-kriterium von 20 mSv im ersten Jahr durch die ergriffenen Maßnahmen eingehalten wird. Hierbei sind kleinräumige Messungen des Fallouts und der Ortsdosisleistungen und die Ausstattung von Kindern mit Dosimetern geplant.

In den **anderen betroffenen Präfekturen** findet man die maximale Ortsdosisleistungen in Ibaraki mit einem Höchstwert von 0,086 $\mu\text{Sv/h}$. Damit liegen in Ibaraki die Ortsdosisleistungen innerhalb der Schwankungsbreite der natürlichen Ortsdosisleistungen in Deutschland; in den übrigen betroffenen Präfekturen liegen die Ortsdosisleistungen im Bereich der natürlichen Ortsdosisleistungen in Japan

interne Strahlenexposition:

Eine grobe Abschätzung der internen Strahlenexposition kann auf der Grundlage der Messergebnisse für die vier o.g. Nahrungsmittelgruppen und japanischer Verzehrsgewohnheiten durchgeführt werden.

Für die **Präfektur Fukushima** ergibt sich, dass unter der Annahme der Daten für Juni 2011 für ein ganzes Jahr, die interne Dosis unter 1 mSv liegen wird. Dies muss durch Messungen der Körperaktivität verifiziert werden.

Für die **anderen betroffenen Präfekturen** ergibt diese grobe Abschätzung, dass unter der Annahme der Daten für Juni 2011 für ein ganzes Jahr, die interne Dosis in Ibaraki unter 0,5 mSv liegen wird; in den übrigen betroffenen Präfekturen wird sie unter 0,1 mSv liegen. Auch dies kann durch Messungen der Körperaktivität verifiziert werden.

8.4.4 Späte Phase

Für die späte Phase oder das 2. und die darauf folgenden Jahre ist in allen Präfekturen außer der Präfektur Fukushima mit vernachlässigbaren Strahlenexpositionen zu rechnen. Insbesondere die interne Strahlenexposition wird deutlich niedriger sein als im ersten Jahr. In der Präfektur Fukushima wird eine langfristige Überwachung der Umweltradioaktivität erforderlich sein. Es ist derzeit noch unklar, welche Maßnahmen zur Optimierung des Strahlenschutzes in Fukushima ergriffen werden. Wesentlich wird die Unterstützung der Behörden sein, der Bevölkerung in Fukushima Hilfe zur Selbsthilfe zur aktiven Dosisminimierung zu leisten. Die Optimierung bleibt in Fukushima eine langfristige Herausforderung

8.5 Vergleich der Unfälle von Fukushima Dai-ichi und Tschernobyl

Die Unfälle von Fukushima Dai-ichi und Tschernobyl unterscheiden sich gravierend. Da vielfach solche Vergleiche angestellt werden, sind nachstehend tabellarisch einige Aspekte dargestellt, die bei solchen Vergleichen berücksichtigt werden müssen.

Tschernobyl

- graphit-moderierter, wassergekühlter Siedewasserreaktor mit Druckröhren
- kein Sicherheitsbehälter (Containment)
- Nukleare und chemische Explosion des Reaktorkerns
- Keine Rückhaltung der Radionuklide wegen offenem Reaktorkern
- Freisetzung von allen Radionukliden, auch Sr und Pu in großen Mengen in der näheren Umgebung
- Großräumige Verfrachtung der Radioaktivität in USSR und Europa
- In Tschernobyl wurde um ca. eine Größenordnung mehr Radioaktivität freigesetzt als in Fukushima; ganz anderer Nuklidvektor

Fukushima Dai-ichi

- wasser-moderierter, wasser-gekühlter Siedewasserreaktor mit Reaktordruckbehälter
- Sicherheitsbehälter
- Wasserstoffexplosion nach Kernschmelze
- Rückhaltung vieler Radionuklide im RDB, in der Kondensationskammer und im Sicherheitsbehälter
- Freisetzung von Edelgasen, Iod- und Cs-Radionukliden; Sr und Pu vernachlässigbar
- kleinräumige Verfrachtung über Nordjapan; großräumige Verfrachtung über Pazifik

9 Schlussfolgerung

Seit Juni 2011 sind die kurzlebigen Radionuklide weitgehend abgeklungen. Insbesondere Iod-131 stellt kein Problem mehr dar. Zu betrachten sind Caesium-134 und Caesium-137. Strontium- und Plutonium-Radionuklide werden, falls die Situation im Kernkraftwerk Fukushima Dai-ichi weiterhin stabil bleibt, keine relevanten Beiträge zur Strahlenexposition leisten.

Die gesamte, d.h. die natürliche plus die durch langlebige Radionuklide aus dem Unfall in Fukushima Dai-ichi bewirkte Strahlenexposition von Menschen beim Aufenthalt in Japan wird, mit Ausnahme der Präfektur Fukushima, im Bereich der Schwankungsbreite der welt-

weiten natürlichen Strahlenexposition liegen und z.B. geringer sein als die natürliche Strahlenexposition vieler Menschen in Europa.

In der Präfektur Fukushima besteht eine Notfallsituation im Sinne der Empfehlung 103 der International Commission on Radiological Protection (ICRP). Die japanischen Behörden haben darauf mit Notfallmaßnahmen reagiert, die im Einklang mit den Empfehlungen der ICRP stehen. Im Rahmen der Optimierung des Strahlenschutzes ist es dort derzeit möglich einen Referenzwert der zusätzlichen internen Strahlenexposition von 1 mSv im Jahr und einen Referenzwert der externen Strahlenexposition von 20 mSv im ersten Jahr nach dem Unfall anzuwenden.

Wesentliche Expositionspfade sind die externe Bestrahlung durch am Boden abgelagerte Radionuklide und die interne Bestrahlung durch den Verzehr von kontaminierten Nahrungsmitteln. Derzeit ist der Verzehr von Fisch und Nahrungsmitteln aus dem Meer und aus Binnengewässern sowie von Gemüse und Obst bestimmend für die interne Strahlenexposition. Im zweiten Jahr nach dem Unfall wird die Strahlenexposition generell und speziell die Exposition durch Verzehr von Nahrungsmitteln deutlich geringer ausfallen als im Jahr 2011.

Die Optimierung des Strahlenschutzes in der Präfektur Fukushima wird eine schwierige und langfristige Herausforderung für die japanische Gesellschaft darstellen.

10 Nützliche Links zum Thema Fukushima 2011



http://www3.nhk.or.jp/daily/english/07_07.html



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

N I S A Nuclear and Industrial Safety Agency

<http://www.nisa.meti.go.jp/english/>

JAIF 社団法人 日本原子力産業協会
JAPAN ATOMIC INDUSTRIAL FORUM, INC.

<http://www.jaif.or.jp/english/>

TEPCO TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY

<http://www.tepco.co.jp/en/index-e.html>



<http://www.gengikyo.jp/english/index.html>

MEXT MINISTRY OF EDUCATION,
CULTURE, SPORTS,
SCIENCE AND TECHNOLOGY/JAPAN

<http://www.mext.go.jp/english/incident/1303962.htm>



<http://www.bousai.ne.jp/eng/>

International Affairs Division
Miyagi Prefectural Government

http://www.pref.miyagi.jp/kokusai/en/accidents_fukushima_nuclear.htm



Tokyo Metropolitan Institute of Public Health

<http://monitoring.tokyo-eiken.go.jp/monitoring/index-e.html>



厚生労働省
Ministry of Health, Labour and Welfare

<http://www.mhlw.go.jp/english/topics/2011eq/index.html>

MAFF
Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries

<http://www.maff.go.jp/e/index.html>

FA
Fisheries Agency

<http://www.jfa.maff.go.jp/e/inspection/index.html>



http://www.vti.bund.de/de/startseite/startseite/faq-japan.html#h2_3

経済産業省
Ministry of Economy, Trade and Industry

<http://www.meti.go.jp/english/earthquake/nuclear/index.html>

IRSN
INSTITUT
DE RADIODÉTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

<http://www.irsn.fr/FR/Documents/home.htm>



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

<https://www.naz.ch/de/aktuell/index.html>

KIT
Karlsruher Institut für Technologie


<http://www.kit.edu/besuchen/6042.php>

ENERGY.GOV

<http://www.energy.gov/news/10194.htm>



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

 Bundesministerium
für Umwelt, Naturschutz
und Reaktorsicherheit

http://www.bmu.de/atomenergie_sicherheit/doc/47260.php

 Bundesamt für Strahlenschutz

<http://www.bfs.de/bfs>

Deutscher Wetterdienst
Wetter und Klima aus einer Hand


<http://www.dwd.de/>

PTB

<http://www.ptb.de/de/org/6/index.htm>

CTBTO
PREPARATORY COMMISSION

<http://www.ctbto.org/press-centre/highlights/2011/fukushima-related-measurements-by-the-ctbto/fukushima-related-measurements-by-the-ctbto-page-1/>

VGB

<http://www.vgb.org/vgbmultimedia/News/Fukushima19VGBktg31.pdf>

Zusammenfassende Darstellungen der Ergebnisse der Messungen von Nahrungsmitteln in Japanisch wurden Ende Juli 2011 publiziert:

Fehler! Hyperlink-Referenz ungültig.www.mhlw.go.jp/stf/houdou/2r9852000001d4y4-att/2r9852000001d501.xls

<http://www.mhlw.go.jp/stf/houdou/2r9852000001e050-att/2r9852000001e092.xls>
<http://www.mhlw.go.jp/stf/houdou/2r9852000001e1k4-att/2r9852000001e1o6.xls>
<http://www.mhlw.go.jp/stf/houdou/2r9852000001e0dk-att/2r9852000001e0hm.xls>
<http://www.mhlw.go.jp/stf/houdou/2r9852000001e0hu-att/2r9852000001e0lw.xls>
<http://www.mhlw.go.jp/stf/houdou/2r9852000001e0uo-att/2r9852000001e0yq.xls>
<http://www.mhlw.go.jp/stf/houdou/2r9852000001e1fu-att/2r9852000001e1jw.xls>
<http://www.mhlw.go.jp/stf/houdou/2r9852000001e0m4-att/2r9852000001e0q6.xls>
<http://www.mhlw.go.jp/stf/houdou/2r9852000001e09a-att/2r9852000001e0dc.xls>
<http://www.mhlw.go.jp/stf/houdou/2r9852000001e0qe-att/2r9852000001e0ug.xls>
<http://www.mhlw.go.jp/stf/houdou/2r9852000001e133-att/2r9852000001e175.xls>

Ende Juli 2011 wurden auch die japanischen Ausbreitungsrechnungen in Japanisch publiziert:

<http://www.nisa.meti.go.jp/earthquake/speedi/230724/230724.html>.

Aktuelle Literatur (hier nicht benutzt):

B. Kuczera, Das schwere Tohoku-Seebeben in Japan und die Auswirkungen auf das Kernkraftwerk Fukushima-Daiichi, atw 56 Heft 4/5, April/mai 2011, pp. 234 – 241

W. Scheuermann, A. Piater, C. Krass, A. Lurk, T. Wilbois, Y. Ren, Modeling consequences of the accident at Fukushima, atw 56 Heft 6, Juni 2011, pp. 325 - 331