

Freigesetzte Radioaktivität aus der Reaktorkatastrophe von Fukushima im Pazifik und in der Nahrungskette

Stephan Moldzio, Thomas Dersee, Dirk Zimmermann, Josef Lutz, Rolf Bertram,
Anton Eisenhauer, Rainer Frentzel-Beyme

Die nukleare Katastrophe von Fukushima ist auch lange nach dem Erdbeben vom 11. März 2011 nicht unter Kontrolle. Große Mengen Radioaktivität werden nach wie vor freigesetzt. Ein Ende ist nicht in Sicht, weil die Druckbehälter, Sicherheitsbehälter, Abklingbecken undicht sind und ständig gekühlt werden müssen. Dadurch gelangt radioaktives Wasser zwangsläufig ins Grundwasser und zusätzlich fließt es über die Lecks direkt in den Pazifik. Es werden dadurch nicht nur weite Landstriche unbewohnbar gemacht, auch die Luft, das Wasser des Pazifiks und äußerst fischreiche Bestände vor der Ostküste Japans sind betroffen.

Die Informationspolitik der Betreibergesellschaft TEPCO und der japanischen Regierung sowie die schwache Datenlage und fehlende Erfahrungswerte machen eine Einschätzung der Verbreitung und der Gefährdung durch die freigesetzte Radioaktivität schwierig. Langfristige und weit reichende Auswirkungen können aber erwartet werden. Im Folgenden soll eine Einschätzung auf Grundlage der verfügbaren Informationen unternommen werden.

Frei gesetzte Radioaktivität

Wie viel Radioaktivität aus Fukushima-Daiichi bisher freigesetzt wurde, kann nur geschätzt werden. Die japanische Regierung hatte den Unfall am 12.3.11 auf Level 4, am 18.3.11 auf Level 5 und am 12.4.11 schließlich auf Level 7 der INES-Skala eingestuft.

Die Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) hatte bereits am 26.3.11 auf Grundlage von Radioaktivitätsmessungen von weltweit 60 Mess-Stationen („CTBTO Messungen“) erklärt, dass die bis dahin aus den havarierten Atomreaktoren von Fukushima freigesetzten Radionuklidmengen von gleicher Größenordnung wie die aus Tschernobyl freigesetzten Mengen seien (ZAMG 2011a).

Oft wird die Reaktorkatastrophe von Fukushima mit der in Tschernobyl verglichen. Einige wesentliche Unterschiede:

1. Es gibt mehrere Kernschmelzen. In den Abklingbecken lagern die Brennstäbe z.T. unter freiem Himmel.
2. Unter Berücksichtigung der Brennelemente in den Abklingbecken ist das nukleare Inventar in Fukushima ca. 120 mal so groß wie in Tschernobyl (JOOSS et al. 2011).

3. In Tschernobyl wurde durch den Graphitbrand ein großer Teil des radioaktiven Inventars ausgeblasen. In Fukushima wird die Kernschmelze noch über viele Jahre weiter bestehen. In der Kernschmelze läuft die Kettenreaktion mit den Brennstoffen (Uran, Plutonium) unter ständiger Freisetzung von Neutronen weiter.

4. Die Bevölkerungsdichte in dieser Region Japans ist etwa 15mal höher als in der Ukraine.

5. Ein Großteil der Radioaktivität entweicht in Fukushima über das Kühlwasser direkt ins Meer, verteilt sich dort über die Meeresströmungen, mit unvorhersehbaren Folgen für den Pazifik, die Nahrungsketten und damit auch für den Menschen. So wurde im Kühlwasser des Turbinengebäudes von Reaktor 2 eine Gesamtaktivität von 18 Mrd. Bq/l (ohne das kurzlebige Jod-134) gemessen, große Mengen davon sind direkt in den Pazifik geflossen (TEPCO 2011a).

In der Kernschmelze entstehen durch die unkontrolliert ablaufenden Kernreaktionen eine Reihe von radioaktiven Produkten. In der Tab. 1 ist eine Auswahl aufgeführt.

Das in den Brennstäben der Fukushima-Reaktoren vorhandene Plutonium besteht je nach Abbranddauer bis zu 12% aus

Plutonium-241, bei den verwendeten MOX-Brennelementen kann der Anteil wesentlich größer sein. Plutonium-241 ist ein Betastrahler und wandelt sich mit einer Halbwertszeit von 12,9 Jahren zu Americium-241 um. Americium-241 ist einer der energiereichsten Alphastrahler (5,4 MeV) mit einer Halbwertszeit von 432 Jahren. Mit dem Mengenzuwachs von Americium-241 auf Kosten der Menge von Plutonium-241 steigt die Alpha-Aktivität (in Bq gemessen) innerhalb von 15 Jahren um das 300fache an. Von Organismen aufgenommen ist die Radiotoxizität von Americium-241 je nach Ablagerungsort im Körper um bis zu 3 Größenordnungen größer als von Plutonium (LOVELAND et al. 2006). Cäsium-134, Cäsium-137 und Jod-131 sind relativ einfach nachzuweisen und werden deshalb als Leitnuklide verwendet. Für die anderen radioaktiven Substanzen gibt es keine flächendeckenden Messungen, weshalb deren Mengen aus einem bestimmten Verhältnis von freigesetzten Radionukliden geschätzt werden muss. Generell ist die Messung von α (alpha)-Strahlern wie Plutonium kompliziert und dauert etwa 3 Wochen. Das japanische Wissenschaftsministerium MEXT (Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology) veröffentlichte erst Anfang April einzelne Ergebnisse für Plutonium und Strontium für Mitte März genommene Proben (MEXT 2011).

In der Vergangenheit sind bereits zahlreiche Quellen an Radioaktivität in die Weltmeere eingeflossen (Abb. 2):

- Fallout der oberirdischen Atomtests seit den 50er Jahren,
- Fallout von Tschernobyl,
- versenkter Atommüll, versenkte Atom-U-Boote,
- Einleitung flüssigen Atommülls durch die Atomfabriken (WAA) Sellafield und La Hague,
- Radioaktivität durch diverse „Störfälle“ an AKWs,
- Radioaktivität durch AKWs im „Normalbetrieb“,
- Freisetzung „natürlicher Radioaktivität“ bei der Förderung von Öl und Gas.

Radio-nuklid	Halbwertszeit	Zerfallsart	Zerfallsprodukte
H-3 (Tritium)	13,32 Jahre	β^-	He-3 (stabil)
I-131	8,02 Tage	β^-	Xe-131 (stabil)
I-134	52,5 Minuten	β^-	Xe-134 (stabil)
Cs-137	30,17 Jahre	β^-	Ba-137 (stabil)
Cs-134	2,06 Jahre	β^-	Ba-134 (stabil)
Xe-133	5,25 Tage	β^-	Cs-133 (stabil)
Kr-85	10,76 Jahre	β^-	Rb-85 (stabil)
Sr-90	28,78 Jahre	β^-	Y-90 \rightarrow Zr-90 (stabil)
Sr-89	50,53 Tage	β^-	Y-89 (stabil)
Te-129m	33,6 Tage	β^-	I-129 \rightarrow Xe-129 (stabil)
Fe-55	2,73 Jahre	K-Einfang, γ	Mn-55 (stabil)
Pu-238	87,7 Jahre	α	U-234 \rightarrow Th-230 \rightarrow ...
Pu-239	24110 Jahre	α	Uran-235 \rightarrow Th-231 \rightarrow ...
Pu-241	14,35 Jahre	β^-	Am-241 \rightarrow ...
Am-241	432,3 Jahre	α	Np-237 \rightarrow ...

Tab. 1: Halbwertszeiten, Zerfallsarten und Zerfallsprodukte einiger ausgewählter Radionuklide

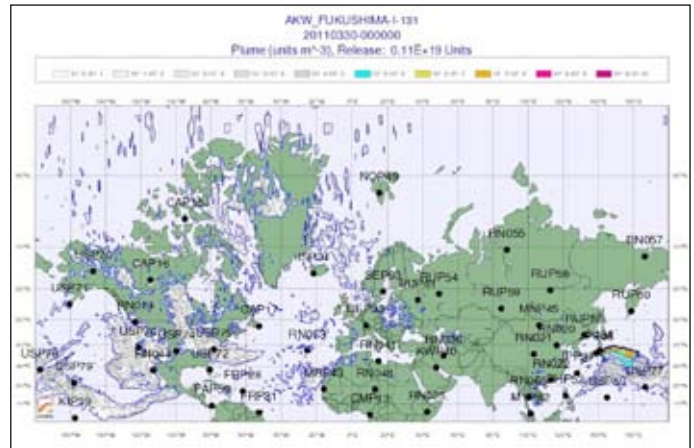


Abb. 1: Globale Verbreitung der radioaktiven Rauchfahne am 30.3.2011, ausgehend von Fukushima-Daiichi. Nachweis von Jod-131 durch weltweit 60 Messstationen (ZAMG 2011b)

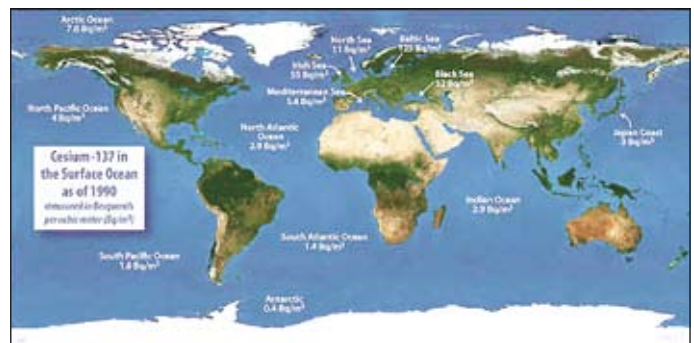


Abb. 2: Aktivität von Cäsium-137 (Bq/m³) in den Weltmeeren im Jahre 1990 (NSF 2011)

Nach Fukushima sind die Messwerte im Ozean um das Kraftwerk um mehrere Größenordnungen höher, als nach dem Super-GAU von Tschernobyl im Schwarzen Meer und in der Ostsee. Bei aller Verdünnung wird dies langfristig zu einer messbaren Erhöhung des radioaktiven Inventars des Pazifiks und der Weltmeere führen, so wie es auch z. B. durch Tschernobyl und die Atomwaffentests geschehen ist (Abb. 1). Um die Auswirkungen von Fukushima in der Zukunft abschätzen zu können, bemühen sich Wissenschaftler des Ozeanographischen Instituts Woods Hole, die Hintergrundaktivität von Cäsium-137 als Leitnuklid zum jetzigen Zeitpunkt im Pazifik und Atlantik zu erfassen (NSF 2011, siehe Abb. 2)).

Messungen im Pazifik

Die Radioaktivität im Pazifik wird von TEPCO und vom japanischen Wissenschaftsministerium MEXT (Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology) gemessen. Ein „Meeres-Experte der IAEA aus Monaco“ hat die japanischen Behörden JAMESTEC, MEXT, MOE, MOFA unterwiesen (IAEA 2011). Die Unabhängigkeit der Messungen steht damit in Frage.

Von zahlreichen Verbänden und Organisationen wurde die Informationspolitik der japanischen Behörden und des Betreibers TEPCO kritisiert und unabhängige und umfassendere Messungen gefordert.

Im Meer werden fast ausschließlich Jod-131 und Cäsium-134 und -137 gemessen, für andere Radionuklide, wie etwa Strontium-90, Plutonium-Isotope oder Americium-241 liegen nur wenige bzw. keine Messungen vor (MEXT 2011). Größere Freisetzungen würden v.a. regional in den Gewässern um Fukushima zu einer langfristigen radioaktiven Kontamination führen.

Die japanische Atomaufsichtsbehörde NISA berichtete am 12.6.11, dass bei einer Grundwasser-Probe um Reaktor 2, genommen am 18.5.11, hohe Strontium-Werte gemessen wurden: 19.000 Bq/l Strontium-89 und 6.300 Bq/l Strontium-90 (ASAHI NEWS 2011a). Das spricht dafür, dass mindestens ein Kern den Sicherheitsbehälter durch geschmolzen hat und nun direkten Kontakt zum Grundwasser und zur Biosphäre hat.

Mitte Oktober haben private Messungen auf einem Hausdach in Yokohama, 250 km von Fukushima-Daiichi entfernt, hohe Strontium-90 Aktivitäten von 195 Bq/kg ergeben. Die japanischen Behörden hatten Strontium zuvor nur im Umkreis von 100 km gemessen, da die Messungen teuer sind, und auch nur wesentlich geringere Werte festgestellt (ASAHI NEWS 2011b).

Das MEXT hat seit dem 23.3.11 acht Messpunkte 30 km offshore entlang der Küste („MEXT 1-8“) eingerichtet. Ende März/Anfang April wurden 4 weitere Messpunkte ergänzt (MEXT A, B, 9 und 10), die sich ca. 40 km nördlich, bzw. südlich des Kraftwerks befinden, in etwa 10 km, bzw. 20 km Entfernung zur Küste. Ende April wurden die Messpunkte S1-S4 eingerichtet. Ab dem 23.3.11 wurde zunächst nur Oberflächenwasser beprobt, ab dem 30.3.11 auch Wasser aus etwa 51-172m Tiefe, und seit dem 25.4.11 auch Wasser aus mittlerer Tiefe (30-95m Tiefe).

Am 15.4.11 wurden an „MEXT-4“ im Oberflächenwasser in 30 km Entfernung zur Küste folgende Maximalwerte gemessen: 160 Bq/l Jod-131, 160 Bq/l Cäsium-134 und 190 Bq/l Cäsium-137 (MEXT 2011). Hierbei ist anzumerken, dass die Nachweisgrenze der angewandten Messmethode mit 10 Bq/l (kleinere Aktivitäten werden als „nicht nachweisbar“ deklariert) etwa 3000 mal so hoch ist wie der Vor-Fukushima-Level an Cäsium-137 von etwa 0,003 Bq/l (NSF 2011).

TEPCO hat seit dem 21.3.11 vier küstennahe Messpunkte vor Fukushima-Daiichi und Daini („TEPCO 1-4“) eingerichtet. Seit dem 5.4. werden sechs weitere Messpunkte 15 km offshore beprobt („TEPCO 5-10“).

Von der IAEA wurden am 12.4.11, 19.4.11 und am 1.6.11 drei zusammenfassende Berichte über die Messungen im Pazifik veröffentlicht. Im Bericht der IAEA vom 19.4.11 wird verkündet, dass die Messwerte an TEPCO 5-10 für Jod-131, bzw. Cs-137 „unter 0,5 kBq/l“ liegen und an TEPCO 1-4 „unter 20 kBq/l nach dem 9.April“ (IAEA 2011).

Tatsächlich waren die Werte vor dem 9.4.11 noch weitaus höher, mit Maximalwerten von 180.000 Bq/l für Jod-131 (30.3.11, TEPCO-1, 330m entfernt von Abflussrohr Blöcke 1-4) und 66.000 Bq/l für Cäsium-137 (7.4.11, TEPCO-2, 30m entfernt von Abflussrohr Blöcke 5-6).

Es wurden bisher nur vereinzelt Messungen des Sediments am Meeresboden durchgeführt. TEPCO-Messungen des Meeres-

bodens in 3 km Entfernung zur Küste vom 29.4.11 ergaben Aktivitäten von 190 Bq/kg Jod-131; 1.300 Bq/kg Cäsium-134 und 1.400 Bq/kg Cäsium-137 (TEPCO 2011b). Das MEXT hat um den 10.5.11 und um den 26.5.11 an jeweils 12 Messpunkten in ca. 20-40km Entfernung zur Küste Messungen durchgeführt, die Höchstwerte von 260 Bq/kg Cs-134, 320 Bq/kg Cs-137 und 140 Bq/kg Te-129 ergaben. Ebenfalls am 26. Mai wurde 1,7 km offshore vor Iwaki City eine Gesamt-Cäsium Aktivität von 9.271 Bq/kg (Trockengewicht) gemessen (MEXT 2011).

Die Messwerte von TEPCO und MEXT zeigen, dass das Meer um Fukushima-Daiichi hochgradig kontaminiert ist.

Verteilung der radioaktiven Substanzen um Japan und im Pazifik

Die in Fukushima freigesetzte Radioaktivität verteilt sich in unterschiedlichem Maße weiträumig über Meeresströmungen, Winde, Niederschläge und über wandernde Lebewesen. Hier ist zu unterscheiden zwischen flüchtigen, leicht löslichen und gasförmigen Radionukliden, wie Jod-131, Cäsium-137, Cäsium-134, Strontium-90, Xenon-133 (Gas), Krypton-85 (Gas) und Tritium (Gas), und den sogenannten Transuranen, wie Plutonium, Neptunium, Americium und anderen radioaktiven Isotopen, die sich im Ozean wie andere Schwermetalle verhalten.

Schwermetalle liegen im Wasser nur zu einem geringen Teil als freie Ionen vor und lagern sich an suspendierten Partikeln an und werden ins Sediment verfrachtet. Die Aktivitäten im Sediment sind daher um das Vielfache höher als im Wasser. (SOMMER 1998) Auch die sedimentierten Radionuklide belasten das Leben am Meeresboden und können durch Stürme und Meeresströmungen wieder aufgewirbelt und verbreitet werden. Ein Teil der an sedimentierten Partikel anhaftenden Radionuklide kann durch Störungen des Sorptionsgleichgewichts z.B. durch Temperatur-, Druck-, oder Strömungsveränderungen desorbiert und in die biologischen Kreisläufe zurückgeführt werden. Diese Grenzflächenprozesse unter dem Einfluss ionisierender Strahlung sind bisher kaum untersucht worden (VINTRO et al. 2000).

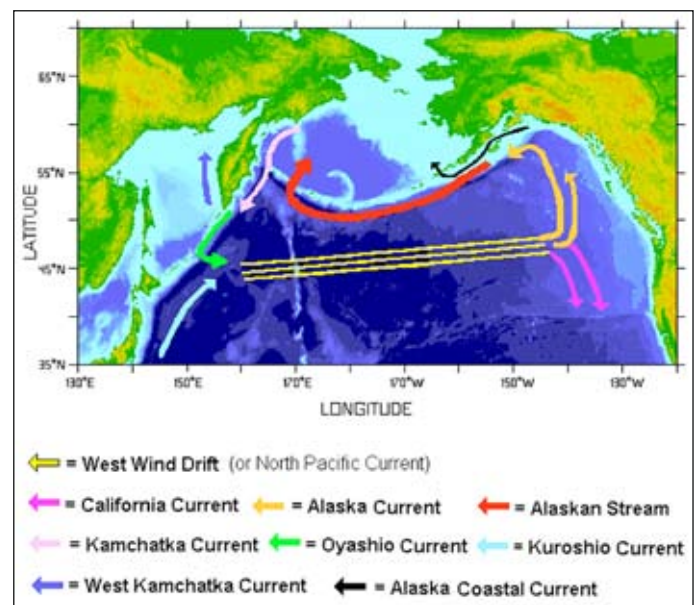


Abb. 3: Meeresströmungen im Nordpazifik (NOAA 2007)

Entscheidend für die Verteilung der löslichen radioaktiven Substanzen im Pazifik werden die vorherrschenden **Meeresströmungen** sein. Vor der Ostküste Japans treffen sich zwei Strömungen: Der aus dem Süden nach Norden fließende warme Kuroshio stößt auf den kalten und weniger salzhaltigen südwärts gerichteten Oyashio. Beide Strömungen bilden dann zusammen den Nordpazifikstrom. Dieser überquert den Pazifik und teilt sich vor der Küste Amerikas in den nördlichen Alaska-Strom und den südlichen Kalifornienstrom. Der Alaska-Strom gelangt in die fischreiche Beringsee, Einflüsse aus Fukushima können dort jedoch erst mit einem bestimmten zeitlichen Abstand von mindestens einem Jahr erwartet werden (Abb. 3).

Die Radioaktivität kann auch durch Lebewesen z.B. Fische, verbreitet werden.

Ein Teil der Radionuklide, der sich langfristig, z.B. am Tiefseeboden ablagert, ist den biologischen Kreisläufen im Wesentlichen entzogen und wird in den geologischen Kreislauf eingehen.

Ein tatsächlicher Abbau, also die Umwandlung der Radionuklide in stabile, nicht-radioaktive Elemente findet ausschließlich über den radioaktiven Zerfall bei einer bestimmten Halbwertszeit statt. Durch die Tatsache, dass sich radioaktive Schwermetalle an Partikel anlagern und sedimentieren, haben sie die größte Auswirkung auf die Lebensgemeinschaften am und im Meeresboden: Meeresalgen, Würmer, Muscheln, Schnecken, Krebstiere, demersale Fische. Aber auch Fische des Freiwassers ernähren sich von am Boden lebenden Tieren. Durch die Fischerei schließlich wird ein Teil der Radioaktivität auf dem Teller der Menschen landen, mit dem Menschen als Endkonsumenten.

Die betroffene Region und ihre Bedeutung für die Fischerei

Nordöstlich der Reaktoren liegt eines der fischreichsten Gebiete der Welt. Die dort aktive japanische Fischerei stellt die Hälfte der in Japan konsumierten Fischprodukte. Gefangen werden Sardinen, Thunfische, Seehechte, Lachse, Alaska-Seelachs, Makrelen, Eidechsenfische, Meerbrassen, Krabben, Garnelen, Tintenfische. Hinzu kommen Venusmuscheln, Austern und Seetang sowie Produkte aus der überwiegend küstennahen Aquakultur. Letztere stellen gut ein Fünftel der gesamten Fischmenge.

Fisch ist ein Grundnahrungsmittel in Japan und lässt sich in seiner Bedeutung mit dem Reis vergleichen. Fischfang und Fischverarbeitung sind ein wichtiger Wirtschaftsbereich für das Land. Japan ist weltweit der fünftgrößte Fischproduzent. Der Pro-Kopf-Kopfverbrauch liegt bei über 60 kg Fisch im Jahr und ist damit fast viermal so hoch wie in Deutschland.

Der hohe Fischkonsum führt dazu, dass Japan mit Gesamtimporten von 900.000 t pro Jahr auch der weltweit größte Importeur von Fisch ist. Nur ein Bruchteil des gefangenen Fisches wird exportiert, so importierte Deutschland in 2010 nur ca. 60,3 t aus Japan.

Anreicherung der radioaktiven Substanzen in den Nahrungsketten

Die in die biologischen Kreisläufe gelangten löslichen radioaktiven Substanzen, wie Cäsium und Jod gehen über alle Nahrungsketten.

Besonders in Gebieten mit hohen Sedimentationsraten und hoher biologischer Produktivität, wie z.B. in Flussmündungen oder der Gezeitenzone können Radionuklide verstärkt akkumulieren und Eingang ins Nahrungsnetz finden (UK MARINE 2011). Von Untersuchungen um die WAA Sellafield ist bekannt, dass sich verschiedene Radionuklide in verschiedenen Organismen unterschiedlich anreichern (VINTRO et al. 2000).

Die biologische Wirkung, Anreicherung und Ausscheidung muss also für die verschiedenen Radionuklide einzeln betrachtet werden, da sie sich durch ihre chemischen und physikalischen Eigenschaften unterschiedlich im Meer verteilen und eine unterschiedliche biologische Wirkung haben (LIBES 1992: 599-600).

Radioaktives Jod, Cäsium, oder Strontium werden beispielsweise direkt im Organismus eingebaut und reichern sich in bestimmten Organen an.

Plutonium, Neptunium und andere Transurane verhalten sich wie andere Schwermetalle. Sie reichern sich im Organismus besonders stark an, da sie kaum ausgeschieden werden können. Die Anreicherung in Fischen und anderen Meeresbewohnern hängt dabei im Wesentlichen von der so genannten biologischen Halbwertszeit ab, welche die radioaktive Halbwertszeit überlagert. Die biologische Halbwertszeit gibt an, in welchem Zeitraum die Anfangskonzentration eines Stoffes um die Hälfte reduziert wird und ist abhängig von Alter, Geschlecht und gesundheitlichem Zustand. Die vom einzelnen Individuum erfolgreich ausgeschiedenen Radionuklide sind jedoch immer noch vorhanden und können abermals Eingang in die Nahrungskette finden. Gemessen an den kurzen Lebenszeiten von Individuen bedeuten diese sich in unzähligen Generationen und Lebewesen wiederholenden Prozesse eine dauerhafte Schädigung der jeweils lebenden Spezies.

Es ist auch zu beachten, dass sich die biologische Halbwertszeit auf eine bestimmte Anfangskonzentration bezieht. Wenn fortwährend z.B. über die Nahrung neue Radionuklide aufgenommen werden, kann es trotz Ausscheidung im Ergebnis zu einer weiteren Anreicherung führen. Eine relativ kurze biologische Halbwertszeit haben gut lösliche radioaktive Elemente und Isotope, während die partikelreaktiven Elemente wie Plutonium oder andere Transurane sehr lang, wenn nicht sogar für immer im Körper verbleiben. Der Konzentrationsfaktor wird u.a. durch deren Ernährungs- und Lebensweise bestimmt und in welchem Masse sie radioaktive Substanzen anreichern, bzw. wie sie diese ausscheiden können. Weil viele Radionuklide durch die Organismen nicht oder nur eingeschränkt ausgeschieden werden können, reichern sie sich durch die "trophische Kaskade" in den Nahrungsketten von unten nach oben hin an (Biomagnifikation). Einige Organismen wie Muscheln oder Seetang reichern radioaktive Substanzen besonders stark an. Der Teil der Radionuklide, der sich im Sediment ablagert, kann über grabende, filtrierende oder sedimentfressende Tiere, wie Würmer oder Muscheln in die Nahrungsketten eingehen. Fische, die sich von solchen Tieren ernähren, dürften mittelfristig also höher belastet sein. Ebenso Fische, die höher in der Nahrungskette angesiedelt sind.

Der Biomagnifikation wirkt die Verdünnung durch Ozeanströmungen entgegen. Mit Höchstwerten ist mittelfristig folglich bei Individuen an der Spitze der Nahrungskette (z.B. Tunfische und andere Raubfische, Haie, Wale, Robben, Meeresschildkröten, Meeressäuger - und natürlich der Mensch) zu rechnen, die sich

lange in relativ hoch kontaminierten Regionen aufhalten. Durch das individuell unterschiedliche Migrationsverhalten können sich große Unterschiede in den Messwerten der einzelnen Fischerei-Produkte ergeben.

Tendenziell könnte man annehmen, dass die Belastung des Fisches mit zunehmender Entfernung von Fukushima abnimmt. Die Messungen des japanischen Ministeriums für Land- und Forstwirtschaft und Fischerei (MAFF) zeigen, dass die Belastung auch zwischen den verschiedenen Fischarten stark variiert.

Insgesamt können die gesundheitsgefährdenden Auswirkungen wegen diesem Zeitfaktor sehr lange verborgen bleiben.

Vom MAFF wurden im Mai und Juni Höchstwerte v.a. beim Sandaal (*Ammodytes personatus*) gemessen – einem kleinen bodenbewohnenden Planktonfresser: Am 13.4.2011 wurden vor Iwaki Aktivitäten von 12.500 Bq/kg Jod und 12.000 Bq/kg Cäsium gemessen.

Weitere Maximalwerte wurden im Juni im amphidromen Ayu-Fisch (*Plecoglossus altivelis*; 4400 Bq/kg), im Juli im Stachelkopf (*Sebastes spp.*, 3200 Bq/kg), im August im Ayu-Fisch (1770 Bq/kg) und im September wieder im Stachelkopf (2200 Bq/kg) gemessen. In Tunfischen (*Thunnus alalunga*) und Bonitos (*Katsuwonus pelamis*), die am oberen Ende der Nahrungsketten stehen, wurden bis September nur geringe Cäsium-137 Aktivitäten unter 30 Bq/kg gemessen. Auch in den mindestens 27 Zwerg-, Baird-, Bryde- und Seiwalen, die bis September getötet wurden, konnten nur maximal 30 Bq/kg Cäsium-137 festgestellt werden (MAFF 2011).

Die Messwerte des MAFF für Mai ergaben für Seetang Höchstwerte von 2.200 Bq/kg Jod-131 (MAFF 2011). Messungen von Greenpeace kamen jedoch für Seetang zu weit höheren Ergebnissen: Anfang Mai wurden außerhalb der 12-Meilenzone Algenproben genommen und deren Gesamtaktivität gemessen. Die Einfahrt und Probenahme innerhalb der Hoheitsgewässer hatten die japanischen Behörden nicht gestattet. Bei 10 von 22 Proben lag die Gesamtaktivität über 10.000 Bq/kg (GREENPEACE 2011). Der Maximalwert betrug 127.000 Bq/kg Jod-131, 800 Bq/kg Cäsium-134 und 840 Bq/kg Cäsium-137 (ACRO 2011).

Es stellt sich die Frage, wie diese erhebliche Differenz in den Messergebnissen zustande kommt und warum die japanische Regierung unabhängige Messungen behindert.

Biologische Wirkung der radioaktiven Substanzen in den verschiedenen Lebewesen und im Menschen

Radioaktive Substanzen sind durch ihre Erbgut- und zellschädigende Wirkung grundsätzlich für alle Lebewesen gesundheitsgefährdend. Die spezielle biologische Wirkung muss sowohl für jedes Radionuklid, als auch für die verschiedenen Organismengruppen, wie Algen, Zooplankton oder Wirbeltiere im Einzelnen betrachtet werden.

Bei Einzellern und Kleinlebewesen, z.B. beim Plankton, wirkt sich die Radioaktivität in einer erhöhten Mortalitätsrate aus. Diese wird jedoch durch dessen schnelle Vermehrungsrate wieder ausgeglichen. Deshalb ist nicht mit einer Abnahme an Phytoplankton und Zooplankton zu rechnen.

Auf Wirbeltiere wie Fische, Schildkröten, Seevögel, Robben, oder Wale haben radioaktive Substanzen ähnliche Auswirkungen wie auf den Menschen: Krebs, genetische Defekte, Fehlbildungen, etc..

Bei radioaktiven Substanzen gibt es keine „unschädliche“ Dosis, bereits kleinste Strahlungsmengen können – mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit – Krebs auslösen und damit zum Tode führen. Bei Menschen verursacht radioaktives Jod Schilddrüsenkrebs. Besonders gefährdet sind Kinder und Jugendliche aufgrund der höheren Zellteilungsrate und der höheren Aktivität der Schilddrüse. Eine extrem hohe Gefahr besteht für Föten im Mutterleib. Säuglinge sind gefährdet durch die Anreicherung von Jod in der Muttermilch. Die Wirkung von Jod-131 in der Region Tschernobyl war katastrophal. Alleine in der stark belasteten Region Gomel in Belarus bekam ein Drittel aller Kinder, die zum Zeitpunkt des Super-GAU zwischen 0 und 4 Jahre alt waren, Schilddrüsenkrebs (IPPNW & GSF 2011).

Auswirkungen auf nicht-tödlichem Niveau können z.B. ein negativer Einfluss auf Wachstums- und Reproduktionsraten oder eine erhöhte Anfälligkeit für Krankheiten sein.

Der Fortpflanzungserfolg von Fischen wird durch Sterilität, eine reduzierte Anzahl von Keimzellen und ein geringeres Keimdrüsengewicht verringert. Wie beim Menschen ist auch bei Fischen und anderen Meerestieren die Anfälligkeit für Radioaktivität bei Embryos und Larven, sowie in schnell nachwachsenden Geweben besonders hoch (PARETT 1998).

Durch ionisierende Strahlung wird die Mutationsrate erhöht: Genschäden in lebensfähigen Individuen, die auch zur Fortpflanzung kommen, werden an die nächste Generation weitergegeben und können sich unter Umständen erst auf spätere Generationen auswirken.

Schließlich kann es beim Vorliegen mehrerer Schadstoffe, bzw. Umweltgifte zu Synergie-Effekten kommen. Die verschiedenen Schadstoffe wirken dabei so zusammen, dass ihr kombinierter Einfluss auf die Umwelt nicht einfach durch die Summe der individuellen Einflüsse vorhergesagt werden kann (LIBES 1992: 600-603). Im Strahlenschutz gilt der Grundsatz, dass jede Verdünnung das Problem vergrößert, da eine größere Fläche, bzw. Anzahl von Menschen betroffen ist.

Es ist schlichtweg falsch, wenn behauptet wird, dass verdünnte Dosen harmlos seien. „Low level effects“ wurden in der wissenschaftlichen Literatur nicht nur für Kinder nachgewiesen (CROMPTON et al. 1985). Biologisch relevante Auswirkungen sind auch dann von Bedeutung, wenn sie nicht im engeren Sinne statistisch signifikant sind. Da der Nachweis der spezifischen Auswirkungen erst nach Jahrzehnten mit belastbaren Daten belegt werden kann, sind umweltmedizinische Bedenken begründet.

Eine adäquate Umweltepidemiologie setzt voraus, dass die richtigen Parameter erhoben und ausgewertet werden. Das bedeutet, dass die geeigneten Isotope, geeignete Zielbevölkerungen und geeignete Prädiktoren, wie z.B. Chromosomenaberrationen oder stabile Mutationen, sowie die Endpunkte wie Krebs, Unfruchtbarkeit oder Mikrocephalie, in die Analysen eingehen müssen. Diese Analysen sind nicht nur in Japan und der engeren

Umgebung vorzunehmen, sondern auch in weiter entfernten Gebieten, wie z. B. in China, Sibirien, den pazifischen Inseln, oder den westlichen USA.

Jod-131 und der Verdünnungseffekt

In den Medien wird aus der relativ kurzen Halbwertszeit von Jod-131 und dem Verdünnungseffekt zum Teil die Schlussfolgerung gezogen, dass „derzeit keine Gefahr bestünde“:

„Viele Experten gehen jedoch davon aus, dass sich die Konzentration der radioaktiven Substanzen im Meer schnell verdünnt, so dass derzeit keine größere Gefahr für Mensch und Umwelt bestehe... Jod-131 hat eine Halbwertszeit von nur acht Tagen. Im Meer verdünnt sich die Konzentration radioaktiver Substanzen rasch. Daher droht trotz des hohen Strahlenwertes derzeit noch keine unmittelbare Gefahr für Pflanzen und Tiere vor der Küste“ (WELT 2011).

Tatsächlich verteilen sich lösliche Substanzen wie Jod-131 und Cäsium-137 im Meer schnell. Im Pazifik ist der Verdünnungseffekt aufgrund der Größe des Ozeans besonders stark. Dennoch kann angesichts der vagen Datenlage sicher keine Entwarnung für die betroffenen Küstenregionen gegeben werden. Die ausschließliche Betrachtung von Jod ist zudem irreführend. Auch Jod spielt aufgrund der enormen freigesetzten Mengen viel länger eine Rolle als nur einige Halbwertszeiten lang. Zudem wird immer noch weiteres Jod-131 freigesetzt. Auch wenn Jod-131 in den Messungen von Fischereiprodukten durch MAFF ab Juli nur noch in einzelnen Fällen in Seetang (*Eisenia bicyclis*) nachgewiesen wurde, werden Cäsium und andere strahlende Substanzen noch wesentlich länger von Bedeutung sein.

Selbst die japanische Regierung hatte Atomalarm für den Pazifik geschlagen und katastrophale Auswirkungen für den Ozean befürchtet, wenn verseuchtes Wasser weiterhin ins offene Meer strömt. Regierungssprecher Yukio Edano sagte Anfang April: *„Wir müssen die Ausbreitung so bald wie möglich stoppen. Wenn die gegenwärtige Lage mit der Anreicherung radioaktiver Substanzen über lange Zeit anhält, wird es riesige Auswirkungen auf den Ozean haben“ (FTD 2011).*

Faktisch besteht bereits eine gravierende Kontamination der Nahrungsketten und damit eine unmittelbare Gefahr für die Menschen:

1. Über Lecks und Risse gelangt weiterhin radioaktives Kühlwasser in das Grundwasser und in den Pazifik.
2. Die Kehrseite der Verdünnung ist die großräumige Verteilung.
3. Durch die "trophische Kaskade" reichern sich die Radionuklide in den Nahrungsketten von unten nach oben hin an.
4. Der Abbau findet ausschließlich über den radioaktiven Zerfall statt.

Handelsrestriktionen und Kontrollen

Einige Länder haben bereits ein Einfuhrverbot für Fisch aus Japan erlassen. Direkt nach der Reaktorkatastrophe hatte die EU mit einer Eilverordnung Grenzwerte für Lebensmittel aus Japan eingeführt, die sogar über den japanischen Grenzwerten lagen. Lebensmittel, die den in Japan gültigen Grenzwert überschritten, hätten also in der EU verkauft werden dürfen. Dieser Skandal wurde von

den Organisationen foodwatch und Umweltinstitut München in einer gemeinsamen Presseerklärung offen gelegt (FOODWATCH & UMWELTINSTITUT MÜNCHEN 2011). Nach zahlreichen Protesten öffentlicher Organisationen reagierte die EU mit einer Anpassung der meisten Grenzwerte an die Werte Japans. Eine erneute Anpassung wird sich ausdrücklich vorbehalten. Eine besondere Situation ergibt sich für Fisch: Zunächst galten alle EU-Regelungen nur für Waren mit „Herkunft oder Ursprung“ Japan. In japanischen Gewässern gefangener Fisch, angelandet in einem Hafen außerhalb Japans, wäre also nicht unter die Verordnung gefallen. Nach der Änderung gelten die EU-Bestimmungen unabhängig vom Ort der Anlandung auch für Fisch aus den am schwersten betroffenen 12 japanischen Präfekturen.

Mit der Festlegung solcher Grenzwerte wird von den Regierungen über die Zahl der Strahlenopfer in den Bevölkerungen Europas und Japans entschieden.

Für die den EU-Grenzwerten zufolge möglichen Belastungen von Kindern mit jeweils rund 80 Millisievert jährlich wird akzeptiert, dass etwa 400 bis 4.000 von 100.000 Kindern später jährlich dadurch zusätzlich an Krebs sterben werden. Für Erwachsene, die bei solcher Ernährung mit 33 Millisievert jährlich belastet werden, wären es noch 165 bis 1.650 von 100.000, die später zusätzlich jährlich an Krebs sterben. Dabei ist zu beachten, dass mit dem geltenden Dosiskonzept (effektive Dosis) lediglich die Krebstodesfälle berücksichtigt werden, nicht jedoch die Zahl der Erkrankungen, die höher ist (GSF 2011).

Der unabhängige Informationsdienst Strahlentelex empfiehlt als Grenzwert für feste Nahrungsmittel für Erwachsene maximal 8 Bq Cäsium-137 pro kg, wobei Cäsium als Leitnuclid dient. Allerdings sind Grenzwerte immer ein Kompromiss (DERSEE 2011).

Schlussfolgerungen

Das tatsächliche Ausmaß der radioaktiven Kontamination kann zum Zeitpunkt des Redaktionsschluss dieser Arbeit nur erahnt werden, denn die katastrophale Freisetzung von Radionukliden dauert an. Erst wenn die Brennelemente ausgebrannt sind und nur noch wenig Radioaktivität entweicht, kann die freigesetzte Gesamtaktivität abgeschätzt werden. Es muss davon ausgegangen werden, dass Fukushima alle bisherige Freisetzung von Radioaktivität um ein Vielfaches übertrifft.

Das Dilemma ist: Um noch Schlimmeres zu verhüten, müssen die geschmolzenen Kerne („Corium“) kontinuierlich mit Wasser gekühlt werden. Dadurch kann trotzdem kaum vermieden werden, dass diese sich durch den Reaktor-Druckbehälter und anschließend durch den Betonboden fressen. Andererseits fließt dieses verstrahlte Wasser in die Kraftwerksgebäude, ins Grundwasser und in den Pazifik, denn mehrere Sicherheitsbehälter und Abklingbecken sind beschädigt bzw. undicht.

Im Pazifik und auch an Land muss ein flächendeckendes Netz von unabhängigen Messstationen eingerichtet werden. Die Kontamination des Meerwassers, der Sedimente und der verschiedenen Meeresorganismen muss weiträumig und kontinuierlich überwacht werden. Es müssen alle relevanten Radionuklide bei kleinstmöglicher Nachweisgrenzen gemessen werden, nicht nur Jod und Cäsium.

Gefangener Fisch bedarf ebenso gründlicher Überwachung. Entsprechende Messungen müssen umfassend und langfristig stattfinden. Strengere Grenzwerte sind notwendig.

Die Festsetzung von Grenzwerten muss grundsätzlich nach medizinisch relevanten Kriterien und nicht nach wirtschaftlichen Interessen erfolgen. Allein die vielen Neubewertungen, Revisionen und Re-Evaluationen der Grenzwerte und ihre ständig wechselnden Berechnungsgrundlagen haben erwiesen, dass die bisherigen offiziellen Verlautbarungen über akute und chronische Effekte korrekturbedürftig gewesen sind. Das bisherige Management durch die Internationale Atomenergie-Organisation (IAEA) ist unzureichend, was nicht verwundert, steht doch die Aufdeckung von Effekten ihrem erklärten Ziel der Verbreitung und Förderung der Atomenergienutzung entgegen.

Die Verantwortung für diesen Super-GAU trägt die Atomindustrie.

Dieser kerntechnische Unfall zeigt erneut, dass eine Nicht-Fehler tolerante Technologie wie die Nukleartechnologie einen unermesslich hohen Schaden anrichten kann. Die wichtigste Schlussfolgerung ist daher, den Ausstieg aus der menschen- und lebensfeindlichen Kernenergie so schnell wie möglich zu vollziehen, um zu verhindern, dass es jemals wieder zu einer solchen Katastrophe für Mensch und Umwelt kommen kann.

Kontakt

Dipl.- Biol. Stephan Moldzio, Braunschweig
 Dipl.-Ing. Thomas Dersee, Berlin
 Dipl.-Agrarbiol. Dirk Zimmermann, Hamburg
 Prof. Dr.-Ing. Josef Lutz, Chemnitz
 Prof. Dr. rer. nat. Rolf Bertram, Braunschweig
 Prof. Dr. rer. nat. Anton Eisenhauer, Kiel
 Prof. Dr. med. Rainer Frenzel-Beyme, Bremen

Korrespondenz:

Stephan Moldzio
 Eschenburgstr. 6, 38106 Braunschweig
 moldzi@aol.com

Nachweise

ACRO - ASSOCIATION POUR LE CONTRÔLE DE LA RADIOACTIVITÉ DANS L'OUEST (2011): Evaluation on the environmental consequences in Japan of the Fukushima Nuclear Power Plant accident, analysis of matrices of the marine environment (seaweeds), Analysis Report, RAP110522-GPJ-01, 22.5.2011, Herouville-Saint-Clair, France [http://www.acro.eu.org/RAP110522-GPJ-01.pdf; letzter Zugriff: 29.9.2011].

ASAHI NEWS (2011a): Strontium detected in groundwater and sea around Fukushima plant, 14.6.2011, Tokyo, Japan [http://www.asahi.com/english/TKY201106130053.html; letzter Zugriff: 31.10.2011].

ASAHI NEWS (2011b): Radioactive strontium detected in Yokohama, 12.10.2011, Tokyo, Japan [http://ajw.asahi.com/article/0311disaster/fukushima/AJ2011101214200; letzter Zugriff: 31.10.2011].

CROMPTON, N.E.A., ZÖLZER, F., SCHNEIDER, E., KIEFER, J. (1985): Increased mutant induction by very low dose-rate gamma-irradiation, *Naturwissenschaften* 72: 439-440.

DERSEE, T. (2011): Empfehlungen zur Minimierung des Strahlenrisikos in Japan, *Strahlentelex* 582-583: 13.

FTD - FINANCIAL TIMES DEUTSCHLAND (2011): Japan schlägt Atomalarm für den Pazifik, 4.4.2011 [www.ftd.de/politik/international/atom-katastrophe-in-fukushima-japan-schlaegt-atomalarm-fuer-den-pazifik/60034869.html; letzter Zugriff: 18.8.2011].

GREENPEACE (2011): Fukushima: Algen stark radioaktiv belastet, 12.5.2011 [www.greenpeace.de/themen/atomkraft/presseerklarungen/artikel/fukushima_algen_stark_radioaktiv_belastet/; letzter Zugriff: 18.8.2011].

GSF - GESELLSCHAFT FÜR STRAHLENSCHUTZ e.V. (2011): Das Strahlenrisiko durch den Verzehr radioaktiv belasteter Nahrungsmittel nach der Reaktorkatastrophe von Fukushima, www.Strahlentelex.de vom 14.4.2011 [http://www.strahlentelex.de/Risikokalkulation_Europa_042011_dt.pdf; letzter Zugriff: 26.10.2011].

IAEA - INTERNATIONALE ATOMIC ENERGY AGENCY (2011): Assessment of IAEA environment laboratories on data from the marine environment provided by Japan, 19.4.2011 [www.

slideshare.net/iaea/fukushima-marine-environment-monitoring-19-april-2011, letzter Zugriff: 18.8.2011].

IPPNW – INTERNATIONALE ÄRZTE FÜR DIE VERHÜTUNG DES ATOMKRIEGES, GSF - GESELLSCHAFT FÜR STRAHLENSCHUTZ e.V. (Hrsg.) (2011): Gesundheitliche Folgen von Tschernobyl - 25 Jahre nach der Reaktorkatastrophe.

JOOSS, C., LUTZ, J., Offene Akademie, (13.4.2011): Zur Dimension der Reaktorkatastrophe in Fukushima [www.offene-akademie.org/?p=141; letzter Zugriff: 7.7.2011]. kann nicht geöffnet werden

LIBES, S.M. (1992): *An Introduction to Marine Biogeochemistry*, John Wiley & Sons, New Jersey.

LOVELAND, W.D., MORISSEY, D.J., SEABORG, G.T. (2006): *Modern Nuclear Chemistry*, Wiley Interscience, New Jersey.

MAFF - MINISTRY OF AGRICULTURE, FORESTRY AND FISHERIES (2011): Results of the inspection on radioactive materials in fisheries products, Tokyo, Japan
 - Press releases in March and April, 30.4.2011 [http://www.jfa.maff.go.jp/j/kakou/kensa/pdf/110430_data_sheet_jikeiretsu_en.pdf]
 - Press releases in May, 2.6.2011 [http://www.jfa.maff.go.jp/e/inspection/pdf/201105_kekka_en.pdf]
 - Press releases in June, 3.8.2011 [http://www.jfa.maff.go.jp/e/inspection/pdf/1106_kekka_en.pdf]
 - Press releases in July, 3.8.2011 [http://www.jfa.maff.go.jp/e/inspection/pdf/110803_kekka_7.pdf]
 - Press releases in August, 4.10.2011 [http://www.jfa.maff.go.jp/e/inspection/pdf/111012_kekka_8.pdf]
 - Press releases in September, 4.10.2011 [http://www.jfa.maff.go.jp/e/inspection/pdf/111004_kekka_9.pdf; letzter Zugriff: 31.10.2011].

MEXT - MINISTRY OF EDUCATION, CULTURE, SPORTS, SCIENCE AND TECHNOLOGY (2011):
 - Readings at monitoring post around Fukushima Dai-ichi NPP (Dust, Soil and Environment), Tokyo, Japan [http://eq.wide.ad.jp/monkasho_en/misc_en.html].
 - Readings of Pu & U at monitoring post out of 20&30 Km zone of Fukushima Dai-ichi NPP, Tokyo, Japan [http://eq.wide.ad.jp/files_en/110401pu_en.pdf].
 - Readings of sea area monitoring at post out of Fukushima Dai-ichi NPP, 1.5.2011, Tokyo, Japan [http://eq.wide.ad.jp/files_en/110501ocean_en.pdf].
 - Radioactivity concentration in marine soil, 12.6.11, Tokyo, Japan [http://eq.wide.ad.jp/files/110612ocean.pdf].
 - Readings of environmental radiation monitoring (ports and marine fishing grounds) in Fukushima (Preliminary Report), 11.8.2011, Tokyo, Japan [http://radioactivity.mext.go.jp/en/monitoring_by_Fukushima_seawater_marine_soil/2011/08/1520_0811.pdf; letzter Zugriff: 26.10.2011].

NOAA - NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION (2007): North Pacific Ocean Currents, Washington, USA [http://www.pmel.noaa.gov/np/pages/seas/npmap4.html; letzter Zugriff: 13.9.2011].

NSF - NATIONAL SCIENCE FOUNDATION (2011): After Japan Nuclear Power Plant disaster: how much radioactivity in the oceans? Press Release 11-100, 18.5.2011, Arlington, USA [www.nsf.gov/news/news_summ.jsp?cntn_id=119577&org=NSF&from=news; letzter Zugriff: 18.8.2011].

PARETT, A. (1998): Pollution impacts on North Sea fish stocks, European Commission, Directorate General XIV - Fisheries. Ref: 96-083.

SOMMER, U. (1998): *Biologische Meereskunde*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.

TEPCO (2011a): Result of contamination check of water in the basement at the turbine building of each unit 2 of Fukushima Daiichi Power Station [http://www.tepco.co.jp/en/press/corp-com/release/betu11_e/images/110327e15.pdf; letzter Zugriff: 26.10.2011]

TEPCO (2011b): The results of nuklide analysis on the ocean soil, 3.5.2011, Tokyo, Japan [http://www.tepco.co.jp/en/press/corp-com/release/betu11_e/images/110503e3.pdf; letzter Zugriff 18.8.2011].

FOODWATCH, UMWELTINSTITUT MÜNCHEN (2011): Grenzwerte für radioaktive Belastung von Lebensmitteln aus Japan erhöht – Bundesregierung informiert Öffentlichkeit nicht, Presseerklärung, 29.3.2011, Berlin, München [www.foodwatch.de/presse/pressearchiv/2011/atom_katastrophe_in_japan/index_ger.html; letzter Zugriff: 18.8.2011].

UK MARINE (2011): Radioactive substances, Entry to the marine environment, London [http://www.ukmarinesac.org.uk/activities/water-quality/wq8_49.htm#a1; letzter Zugriff: 26.10.2011].

VINTRO, L.L., SMITH, K.J., LUCEY, J.A. and MITCHELL, P.I. (2000): The environmental impact of the Sellafield discharge, Department of Experimental Physics, University College Dublin, Belfield, Dublin 4, Ireland [http://homepage.eircom.net/~radphys/scope.pdf; letzter Zugriff: 26.10.2011].

WELT (2011): Die Atomruine Fukushima verseucht den Pazifik, 27.3.2011 [www.welt.de/vermischtes/weltgeschehen/article12974502/Die-Atomruine-Fukushima-verseucht-den-Pazifik.html; letzter Zugriff: 18.8.2011].

ZAMG - ZENTRALANSTALT FÜR METEOROLOGIE UND GEODYNAMIK (2011a): Unfall im japanischen Kernkraftwerk Fukushima, Update: 26. März 2011 10:00, Wien [www.zamg.ac.at/aktuell/index.php?seite=7&artikel=ZAMG_2011-03-26GMT09:11; letzter Zugriff: 18.8.2011].

ZAMG - ZENTRALANSTALT FÜR METEOROLOGIE UND GEODYNAMIK (2011b): Unfall im japanischen Kernkraftwerk Fukushima, Update: 03. April 2011 12:00, Wien [www.zamg.ac.at/aktuell/index.php?seite=6&artikel=ZAMG_2011-04-03GMT10:11; letzter Zugriff: 13.9.2011].