

Fukushima Daiichi: Eintrag radioaktiver Stoffe ins Meer

Hartmut Nies

Vor vier Jahren kam es im japanischen Kernkraftwerk Fukushima Daiichi infolge eines katastrophalen Tsunamis zu einem schweren Unfall. Große Mengen radioaktiver Stoffe gelangten in den pazifischen Ozean. Welche Folgen hatte die Kontamination des Meeres und was sind die längerfristigen Auswirkungen?

◆ Nach Explosion der Reaktorgebäude 1, 3 und 4 von Fukushima Daiichi sowie den schweren Schäden am Druckbehälter von Reaktor 2 wurden große Mengen radioaktiver Stoffe in die Umwelt freigesetzt. Über mehrere Wochen gelangten radioaktive Partikel in die Atmosphäre und bis heute ins Grundwasser. Auch das Meer wurde kontaminiert: großräumig über die Atmosphäre sowie über direkte Einträge und Einleitungen durch die Versuche, die Reaktoren mit Meerwasser von außen zu kühlen. Die Meeresströmungen im Nordpazifik zeigt Abbildung 1.

Sehr schnell etablierte das japanische Ministerium für Bildung, Kultur, Sport, Wissenschaft und Technologie (Mext) ein marines Monitoringprogramm, das dem Unternehmen Tepco, dem Betreiber von Fukushima Daiichi, auferlegt wurde. Nach dem ersten Meeresmonitoringplan vom 22. März 2011 sollten Meerwasser, Dosisleistung und Aerosolaktivität auf einer Nord-Süd-Sektion in etwa 30 km Abstand von der Küste analysiert werden. Im Oktober 2011 stellte Mext einen umfangreicheren Plan für das Meeresmonitoring auf. Beteiligt waren die Fischereibehörde, die japanische Küstenwache, das japanische meteorologische Amt, das Umweltministerium, die örtliche Verwaltung und Tepco. In den

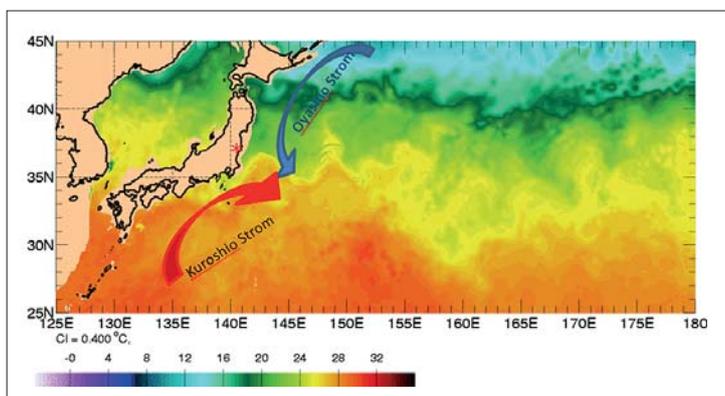


Abb. 1. Die Oberflächentemperaturverteilung (SST-Modell) im Nordpazifik mit dem warmen Kuroshio-Strom und dem kalten Oyashio-Strom von Norden. Deutlich ist die Wirbelbildung in Höhe des 30ten bis 35ten Breitengrads zu sehen mit der entsprechenden Ostdrift der Wassermassen. Die Lage des Kernkraftwerkes Fukushima Daiichi ist durch einen roten Stern angegeben.

Quelle: Naval Research Laboratory der US-Marine

Folgejahren wurde das Monitoring jeweils zum Haushaltsjahr aktualisiert. Dieses Monitoring bestimmt die Häufigkeit und Position der zu entnehmenden Proben jeweils im Abstand bis zu 2 km um das Kraftwerk Fukushima Daiichi, im Bereich 2 bis 20 km von der Küste, zwischen 20 bis 100 km im Küstenbereich der Präfekturen Miyagi (nördlich), Ibaraki und Chiba (südlich) sowie im küstenfernen Seegebiet mit mehr als 100 bis 200 km Abstand östlich von der Küste.

Seit Gründung der neuen und jetzt weitgehend unabhängigen japanischen Atomaufsichtsbehörde im September 2012 veröffentlicht diese regelmäßig Daten über die

Umweltradioaktivität.¹⁾ Auch die Internationale Atomenergie-Organisation informiert regelmäßig

◆ QUERGELESEN

- » Aus Sicht des Strahlenschutzes stellt der Pfad „Meerwasser – Meeresfauna – Meeresfrüchteverzehr“ kein großes Problem dar. Die langfristig in Proben aus dem Meer zu erwartenden Konzentrationen von ¹³⁴Cs bzw. ¹³⁷Cs und damit auch in Fisch und anderen Fischereiprodukten lassen keine unzulässig hohe Strahlenexposition selbst in Japan erwarten.
- » Das Kühlwasser für die Reaktoren sowie hochkontaminiertes Grundwasser wurde in großen Tanks gelagert; die Frage der Entsorgung ist nach wie vor nicht gelöst.

über die Situation in der Umwelt und an den Reaktoren.²⁾

Radionuklide im Meer

◆ Für das Meer sind nur die Radionuklide ^{134}Cs und ^{137}Cs aufgrund ihrer längeren Halbwertszeit von zirka 2 bzw. 30 Jahren und freigesetzten Aktivitätsmenge von Be-

deutung. In den ersten Wochen spielte auch ^{131}I eine große Rolle, da dieses in vielen Algenarten, etwa Braunalgen stark akkumuliert. In den ersten Wochen und Monaten nach dem Unfall waren die Konzentrationen der drei Isotope im Meerwasser in der Umgebung der Anlage Daiichi sehr hoch und betragen bis $10^5 \text{ Bq}\cdot\text{L}^{-1}$. Aufgrund der

abnehmenden Eintragsraten und der starken Verdünnung im Ozean gingen die Werte in den folgenden Monaten stark zurück (Abbildungen 2 und 3).

Erstaunlich war, dass das mit einer Halbwertszeit von acht Tagen relativ kurzlebige ^{131}I selbst noch im Juli 2011 freigesetzt und im Meer nachzuweisen war. Erwartet wurde, dass nach Freisetzung der leichter flüchtigen Nuklide das Aktivitätsverhältnis von ^{131}I zu ^{134}Cs und ^{137}Cs innerhalb kurzer Zeit stark abnehmen sollte. Dies war jedoch nicht der Fall. Dies könnte auf eine eventuell damals noch aktuelle Spaltaktivität in den oder einer der Reaktoren hinweisen.

Neben diesen drei flüchtigen Radionukliden wurden zahlreiche weitere Radionuklide nachgewiesen, allerdings spielte deren Beitrag für eine mögliche Strahlenexposition kaum eine Rolle. Zu erwähnen sind insbesondere Tritium und ^{90}Sr . In geringen Konzentrationen nachweisbar waren weitere Spalt- und Aktivierungsprodukte wie die Plutoniumisotope 238, 239, 240 und 241, flüchtige Elemente wie ^{136}Cs , die Te-Isotope 129m, 129, 132, oder gering volatile Isotope wie $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$, ^{89}Sr , $^{95}\text{Nb}/\text{Zr}$, $^{110\text{m}}\text{Ag}$, ^{125}Sb , $^{140}\text{Ba}/\text{La}$ und ^{141}Ce und ^{144}Ce .³⁻⁵⁾ Diese Nuklide sind jedoch für eine Risikoabschätzung zur Strahlenexposition über den Meeresspfad unbedeutend. Lediglich das Isotop $^{110\text{m}}\text{Ag}$ wurde in einigen Proben an Meeresfischen nachgewiesen, in allen Fällen jedoch in deutlich geringerer Konzentration als die Cs-Isotope.⁶⁾

Buesseler et al. verglichen einige Zeitreihen der Messungen an mehreren Probennahmestellen nahe Fukushima Daiichi im Meerwasser mit Zeitreihen aus der Ostsee und dem Schwarzen Meer seit 1960, wo nach dem Unfall in Tschernobyl 1986 die höchsten Konzentrationen an ^{137}Cs nachzuweisen waren (Abbildung 4, S. 528).⁷⁾

Mehrere Autoren versuchten den Eintrag von ^{134}Cs , ^{137}Cs und ^{131}I aus der Atmosphäre abzuschätzen und daraus die Deposition in

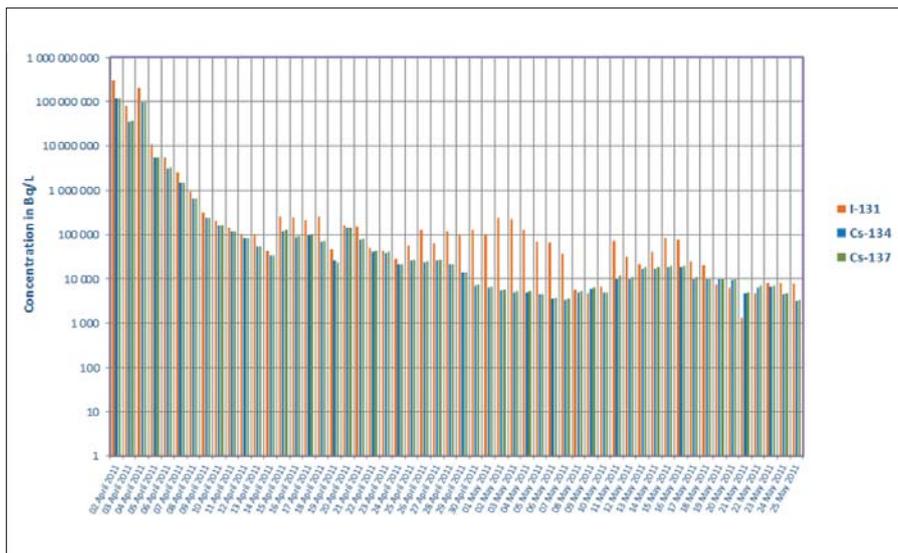


Abb. 2. Zeitlicher Verlauf der Konzentration von ^{134}Cs , ^{137}Cs und ^{131}I an der Einleitungsstelle des Reaktors Nr. 2 (Probennahmestelle siehe Abbildung 3) in $\text{Bq}\cdot\text{L}^{-1}$ ab 2. April bis Ende Mai 2011.²⁾

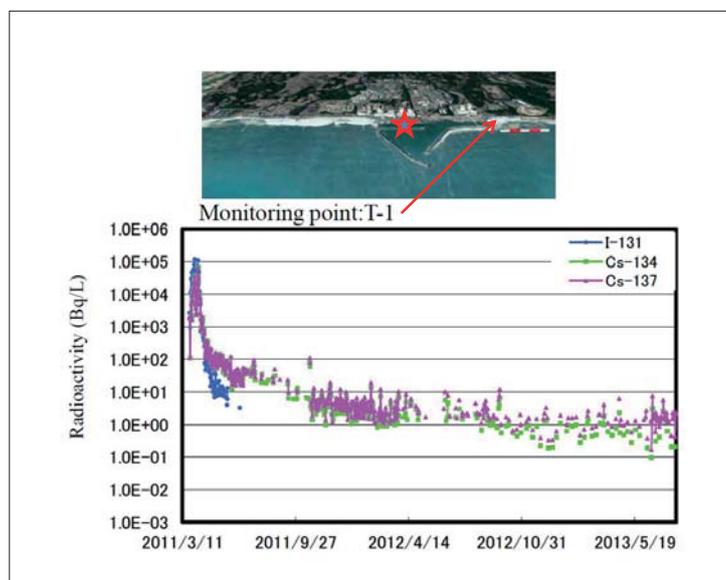


Abb. 3. Zeitlicher Verlauf der Aktivitätskonzentration von ^{137}Cs , ^{134}Cs und ^{131}I an der nördlichen Probennahmestelle T-1 am Kühlwasserausfluss (2 m unter dem Meeresspiegel) über den Zeitraum Ende März 2011 bis Mai 2013. Deutlich sind die hohen aquatischen Ableitungen und die daraus folgenden hohen Konzentrationen dieser drei Radioisotope in den ersten Monaten nach dem Unfall zu erkennen. Die Konzentration umfasst auf der logarithmischen Skala fünf Größenordnungen bis zu $10^5 \text{ Bq}\cdot\text{L}^{-1}$ für ^{134}Cs und ^{137}Cs im April/Mai 2011 bis um $1 \text{ Bq}\cdot\text{L}^{-1}$ ab Mitte 2012.²¹⁾

◆ Ergebnisse des Lebensmittelmonitorings nach dem Reaktorunfall von Fukushima

Nachrichten aus der Chemie: Nach Fukushima wurden Lebensmittel in ganz Japan auf Radioaktivität getestet – bis heute etwa 900 000 Proben. Dieser Datensatz ist online, und Sie haben ihn zusammen mit Stefan Merz von der TU Wien und Katsumi Shozugawa von der Universität Tokio ausgewertet (Environ. Sci. Technol. 2015, doi: 10.1021/es5057648).

Georg Steinhauser: Ja, allerdings haben wir eine Auswahl getroffen, denn man kann 900 000 Daten unmöglich auf einmal diskutieren. Insgesamt waren knapp 140 000 Datensätze in unserem Fokus. Wir haben uns drei Lebensmittelkategorien angesehen: eine vegetarische mit Gemüse/Früchten/Pilzen/Seetang, dann eine Kategorie mit Fleisch und Eiern sowie die Kategorie Trinkwasser. Trinkwasser ist allerdings kaum der Rede wert, da es so wenig belastet war.

Nachrichten: Fisch fehlt – erstaunlich, gehört Japan doch zu den Nationen mit dem höchsten Fischkonsum der Welt.

Steinhauser: Dieser Kategorie werden wir uns in künftigen Arbeiten widmen. Für unsere erste Studie wollten wir uns auf die Kategorien mit höheren Belastungslevels konzentrieren, und Gemüse oder Fleisch waren in mancherlei Hinsicht spektakulärer als Fisch. Ein weiterer Grund war, dass wir in unserer Studie die Lebensmittel nach Herkunftsregionen getrennt diskutieren haben. Darüber hat man bei wild lebenden Fischen aufgrund ihrer Mobilität keine Kontrolle.

Nachrichten: Welche Ergebnisse fanden Sie?

Steinhauser: Wir haben uns zuerst die Radiocäsiumbelastung im ersten Jahr nach dem Unfall angesehen. Insgesamt überschritten japanweit 0,9 Prozent der gemessenen Proben die Grenzwerte, in der Präfektur Fukushima waren es 3,3 Prozent. In der letzten Beobachtungsperiode vom 1. April

2014 bis 31. August 2014 waren es dann japanweit 0,2 Prozent, in der Präfektur Fukushima 0,6 Prozent. Bei der vegetarischen Kategorie waren die Aktivitäten zu Beginn der Messkampagne sehr hoch; das Maximum in der Datenbank hatte eine Probe des japanischen Blattgemüses Kukatichina aus der Präfektur Fukushima. Es lag bei $82\,000\text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ – sehr hoch im Vergleich zum damaligen Grenzwert von $500\text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$. Binnen eines Monats fielen die maximalen Werte um mehr als eine Größenordnung, und auch danach fielen die Höchstwerte weiter rasch ab – bis dann etwa Mitte Juli 2011 keine Probe mehr den Grenzwert überschritt.

Nachrichten: Ab Mitte August stiegen die maximalen Werte aber wieder deutlich an. Was war der Grund?

Steinhauser: Die Pilzsaison hatte begonnen, und Pilze sind Cäsiumakkumulatoren. Ende Oktober war dieser Spuk wieder vorüber, Mitte November wurden jedoch wieder einige Überschreitungen gemeldet: Das war der Zeitpunkt, als getrocknete Pilze und andere getrocknete Produkte wie Tee in den Verkauf kamen.

Nachrichten: Warum Tee?

Steinhauser: Die Teepflanze hat eine radioökologische Besonderheit: Sie nimmt Cäsium über die alten Blätter auf und transferiert es in die jungen Blätter, die dann geerntet und zu Tee verarbeitet werden. Deshalb hat Tee nur im ersten Jahr – als das Cäsium direkt auf die Blätter niedergereget ist – die Grenzwerte überschritten, danach nie wieder.

Nachrichten: Wie sah es bei den tierischen Produkten aus?

Steinhauser: Diese zeigen ein anderes Muster. Es dauert Monate bis die Tiere relevante Mengen Radiocäsium über die Nahrung aufgenommen haben und in die Muskelmasse einbauen. Ab Frühsommer 2011 kam es dann aber ebenfalls zu Grenzwertüberschreitun-

gen. Zu Beginn war es ausschließlich Rindfleisch, das im Juli 2011 einen Peak bei den Radiocäsiumaktivitäten mit Grenzwertüberschreitungen verursachte. Diese Werte fielen im August dann rasch wieder ab.

Ähnlich wie beim Gemüse gab es aber auch beim Fleisch einen späteren zweiten Peak. Ursache waren Wildschweine: Diese ernähren sich bevorzugt von cäsiumreicher Nahrung, unter anderem von Pilzen und Regenwürmern. Auch anderes Wild ist davon betroffen: Rotwild und asiatische Schwarzbären, die in Japan ebenfalls auf dem Speiseplan stehen. So stiegen ab September 2011 die Werte wieder an, und es gab auch Grenzwertüberschreitungen. Diese Periode dauerte bis in den März 2012.

Nachrichten: Eine solch große Messkampagne bedarf doch einiger Logistik, Geräte und Personal. Wie konnten die Japaner so schnell die nötigen Kapazitäten schaffen?

Steinhauser: Das konnten sie gar nicht, deshalb ging man gestuft vor. Bis in den Sommer 2011 wurden fast alle Ressourcen in Fukushima selbst eingesetzt, die Messkampagne für tierische Produkte außerhalb der Präfektur Fukushimas begann erst danach. Vermutlich sind vor Beginn der Messungen Produkte, die Radiocäsiummengen oberhalb des Grenzwerts enthielten, auf den Markt gekommen. Und wahrscheinlich wurden die auch gegessen.

Nachrichten: Waren die Bemühungen Japans, seine Bevölkerung vor Strahlungsschäden zu schützen, dennoch erfolgreich?

Steinhauser: Im Großen und Ganzen ja. Die zulässige zusätzliche Jahresdosis von 1 Millisievert überschritten, wie sich in früheren Arbeiten anderer Arbeitsgruppen gezeigt hat, fast ausschließlich Personen, die ihre Lebensmittel selbst im Garten angebaut oder Pilze gesammelt haben.



Georg Steinhauser ist Professor für Radiochemie an der Colorado State University. Er ist Absolvent der TU Wien (Promotion 2005), wo er bis zu seinem Ruf in die USA die Radiochemie am Atominstitut leitete. Seine Arbeitsgebiete sind die nukleare Umweltanalytik und die Entwicklung nuklear-forensischer Methoden. Darüber berichtet er in diesen Nachrichten auf S. 563.

den Pazifik abzuleiten. Diese reichten für ^{134}Cs bzw. ^{137}Cs von knapp 2 PBq bis zu 28 PBq für die Zeit März bis Mai 2011.^{7,8)} Die Abschätzungen über die Höhe der Direkt-einleitungen von ^{134}Cs und ^{137}Cs in

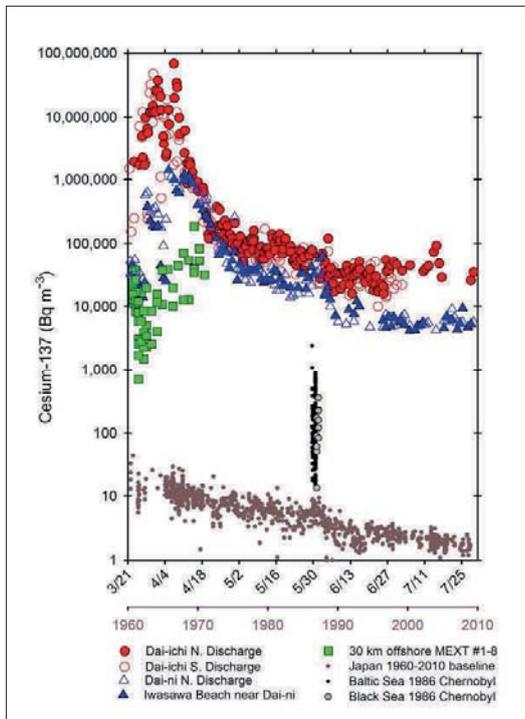


Abb. 4. Zeitreihen der Konzentration von ^{137}Cs an mehreren Probenahmestellen nahe Fukushima Daiichi verglichen mit Werten der Ostsee und des Schwarzen Meeres seit den 1960er Jahren mit den Auswirkungen nach dem Unfall in Tschernobyl 1986.⁷⁾ Werte in $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ ($\text{mBq}\cdot\text{L}^{-1}$).

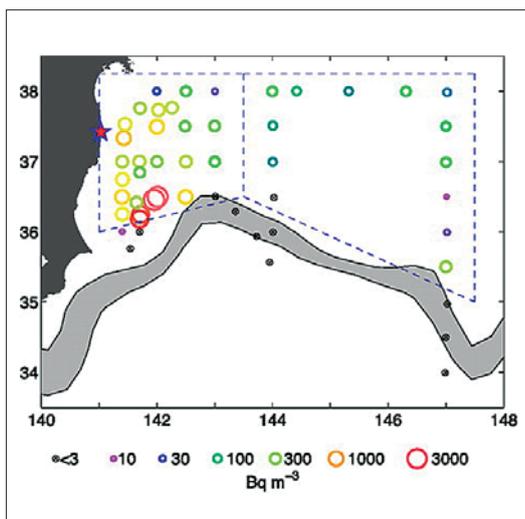


Abb. 5. Oberflächenkonzentration von ^{134}Cs und ^{137}Cs im Juni 2011 in $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$.⁶⁾ Das graue Band zeigt die Lage der Kuroshio-Strömung zum Zeitpunkt der Untersuchung mit dem Forschungsschiff Ka'imikai-o-Kanaloo.

die Küstengewässer weisen ebenfalls eine große Bandbreite auf und liegen zwischen 3,6 und 27 PBq bis etwa Juli 2011.^{6,9-12)} Diese Werte wurden sowohl aus Konzentrationsmessungen als auch aus Modellierungsergebnissen abgeleitet. Der wahrscheinlichste Wert liegt bei $3,5 \pm 0,7$ PBq. Aus den Monitoringergebnissen im Nahbereich lässt sich schließen, dass etwa 99 % des Eintrags aus in der Zeit vom 21. März bis 20. April 2011 stammt.

Monitoringergebnisse

◆ Neben den täglichen Probenahmen von Tepco im Nahbereich von Daiichi gab es weitere Messungen von mehreren Instituten im Auftrag der japanischen Regierung in kurzen Zeitabständen bis in zirka 200 km Entfernung von der Küste. In internationaler Kooperation leitete Ken Buesseler vom Woods Hole Oceanographic Institution im Juni 2011 eine Forschungsfahrt mit dem Forschungsschiff Ka'imikai-o-Kanaloo aus Hawaii, um die Kontamination großräumig zu untersuchen. Hierbei wurden sowohl Wasserproben als auch Biotaprobe in einem Raster bis etwa 560 km von der Küste analysiert.⁶⁾ Die höchsten Konzentrationen ergaben sich in südöstlicher Richtung mit bis zu $3 \text{ Bq}\cdot\text{L}^{-1}$ für ^{137}Cs und ^{134}Cs in etwa 100 bis 150 km Entfernung (Abbildung 5). Die Kontamination in großer Entfernung liegt eher an der Deposition kontaminierter Luftmassen als an der Verfrachtung kontaminierter Wassers in östliche Richtungen mit dem Kuroshio-Strom.

Die Kontamination innerhalb der Küstengewässer bis 200 km Abstand wird weiter untersucht. Die zeitliche Beprobung erfolgt dabei in Abständen von werktäglich bis monatlich. Als Beispiel seien Ergebnisse für den Nahbereich innerhalb von 2 km und von 20 km dargestellt. Die japanische Aufsichtsbehörde Nuclear Regulation Authority (NRA) veröffentlicht diese regelmäßig im Internet.¹³⁾ Die Konzentrationen im Nahbereich lagen

Ende 2013 für ^{134}Cs und ^{137}Cs deutlich unter $1 \text{ Bq}\cdot\text{L}^{-1}$ (Abbildung 6). Die genauere radiochemische Analyse (Abbildung 7, S. 530) liefert für die zweite Jahreshälfte 2013 Werte für ^{134}Cs und ^{137}Cs zwischen $0,005$ und $0,4 \text{ Bq}\cdot\text{L}^{-1}$.¹⁴⁾ Die NRA publiziert auch Ergebnisse der Analysen weiterer Radionuklide wie Tritium, Gesamt-Beta, ^{90}Sr , Gesamt-Alpha, ^{238}Pu -238 und ^{239}Pu / ^{240}Pu . Selbst Tritium weist Werte mit deutlich unter $1 \text{ Bq}\cdot\text{L}^{-1}$ auf, obwohl damit zu rechnen ist, dass insbesondere Tritium, das hochkonzentriert im kontaminierten Grundwasser auftritt, ins Meer einsickert, da es im Boden nicht zurückgehalten wird.

Sedimente

◆ Die Belastung der Sedimente wurde innerhalb eines Bandes bis zu 50 km Abstand bis zur 200-m-Isobathe vor der Küste der Präfekturen Ibaraki und Fukushima im Jahr 2012 systematisch untersucht.^{15,16)} Die Sedimentkerne wurden bis zu einer Tiefe von 14 cm entnommen. Hierbei wurden höhere Konzentrationen der oberflächensedimente eher in südlicher Richtung als im Norden der Reaktoranlage Daiichi gefunden. Dies weist darauf hin, dass die Meeresströmung die anfangs hohen Kontaminationen des Wassers zunächst eher in südliche Richtung transportierte. Wie erwartet sinken die Konzentrationen an ^{137}Cs und ^{134}Cs in den Sedimentkernen mit der Tiefe schnell. Die spezifische Aktivität hängt stark von der Korngröße der Sedimentpartikel auf den beprobten Stationen ab. Ebenfalls erwartungsgemäß treten die höchsten Konzentrationen in feinkörnigen Sedimenten auf. Die Oberflächen wiesen spezifische Aktivitäten bis zu $1000 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ (trocken) auf, und das Inventar bis etwa 10 cm Tiefe erreichte Werte zwischen $4000 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-2}$ und $30000 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-2}$. Diese Werte sanken allerdings stark mit zunehmendem Abstand von der Küste und mit zunehmender Wassertiefe.

Fisch und Fischereiprodukte

◆ Japan hat traditionell eine der höchsten Fisch- und Meeresfrüchte-Verzehrsraten der Welt: Im Jahr 2011 betrug diese 51,7 kg pro Person und Jahr (Deutschland: 15,2 kg pro Person im Jahr 2013).

Japan senkte im Jahr 2012 den Richtwert für den Verzehr von Lebensmitteln von zuvor $500 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ für ^{137}Cs (+ ^{134}Cs) auf $100 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$. Die kommerzielle Fischerei vor der Küste der Präfektur Fukushima innerhalb eines Radius von 20 km wurde untersagt, um auszuschließen, dass Fisch mit einer höheren Belastung als $100 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ auf den Markt gelangt.

Immer wieder machten hohe Werte im Fisch Schlagzeilen in der Presse. Allerdings waren diese Fische meist bodenlebende Arten und wurden im Nahbereich oder sogar innerhalb des Vorhafens des Kraftwerks gefangen. Vereinzelt ergaben die Messungen Werte von einigen $100\,000 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$, insbesondere für Grönling oder Stachelköpfe.

Insgesamt ergab jedoch die Überwachung der Fischkontamination, dass die Zahl der Fische, die mit über $100 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ belastet

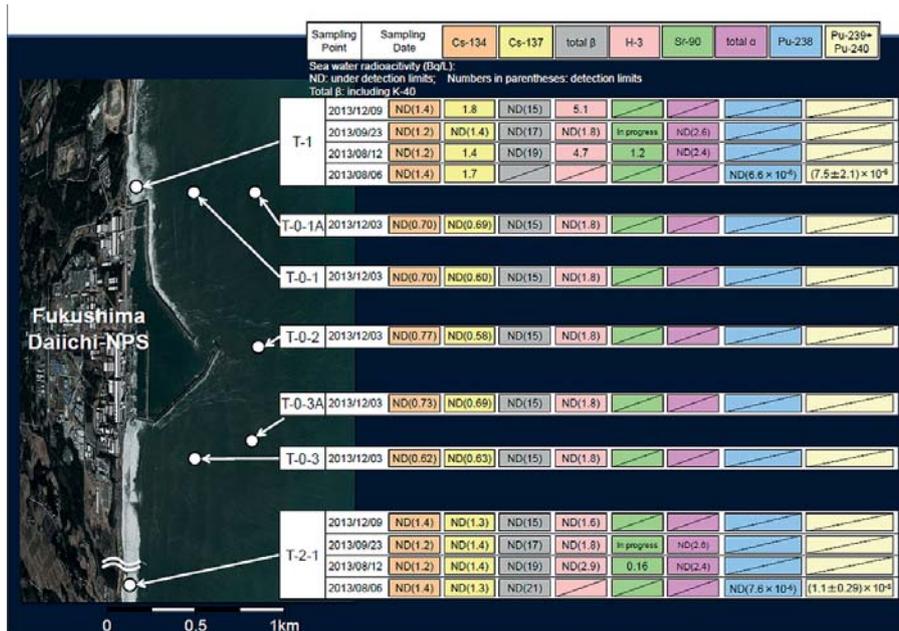


Abb. 6. Monitoringergebnisse aus der Überwachung des Meerwassers im Nahbereich der Reaktoren von Fukushima Daiichi bis 2 km Entfernung für Ende Dezember 2013.²²⁾

waren, seit 2011 deutlich zurückgegangen ist. Außerhalb der Sperrzone von 20 km Umkreis liegen die Werte meist deutlich darunter, meist sogar unter $10 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ für ^{137}Cs und ^{134}Cs . Bis Dezember 2013 wurden aus küstennahen Gewässern der Fukushima-Präfektur mehr als 15 000 Fischproben und

Fischereiprodukte analysiert. Davon wiesen zirka 2000 Proben Werte über $100 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ auf. In anderen Gebieten an der Ostküste Japans wurden erheblich weniger Überschreitungen der Grenzwerte gefunden. Insgesamt wurden hier mehr als 21 000 Proben untersucht, von denen 174 Proben mit mehr als

Einkaufen per Klick Reichelt Chemietechnik

www.rct-online.de

- **Schneller Zugriff auf 80.000 Artikel**
- **Produktgruppe THOMAFLUID®**
Schläuche, Fittings, Hähne, Magnetventile, Pumpen
- **Produktgruppe THOMAPLAST®**
Laborplastik, Halbzeuge, Schrauben, Muttern, Distanzhülsen und O-Ringe
- **Produktgruppe THOMADRIVE®**
Antriebstechnik mit Rollenketten, Kettenrädern, Zahnriemen



**Reichelt
Chemietechnik
GmbH + Co.**

Englerstraße 18
D-69126 Heidelberg
Tel. 0 62 21 31 25-0
Fax 0 62 21 31 25-10
rct@rct-online.de



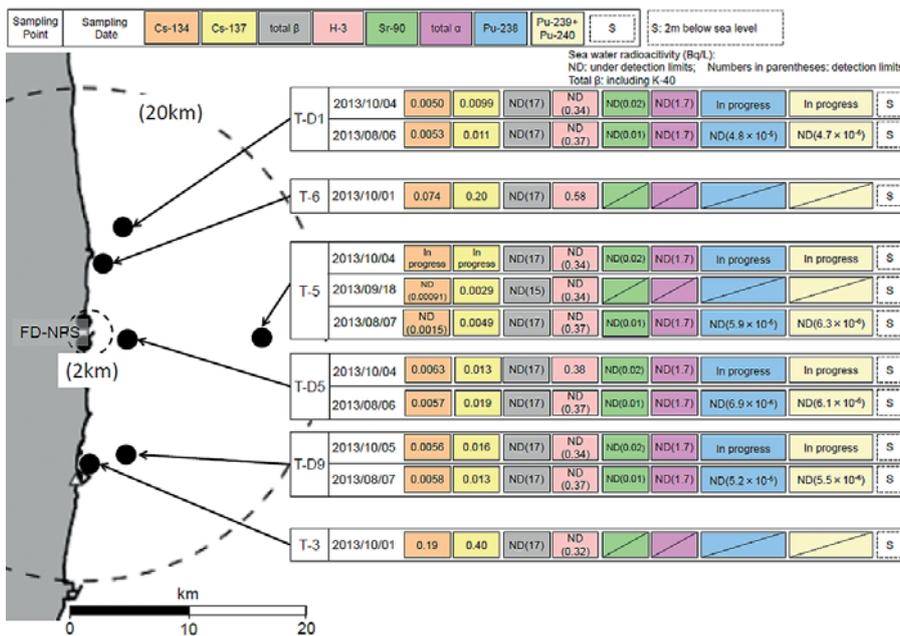


Abb. 7. Monitoring-Ergebnisse aus der Überwachung des Meerwassers im Nahbereich von Fukushima Daiichi bis 20 km Entfernung, publiziert Ende Dezember 2013.²³⁾

100 Bq·kg⁻¹ für ¹³⁷Cs und ¹³⁴Cs kontaminiert waren.

Aus Sicht des Strahlenschutzes ist der Pfad Meerwasser – Meeresfauna – Meeresfrüchteverzehr somit kein großes Problem, auch wenn er in den Medien immer wieder zu Schlagzeilen führt. Die langfristig zu erwartenden Konzentrationen in den Meeressproben für ¹³⁴Cs und ¹³⁷Cs und damit auch in Fisch und anderen Fischereiprodukten lassen keine unzulässig hohe Strahlenexposition in Japan erwarten.

Management kontaminierten Wassers

◆ Nach dem Ausfall der Kühlpumpen am 11. März 2011 musste die Kühlung der Fukushima-Reaktoren mit Notmitteln aufrechterhalten werden, was jedoch nur

◆ Der Nuklearunfall in Fukushima

Das aus sechs Reaktoren bestehende Kernkraftwerk Fukushima Daiichi (Fukushima I) liegt direkt an der Küste zum Pazifischen Ozean und nutzte das Meerwasser als Kühlwasser. Nach einem Tsunami als Folge eines verheerenden Erdbebens²⁰⁾ am 11. März 2011 fiel die Kühlung der Reaktoren 1 bis 4 aus. Zum Zeitpunkt des Bebens befand sich der Kernbrennstoff in Reaktor 4 nicht im Reaktordruckbehälter, sondern in den Abklingbecken. In den folgenden Tagen kam es zu einer Kernschmelze in den Reaktoren 1 bis 3 und durch Wasserstoffbildung in den Reak-

torgebäuden 1, 3 und 4 zu Knallgasexplosionen, bei denen die Gebäude zerstört wurden. Dies setzte massiv radioaktive Stoffe in die Atmosphäre frei. Notdürftig wurden die Reaktoren von außen mit Meerwasser gekühlt, sodass radioaktiv kontaminiertes Wasser unkontrolliert ins Meer gelangte. Als Folge der Freisetzung von Radionukliden in die Atmosphäre wurde die Meeresoberfläche auch durch Deposition der Aerosolpartikel im gesamten Nordpazifik kontaminiert. Die radioaktive Wolke war bis Europa nachweisbar.

zum Teil gelang. Hierbei wurde zunächst Süßwasser eingesetzt. Als dieses nicht mehr ausreichend zur Verfügung stand, nahm man auch Meerwasser, das erhebliche Korrosionsschäden an den Anlagen verursachte. Zudem wurde dieses Kühlwasser stark kontaminiert und sickerte in den Boden oder floss in den Ozean. Tepco erhielt bald die Auflage, das ungehinderte Abfließen des kontaminierten Wassers zu verhindern und dieses in Tanks auf dem Kraftwerksgelände zu lagern. Dazu installierte Tepco zahlreiche Tanks mit bis zu 500 m³ Fassungsvermögen (Abbildung 8).

Zusätzlich durchfließen das Kraftwerksgelände täglich 300 bis 400 m³ Grundwasser von den weiter westlich gelegenen Bergen. Die Beprobung des Grundwassers ergab in den Folgejahren bis heute eine hohe Konzentration mit Tritium, ⁹⁰Sr und Radiocäsium. Maßnahmen, um das Grundwasser sowie das in Tanks gelagerte Wasser über ein Advanced Liquid Processing System (ALPS) mit dem mineralischen natürlichen zeolithischen Ionenaustauscher Klinoptilolith von ⁹⁰Sr und Cäsium zu befreien, erwiesen sich als unzureichend, da die Anlage oft ausfiel.¹⁷⁾

Eine Expertenkommission empfahl weitere Maßnahmen, um die Kontamination des Grundwassers zu reduzieren und unkontrolliertes Einleiten und Einsickern ins Meer zu verhindern. Als Maßnahmen wurde unter anderem eine Eiswand im Boden bis in 30 m Tiefe hydrostatisch oberhalb der Reaktoren auf dem Gelände konzipiert, die bis Ende April 2015 errichtet sein soll. Solche Eismauern sind für kürzere Zeiten im Tunnelbau üblich, ob allerdings dieses Verfahren in dieser Größenordnung über mehrere Jahre erfolgreich sein wird, bleibt abzuwarten. Eine weitere Maßnahme war, das noch nicht kontaminierte Grundwasser abzupumpen, bevor es den Bereich der Reaktoren erreicht und es dann direkt ins Meer zu leiten.^{18,19)}

Die auf dem Gelände gelagerten und hoch kontaminierten Wasser-

massen bleiben ein Problem. Auf lange Sicht muss dieses Wasser dekontaminiert und in den Ozean eingeleitet werden. Im Gegensatz zu Radiocäsium und ^{90}Sr lässt sich Tritium durch den ALPS-Prozess allerdings nicht entfernen. Tritium reichert sich jedoch nicht in Meeresorganismen an, hat eine geringe Retentionszeit in Organismen und ist im Vergleich zu anderen Radionukliden erheblich weniger radioaktiv. Aus Sicht der Optimierung des Strahlenschutzes ist die Einleitung dieses Wassers ins Meer somit die bessere Option als die langzeitige Lagerung auf dem Kraftwerksge-
 lände mit immer wieder auftretenden Leckagen und Eindringen in den Boden und ins Grundwasser.

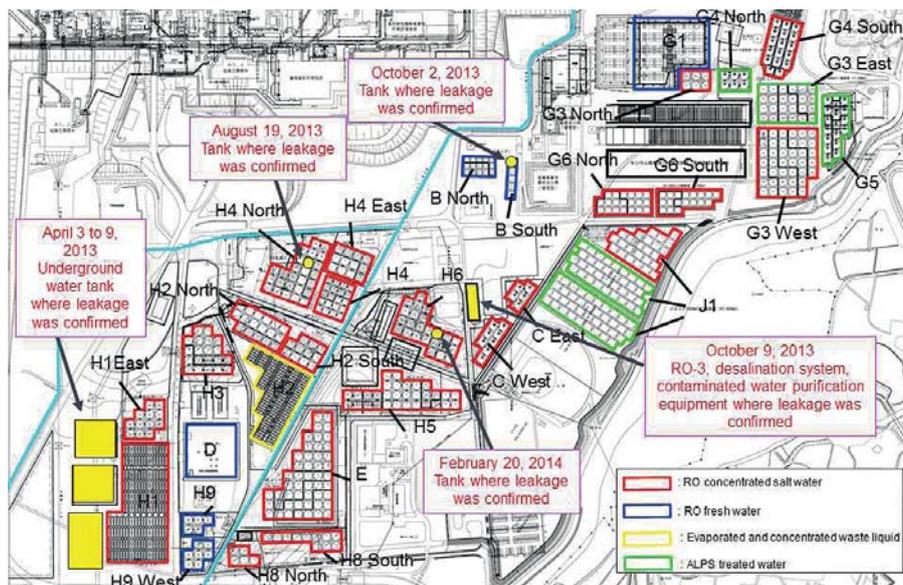


Abb. 8. Situation der Wassertanks auf dem Kraftwerksge-
 lände im Frühjahr 2014. Die Leckagen aus den Wasser-
 tanks zu verschiedenen Zeiträumen sind hier einzeln angegeben.²⁴⁾

Literatur

- 1) www.nsr.go.jp/english
- 2) IAEA Website zu Fukushima: www.iaea.org/newscenter/news/2013/japan-basic-policy-full.html
- 3) T. Yamamoto, J. Nucl. Sci. Technol. 2012, 49, 1116–1133.
- 4) P. P. Povinec, K. Hirose, M. Aoyama, Environ. Sci. Technol. 2012, 46, 10356–10363.
- 5) G. Steinhauser, Environ. Sci. Technol. 2014, 48, 4649–4663.
- 6) K. O. Buesseler, S. R. Jayne, N. S. Fisher et al., Proc. Nat. Acad. Sci. USA 2012, 109, 5984–5988.

- 7) K. O. Buesseler, M. Aoyama, M. Fukasawa, Environ. Sci. Technol. 2011, 45, 9931–9935.
- 8) A. Stohl, P. Seibert, G. Wotawa et al., Atmos. Chem. Phys. 2012, 12, 2313–2343.
- 9) P. Bailly Du Bois, P. Laguionie, D. Boust, I. Korsakissok, D. Didier, B. Fiévet, J. Environ. Radioact. 2012, 114, 2–9.
- 10) IRSN, 2011: www.irsn.fr/en/news/documents/irsn_fukushima-accident_impact-on-marine-environment-en_20110513.pdf
- 11) M. Aoyama, D. Tsumune, Y. Hamajima, J. Radioanal. Nucl. Chem. 2013, 296, 535–539.
- 12) M. C. Honda, T. Aono, M. Aoyama et al., Geochem. J. 2012, 46, e1–e9
- 13) www.nsr.go.jp/english/f1issues/index.html
- 14) http://radioactivity.nsr.go.jp/en/contents/8000/7767/24/Sea_Area_Monitoring%2820131224%29.pdf
- 15) S. Otsuka, T. Kobayashi, Environ. Monit. Assess. 2013, 185, 5419–5433.
- 16) D. Ambe, H. Kaeriyama, Y. Shigenobu et al., J. Environ. Radioact. 2014, 138, 264–275.
- 17) Pressemitteilung Tepco vom 16. Juli 2013. www.tepco.co.jp/en/nu/fukushima-np/handouts/2013/images/handouts_130329_01-e.pdf
- 18) Pressemitteilung Tepco vom 16. Juli 2013. www.tepco.co.jp/en/nu/fukushima-np/water/13071601-e.html
- 19) Pressemitteilung Tepco vom 20. Mai 2014. www.tepco.co.jp/en/press/corp-com/release/2014/1236544_5892.html
- 20) K. Koketsu, Y. Yokota, N. Nishimura et al. Earth Planet. Sci. Lett. 2011, 310, 480–487.
- 21) <http://radioactivity.nsr.go.jp/en/contents/8000/7742/24/engan.pdf>. (Weitere zeitliche Trends für verschiedene Probennahmestellen sind hier ebenfalls angegeben).
- 22) http://radioactivity.nsr.go.jp/en/contents/8000/7767/24/Sea_Area_Monitoring%2820131224%29.pdf
- 23) http://radioactivity.nsr.go.jp/en/contents/8000/7767/24/Sea_Area_Monitoring%2820131224%29.pdf
- 24) Nuclear Regulation Authority, Jahresbericht 2014, Finanzjahr 2013, Annual Report 2014. www.nsr.go.jp/data/000067054.pdf

Hartmut Nies, geboren 1951, studierte Chemie an der Universität Stuttgart und der TU Berlin. Er promovierte an der FU Berlin im Jahr 1982. Ab 1983 arbeitete er beim Deutschen Hydrographischen Institut (seit 1990 Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, BSH) im Sachgebiet „Radioaktivität des Meeres“ in Hamburg. Ab 1988 war er Leiter dieses Sachgebiets und ab 1993 Direktor und Professor des gesamten meereschemischen Labors des BSH. Ab Ende 2009 bis Juni 2014 war er vom BSH beurlaubt, um als Laborleiter im Meereslabor der Internationalen Atomenergie-Organisation (International Atomic Energy Agency, IAEA) in Monaco zu arbeiten. Bis zu seiner Pensionierung betreute er bei der IAEA als Technical Officer die „Marine Benchmark Study on the Possible Impact of the Fukushima Radioactive Releases in the Asian-Pacific Region“. An diesem Projekt beteiligten sich 24 asiatisch-pazifische Länder. Seit Juli 2014 ist er mit Spezialaufgaben wieder im BSH in Hamburg tätig. Hartmut.Nies@bsh.de



GDCh-Kurs
Chemometrik - Werkzeug
in der Analytischen Chemie
Grundlagen und Anwendungen (142/15)
15. - 17. Juni 2015, Magdeburg
Leitung: Prof. Dr. Jürgen W. Einax
PD Dr. Wolf von Tümpling

Highlights:
 Elementarstatistik
 Statistische Aspekte der Probennahme
 Experimentelles Design
 Multivariate Datenanalyse
 Multivariate Kalibration

Anmeldung/Information:
 Tel.: 069/7917-291
 E-Mail: fb@gdch.de
www.gdch.de/fortbildung