

## REAKTORUNFÄLLE

# Fukushima – fünf Jahre danach

Die radioökologische Perspektive der Nuklidfreisetzungen und der Strahlenbelastung von Lebensmitteln

Georg Steinhauser und Akio Koizumi

Knapp 25 Jahre nach Tschernobyl ereignete sich in Japan infolge eines schweren Erdbebens mit anschließendem Tsunami ein schwerer Nuklearunfall. Die radioaktiven Auswirkungen von Fukushima lassen sich jedoch nicht annähernd mit denen von Tschernobyl vergleichen. Heute gibt es in Japan zahlreiche Programme, um die Folgen der Nuklearkatastrophe genau zu charakterisieren und zu reduzieren.

Das schwerste Erdbeben seit Beginn der japanischen Geschichtsschreibung (Momenten-Magnitude 9,0  $M_w$ ) und ein gigantischer Tsunami verursachten am 11. März 2011 an der Ostküste der japanischen Hauptinsel Honshu Verwüstungen unvorstellbaren Ausmaßes. Die Flutwelle drang bis zu zehn Kilometer ins Landesinnere und zerstörte alles, was sich ihr in den Weg stellte. Ein Jahr nach der Katastrophe lag die Zahl der Toten bei 15 854, weitere 3155 galten als vermisst. Die Überflutungen zerstörten auch die Notkühlssysteme des Kernkraftwerks Fukushima Daiichi. Drei der sechs Blöcke (Abb. 1) des Kernkraftwerks waren zum Zeitpunkt des Erdbebens in Betrieb, wurden aber bei den ersten seismischen Anzeichen für ein Erdbeben dieser Größenordnung automatisch heruntergefahren. Durch den Tsunami, der das Kraftwerksgelände knapp eine Stunde nach dem Erdbeben erreichte, kam es zur Zerstörung der Dieselgeneratoren und zum Ausfall aller Nebenwasserkühlssysteme. Bedingt durch die Nachzerfallwärme insbesondere der kurzlebigen Spaltprodukte folgten Kernschmelzen in den drei Reaktoren, und zwar schneller als ursprünglich angenommen, wie aktuelle Arbeiten zeigen [1]. Ein Vorbeben vom 9. März mit einer Magnitude von 7,3  $M_w$  war nicht stark genug, um die automatische Reaktorschnellabschaltung zu initiieren. Vermutlich hätte es sich auf den Unfallablauf positiv ausgewirkt, wären die Reaktoren zum Zeitpunkt des Kühlungsausfalls bereits zweieinhalb Tage „vorgekühlt“ gewesen.

Durch die hohen Temperaturen der Brennstäbe reagierte Wasserdampf mit der Zirkoniumlegierung der Hüllrohre und erzeugte beträchtliche Mengen Wasserstoff. Im Zuge des „Ventings“, also des Ablassens von Überdruck aus den Druckbehältern, entwich der Wasserstoff in den Servicebereich oberhalb der Reaktoren der Blöcke 1 und 3 und gelangte dort zur Explosion. Die Detonation in Block 3 war so heftig,



Thomas Johnson

Die Zerstörungen durch den Tsunami sind in der Sperrzone bis heute zu erkennen.

dass japanische Behörden zunächst sogar eine nuklear getriebene Explosion nicht ausschließen wollten. Die Explosion in Block 4 war zunächst eine große Überraschung, da der Druckbehälter zum Zeitpunkt des Unfalls leergeräumt war und sich der gesamte Brennstoff in den Lagerbecken befand. Die Vorstellung, dass es dort zu Schmelzvorgängen an den Brennelementen und folglich auch Wasserstoffentwicklung gekommen war, löste große Nervosität aus. Jedoch zeigte sich, dass der für die Zerstörung des Blocks 4 verantwortliche Wasserstoff aus Block 3 stammte und durch gemeinsame Rohrleitungen zum Abgaskamin in Block 4

## KOMPAKT

- Im März 2011 kam es im japanischen Kernkraftwerk Fukushima Daiichi zu Kernschmelzen in drei Blöcken.
- Der Großteil der Kontamination durch Radionuklide kam durch Regen vier Tage nach dem Tsunami zustande und ist auf einen 40 km langen Streifen begrenzt.
- Mit dem Unfall von Tschernobyl ist der in Japan in puncto Radionuklid-Freisetzungen und gesundheitliche Auswirkungen nicht vergleichbar.
- Die Auswirkungen des japanischen „3/11“ sind häufig psychische und soziale Folgen des Traumas, der Stigmatisierung und des Verlusts von Menschen, Heimat und Arbeitsplatz.

Prof. Dr. Georg Steinhauser, Institut für Radioökologie und Strahlenschutz, Leibniz Universität Hannover; Prof. Dr. Akio Koizumi, Department of Health and Environmental Sciences, Kyoto University Graduate School of Medicine, Japan

gelangt war und dort zündete. Mittlerweile ist es gelungen, die Brennelemente aus dem Abklingbecken von Block 4 zu bergen. Zum überwiegenden Teil waren sie unbeschädigt.

In Block 2 kam es zu keiner außen sichtbaren Zerstörung des Reaktorgebäudes, auch deshalb, da es nicht möglich war, Überdruck abzulassen. Der Grund dafür war, dass bei der Explosion von Block 3 das Ablassventil der Venting-Leitung zur Kondensationskammer von Block 2 beschädigt worden war und sich nicht mehr öffnen ließ. Zusätzlich beschädigte ein Fassadenteil, das bei der Explosion des Blocks 1 herausgeschleudert wurde, die Gebäudehülle von Block 2, sodass Wasserstoff entweichen konnte. Am 15. März, fast zeitgleich mit der Zerstörung des Reaktorgebäudes von Block 4, war ein explosionsartiges Geräusch im Inneren des Reaktorgebäudes von Block 2 zu hören. Hier dürfte der Überdruck einen Schaden im Bereich der unterhalb des Druckbehälters befindlichen Kondensationskammer verursacht haben. Dabei kam es zur schlagartigen Druckentlastung.

### Freigesetzte Radionuklide

Die im Unfall von Fukushima atmosphärisch freigesetzten Radionuklide wurden schlagartig im Zuge des Ventings sowie bei den Explosionen freigesetzt. Insgesamt betragen die in die Luft freigesetzten Aktivitäten (ohne Edelgase) schätzungsweise 520 Petabecquerel (PBq, **Infokasten**), wobei die Schwankungsbreite von 340 bis 800 PBq reicht. Das ist etwa ein Zehntel der Menge an freigesetzten Substanzen in Tschernobyl. Die Windbedingungen im Frühjahr 2011 waren zumeist günstig für das bewohnte Festland, sodass mehr als 80 Prozent der in die Atmosphäre entwichenen Radionuklide aufs Meer hinaus ge-

langten. Leider führte Niederschlag am 15. März 2011 dazu, dass beträchtliche Mengen an Radionukliden in einem ca. 40 km langen Streifen in nordwestlicher Richtung vom Kernkraftwerk aus der Atmosphäre ausgewaschen wurden und dort zu hohen Depositionen führten (**Abb. 2**). Neue Untersuchungen konnten anhand des  $^{135}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ -Verhältnisses zeigen, dass dieser charakteristische Kontaminationsstreifen größtenteils auf Reaktor Nummer 2 zurückgeht [2]. Die Unterschiede in der  $^{135}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ -Signatur ergeben sich aufgrund der unterschiedlichen Betriebsgeschichte der Reaktoren. Es entbehrt nicht einer gewissen Ironie, dass die medial überaus „wirksamen“ Wasserstoffexplosionen in den Blöcken 1, 3 und 4 nicht annähernd den Schaden angerichtet haben wie der äußerlich intakte Block 2.

Große Sorge bereitet den Behörden und der Bevölkerung bis heute die Kontamination des Pazifiks. Das United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR) schätzt den Eintrag von Radionukliden in den Ozean für  $^{131}\text{I}$  (Halbwertszeit 8 Tage) auf 10 bis 20 PBq (direkt) und 60 bis 100 PBq (indirekt) sowie für  $^{137}\text{Cs}$  (Halbwertszeit 30 Jahre) auf 3 bis 6 PBq (direkt) und 5 bis 8 PBq (indirekt). Der direkte Eintrag bezieht sich auf das Einsickern oder Einleiten von kontaminiertem Wasser, der indirekte Anteil auf jenen Eintrag durch Deposition von radioaktiven Aerosolen auf die Wasseroberfläche, das Abregnen über dem Ozean sowie den Eintrag durch Flüsse. Diese Mengen sind ein Bruchteil dessen, was im Zuge der Atomwaffentests des 20. Jahrhunderts in den Pazifik gelangte. Dennoch ist es wichtig, die Freisetzung und den Eintrag durch kontaminiertes Grundwasser genau zu beobachten. Der Reaktorbetreiber TEPCO bemüht sich, durch eine Reihe von Brunnen oberhalb der Reaktoren hangabwärts fließendes Grundwasser vor dem Kontakt mit



**Abb. 1** Das Kernkraftwerk Fukushima Daiichi besteht aus sechs Blöcken, von

denen die Blöcke 1, 2 und 3 zum Zeitpunkt des Erdbebens in Betrieb waren.

### AKTIVITÄTEN IN RELATION

Aktivität wird in Becquerel (Bq) angegeben, wobei 1 Bq als 1 Zerfall pro Sekunde definiert ist. Die in Nuklearunfällen freigesetzten Aktivitäten sind häufig in der Größenordnung von Petabecquerel ( $10^{15}$  Bq). Um eine solche Aktivität zu veranschaulichen, sind folgende Vergleiche hilfreich:

- Die gesamte Aktivität im Körper eines Menschen beträgt ca. 10 000 Bq, mit beträchtlichen Schwankungen abhängig von Geschlecht, Alter, Gewicht, Physik etc. Das ist ähnlich viel wie die Aktivität eines Gramms  $^{238}\text{U}$ , allerdings ohne die Folgeprodukte.
- Die Freigrenze von  $^{60}\text{Co}$  beträgt  $10^5$  Bq; die von Tritium ( $^3\text{H}$ )  $10^9$  Bq.
- Ein Gramm  $^{226}\text{Ra}$  hat eine Aktivität von ca.  $3,7 \cdot 10^{10}$  Bq, so war die inzwischen veraltete Einheit Curie definiert.
- Ein Liter der hochaktiven flüssigen Abfälle der Wiederaufarbeitung von nuklearem Brennstoff besitzt eine Aktivität von rund  $10^{14}$  Bq.
- Die in den 1960er-Jahren häufig verwendeten thermoelektrischen Isotopenbatterien für Satelliten und Raumfahrtmissionen basierten unter anderem auf  $^{238}\text{Pu}$  mit Aktivitäten von  $10^{14}$  bis  $10^{15}$  Bq.

dem Reaktor abzufangen. Weitere Brunnen unterhalb sollen höher kontaminiertes Grundwasser davon abhalten, weiter in den Pazifik zu sickern.

### Charakteristische Signatur

Anders als im Fall von Tschernobyl, wo eine nuklear getriebene Leistungsexkursion den Reaktor thermisch zerstörte und freilegte, beschränken sich die Freisetzen in Fukushima zum überwiegenden Teil auf die Radionuklide leichtflüchtiger Elemente.<sup>1)</sup> Das sind einerseits die Edelgase Xenon und Krypton, andererseits Iod, Cäsium und Tellur. Sowohl mittelflüchtige Radionuklide wie <sup>90</sup>Sr als auch schwerflüchtige Actinide wie Plutonium ließen sich in der Umwelt zwar nachweisen, wohl aber zu einem sehr viel geringeren Ausmaß als nach dem Unfall von Tschernobyl (Abb. 3).

In Umweltproben lässt sich der Beitrag von Fukushima von anderen Quellen anthropogener Radionuklide derzeit noch relativ leicht durch die Anwesenheit des Gammastrahlers <sup>134</sup>Cs unterscheiden. Dieses relativ kurzlebige Reaktornuklid mit einer Halbwertszeit von zwei Jahren kommt im Kernwaffenfallout nicht vor. Radiocäsium aus Fukushima ist gekennzeichnet durch ein <sup>134</sup>Cs/<sup>137</sup>Cs-Aktivitätsverhältnis von  $0,98 \pm 0,01$  (zurückgerechnet zum 11. März 2011). Diese Isotopensignatur hat es erlaubt zu zeigen, dass aus dem Lagerbecken von Reaktorblock 4 keine signifikanten Mengen Cäsium in die Umwelt entwichen sind: Da Block 4 zum letzten Mal dreieinhalb Monate vor dem Unfall in Betrieb war, war der Anteil des kürzerlebigen <sup>134</sup>Cs im Brennstoff dieses Blocks rund zehn Prozent niedriger als in den anderen Reaktoren. Dennoch wurde nirgends Radiocäsium mit dieser niedrigeren <sup>134</sup>Cs/<sup>137</sup>Cs-Signatur gefunden. Spuren von Reaktorplutonium tauchten in Umweltproben vereinzelt auf, meist in Kraftwerksnähe. Das aus Fukushima stammende Plutonium besitzt ein signifikant höheres <sup>240</sup>Pu/<sup>239</sup>Pu-Atomverhältnis von etwas über 0,3 verglichen mit dem allgegenwärtigen Falloutplutonium der atmosphärischen Kernwaffenexplosionen von rund 0,18.

### Gesundheitliche Auswirkungen

Noch am Abend des 11. März ordneten die japanischen Behörden die Evakuierung der Umgebung des Kraftwerks Fukushima Daiichi in einem Umkreis von 2 km an und weiteten sie in den Stunden und Tagen darauf kontinuierlich aus. Am 12. März riefen sie um 18:25 Uhr die Evakuierung in einem Radius von 20 km aus. Am 15. März – dem Tag der größten Freisetzen – durften darüber hinaus Personen, die 20 bis 30 km vom Kraftwerk entfernt wohnen, ihre Häuser nicht verlassen. Die Behörden haben angesichts des Chaos und der zerstörten Infrastruktur an der Ostküste vorbildlich gehandelt und insgesamt 110 000 Personen evakuiert. Durch den raschen Einsatz konnte der

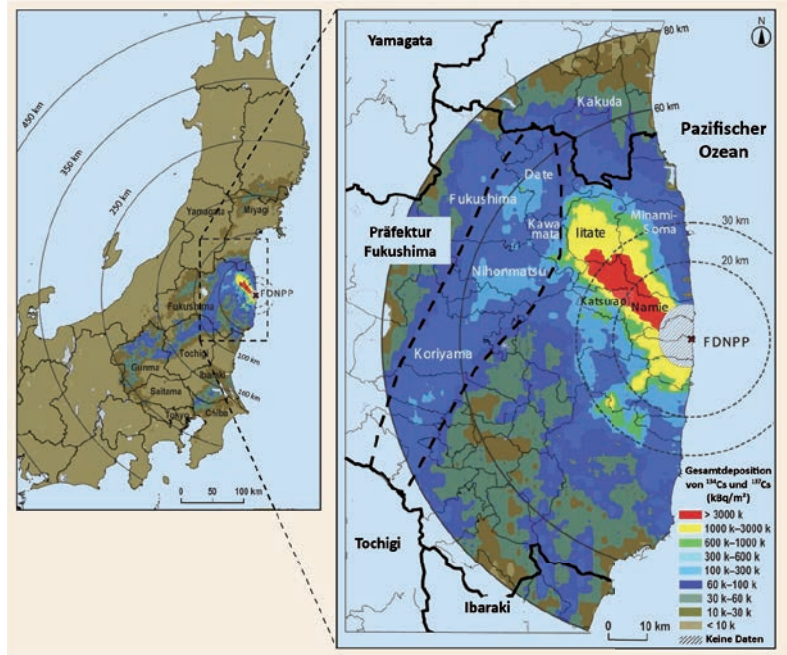


Abb. 2 Die Kontaminationen in Ostjapan sind entlang eines rund 40 Kilometer langen Streifens in nordwestlicher Richtung am größten. Dort wurden Radionuklide am 15. März 2011 durch Regen aus der Atmosphäre gewaschen.

Großteil der Bevölkerung noch vor den größten Radionuklidfreisetzen die Gefahrenzone verlassen.

Gleichzeitig mit der Evakuierung wurde die Ausgabe von Iodidtabletten und -pulver für rund 900 000 Personen vorbereitet. Bedingt durch die kurze Halbwertszeit von acht Tagen hat <sup>131</sup>Iod eine sehr hohe spezifische Aktivität und reichert sich hochselektiv in der Schilddrüse an. Ein Sättigen der Schilddrüse mit stabilem Iod kann dies verhindern und die Schilddrüsenerkrankung beträchtlich reduzieren. Durch die effiziente Evakuierung war diese „Iodblockade“ jedoch nur bei wenigen Betroffenen notwendig, und nur diese erhielten tatsächlich Iodtabletten verabreicht.

Die gesundheitlichen Auswirkungen des Unfalls von Fukushima sind selbst bei konservativer Betrachtung – zumindest im direkten Vergleich mit Tschernobyl – als moderat einzustufen. Dies mag angesichts der Schwere

1) Leichtflüchtige Elemente gehen bereits bei geringfügiger Erhitzung in die Gasphase über. Mittelflüchtige Elemente werden freigesetzt, sobald der Brennstoff anfängt, thermischen Schaden zu nehmen. Schwerflüchtige Radionuklide werden erst bei Kernschmelze in die Gasphase überführt.

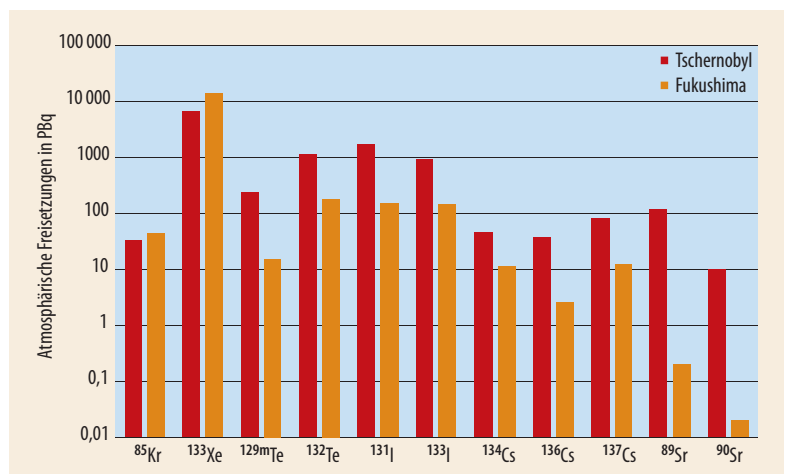


Abb. 3 Der Vergleich der Freisetzen von Radionukliden nach den Unfällen von Tschernobyl bzw. Fukushima zeigt deutlich, dass speziell weniger flüchtige Nuklide wie <sup>90</sup>Sr in Fukushima nur in sehr geringer Menge freigesetzt wurden.

2) vgl. die Infokästen auf S. 32 in diesem Heft

des Unfalls überraschen. Am deutlichsten zeigt sich der Unterschied beim Vergleich der akuten (deterministischen) Strahlenschäden der Arbeiter vor Ort: In Tschernobyl wurden 134 Personen mit Symptomen akuter Strahlenkrankheit diagnostiziert; 31 von ihnen starben noch 1986 infolge ihrer Exposition; 19 weitere verstarben zwischen 1986 und 2004. In Fukushima zeigte kein Arbeiter Anzeichen von Strahlenkrankheit. Die maximalen Strahlendosen der „Liquidatoren“ in Tschernobyl lagen bei 16 Gray ( $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}$ ). In Fukushima erhielten zwei Arbeiter Dosen von über  $0,6 \text{ Sv}$  ( $1 \text{ Sv} = 1 \text{ J/kg}$ )<sup>2)</sup>. Für die allgemeine Bevölkerung der Präfektur Fukushima liegt die Strahlenbelastung, wie Messungen an drei exemplarischen Standorten gezeigt haben, im Wesentlichen innerhalb der Schwankungsbreite der natürlichen Strahlenexposition [5], wobei sowohl externe Exposition als auch Inkorporation von Radionukliden mit der Nahrung und der Atemluft berücksichtigt wurden. Die Median der Schilddrüsenäquivalentdosen der evakuierten Personen lag gemäß einer Studie von 2012 bei  $4,2 \text{ mSv}$  (Kinder) bzw.  $3,5 \text{ mSv}$  (Erwachsene) [6]. Die Maximalwerte erreichten dieser Untersuchung zufolge  $23 \text{ mSv}$  (Kinder) bzw.  $33 \text{ mSv}$  (Erwachsene). Die mittlere Schilddrüsendosis der Evakuierten nach dem Tschernobylunglück lag dagegen bei  $490 \text{ mSv}$ .

Alle Expertenberichte der Vereinten Nationen kamen daher zum Schluss, dass kein statistisch fassbarer Anstieg der Krebsfälle bedingt durch den Unfall in Fukushima zu erwarten wäre. Kürzlich kolportierte Medienberichte über einen „dramatischen“ Anstieg der Schilddrüsenkrebsrate bei Kindern und Jugendlichen in den betroffenen Gebieten haben daher für großes Aufsehen gesorgt, sind aber mit Vorsicht zu betrachten. Die Erfahrungen nach Tschernobyl zeigten, dass erste, vereinzelte Fälle von Schilddrüsenkrebs in der Bevölkerungsgruppe unter 18 Jahren frühestens drei

bis vier Jahre nach der Exposition auftreten. Angesichts der im Schnitt mehr als hundertmal höheren Organdosis in Tschernobyl lässt sich ein plötzliches Auftreten so vieler Krebsfälle in Fukushima noch vor Ablauf der vierjährigen Latenzzeit nicht erklären. Die Ergebnisse der Schilddrüsenuntersuchungskampagne in Japan mögen zwar histologisch glaubwürdig sein, jedoch ist die Verlinkung der Krebsfälle zum Reaktorunfall von Fukushima vorerst zu hinterfragen.

Auch eine aktuelle Studie nährt diese Zweifel: Sie ergab, dass die Mehrzahl der in Fukushima beobachteten Schilddrüsenkrebsfälle Mutationsarten aufwies, die auf ein anderes onkogenes Profil hindeuten als jene Fälle nach Tschernobyl [7]. Die Autoren schließen daraus, dass die beobachteten Krebserkrankungen eine andere Ursache haben müssen. Da nach Tschernobyl die Zahl der Schilddrüsenkrebsfälle nach der Exposition mit  $^{131}\text{I}$  zunächst linear anstieg, werden Untersuchungen in den kommenden Jahren zeigen, ob ein Zusammenhang zwischen den Freisetzungen und der Krebsinzidenz in Fukushima besteht und wenn ja, welcher. Nach Tschernobyl gab es die meisten Neuerkrankungen 10 bis 12 Jahre nach dem Unfall.

### Sichere Lebensmittel

Die japanischen Behörden widmeten unmittelbar nach dem Unfall ihre ganze Aufmerksamkeit der Lebensmittelsicherheit. Bis heute wurden weit mehr als eine Million Proben auf Radioaktivität getestet. In der Anfangsphase überschritten vor allem Gemüse und Rindfleisch die strengen japanischen Grenzwerte [8]. Mittlerweile beschränken sich Grenzwertüberschreitungen auf bekanntermaßen Cäsium akkumulierende Organismen wie Pilze oder Wildschweine. Das für Japan wichtige Lebensmittel Reis wird nicht stichprobenweise untersucht, sondern in eigens gebauten Detektoren Sack für Sack. Im Jahr 2012 überschritten von mehr als zehn Millionen gemessenen Säcken 71 den Grenzwert von  $100 \text{ Bq/kg}$ . Untersuchungen von zehntausenden Anwohnern mit Ganzkörperzählern zeigten, dass hohe Inkorporationen nur auftraten, wenn Personen die strengen Kontrollen durch eigenen Anbau von Feldfrüchten, das unkontrollierte Sammeln von Wildpilzen sowie durch Verzehr von privat erlegtem Wild bzw. selbst gefangenem Fisch umgangen. Eine Studie, bei der Duplikate der verzehrten Mahlzeiten auf ihren Kontaminationsgrad untersucht wurden, zeigte, dass der Median der Inkorporation im Dezember 2011 bei  $4 \text{ Bq Radiocäsium pro Tag}$  lag mit einer Schwankungsbreite von rund  $0,26$  bis  $17 \text{ Bq/d}$  [9]. Nach Tschernobyl lagen diese Werte in den hochkontaminierten Gebieten knapp drei Größenordnungen höher.



Abb. 4 In Solidaritäts-Supermärkten werden bewusst Produkte aus der Präfektur Fukushima angeboten – selbstverständlich unter strenger Kontrolle.



Abb. 5 Der Anblick von im Freien spielenden Kindern hat in der Präfektur Fukushima seit dem Unfall Seltenheitswert.

## Trauma und Stigmatisierung

Die gravierendsten Auswirkungen des Unfalls von Fukushima sind nach Ansicht vieler Experten, darunter auch UNSCEAR [10], die psychischen und sozialen Folgen des Traumas vom März 2011. In diesem Teufelskreis paart sich die Angst vor den Folgen der unsichtbaren Strahlung mit der Stigmatisierung, aus einem „verseuchten“ Teil Japans zu stammen. Hinzu kommen der Verlust von Familienmitgliedern, Freunden und Nachbarn durch den Tsunami sowie der Verlust des eigenen Wohnsitzes und des Arbeitsplatzes durch die Evakuierung und die wirtschaftliche Misere der Region. Die Folgen sind vielfach Depression und soziale Isolation. Fukushima war bis zum Unfall ein beliebtes Erholungsgebiet für die Großstadtbewohner Japans, doch der Tourismus ist seit 2011 nicht wieder gänzlich in Schwung gekommen. Landwirtschaftliche Produkte aus der Präfektur Fukushima finden selbst innerhalb Japans immer weniger Käufer. Diesem unbegründeten Trend sollen „Solidaritäts-Supermärkte“ entgegenwirken, in denen es ausschließlich Produkte aus Fukushima zu kaufen gibt (Abb. 4).

Viele japanische Eltern lassen ihre Kinder aus Sorge vor der Strahlung nicht mehr ins Freie und suchen Indoor-Spielplätze auf. Generell sind Indoor-Aktivitäten beliebter als jene im Freien (Abb. 5). Amerikanisches Fast Food hat Hochsaison, da es höhere Sicherheit suggeriert. Der Mangel an Bewegung und die veränderten Lebens- und Essgewohnheiten haben in Fukushima und insbesondere innerhalb der Gruppe der Evakuierten zu einem schlagartigen Anstieg von Fettleibigkeit und Übergewicht geführt [11].

Die Bewohner Fukushimas müssen sich großen Herausforderungen stellen. Viele der Evakuierten

kehren an ihre Wohnorte zurück, obwohl die Arbeitsmarktgegebenheiten, die sozialen Netzwerke und die soziale Infrastruktur nicht wieder hergestellt sind. Viele Bewohner empfinden ihr Dasein wie ein Leben am Filmset: Sie spielen die Rolle als Fukushima-Opfer und werden dabei beobachtet. Lange wird es noch dauern, bis das Leben in Fukushima annähernd wieder die Qualität und Vitalität wie vor „3/11“ erreichen wird. Die Wissenschaft kann ihren Beitrag dazu leisten, indem sie unbegründeten Ängsten entgegentritt und zeitgleich Probleme sachlich aufzeigt. In unserer jüngsten Arbeit konnten wir zeigen, dass die Aufräumarbeiten am Kraftwerksgelände die Gefahr der Verfrachtung von radioaktivem Staub bergen [12]. Nicht alles, was zur Verbesserung der Lage gedacht war, eignet sich in seiner Umsetzung auch tatsächlich dazu.

## Literatur

- [1] M. S. Snow et al., *Rapid Commun. Mass Spectrom.* **30**, 523 (2016)
- [2] J. Zheng et al., *Environ. Sci. Technol.* **48**, 5433 (2014)
- [3] N. Yoshida und Y. Takahashi, *Elements* **8**, 201 (2012)
- [4] G. Steinhauser, A. Brandl und T. E. Johnson, *Sci. Total Environ.* **470**, 800 (2014)
- [5] K. H. Harada et al., *PNAS USA* **111**, E914 (2014)
- [6] S. Tokonami et al., *Sci. Rep.* **2**, 507 (2012)
- [7] N. Mitsutake et al., *Sci. Rep.* **5**, 16976 (2015)
- [8] S. Merz, K. Shozugawa und G. Steinhauser, *Environ. Sci. Technol.* **49**, 2875 (2015)
- [9] K. H. Harada et al., *Environ. Sci. Technol.* **47**, 2520 (2012)
- [10] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, UNSCEAR 2013 Report, Volume I. Report to the General Assembly, Scientific Annex A, [www.unscear.org/docs/reports/2013/13-85418\\_Report\\_2013\\_Annex\\_A.pdf](http://www.unscear.org/docs/reports/2013/13-85418_Report_2013_Annex_A.pdf)
- [11] T. Ohira et al., *Am. J. Prev. Med.* 2016, in Druck; DOI: 10.1016/j.amepre.2015.10.008.
- [12] G. Steinhauser et al., *Environ. Sci. Technol.* **49**, 14028 (2015)

## DIE AUTOREN

**Georg Steinhauser** (FV Umweltpophysik, Strahlen- und Medizinphysik) wurde 2005 an der TU Wien in Radiochemie promoviert. 2007 absolvierte er ein Postdoc-Jahr als Erwin-Schrödinger-Stipendiat an der LMU München. Nach mehr als zehn Jahren am Atominstitut der TU Wien wurde er 2013 an die Colorado State University (USA) berufen. 2015 erhielt er einen Ruf an die Universität Hannover. Steinhauser hat mehr als 70 Originalpublikationen und sechs Buchbeiträge (mit-)verfasst. Seit 2011 beschäftigt er sich vorrangig mit den Umweltauswirkungen des Unfalls von Fukushima.



**Akio Koizumi** wurde 1978 in Medizin von der School of Medicine der Tohoku University promoviert und erhielt 1983 auch den Philosophical Doctor. Nach einem Studium in den USA wurde er 1987 als Associate Professor an die School of Medicine der Akita University berufen. 1993 wurde er zum Full Professor befördert. 2000 erhielt er den Ruf an die Graduate School of Medicine der Kyoto University. Seine Arbeitsgruppe widmet sich Fragen der Umweltradioaktivität in Fukushima.

