

REAKTORUNFÄLLE

Tschernobyl – 30 Jahre danach

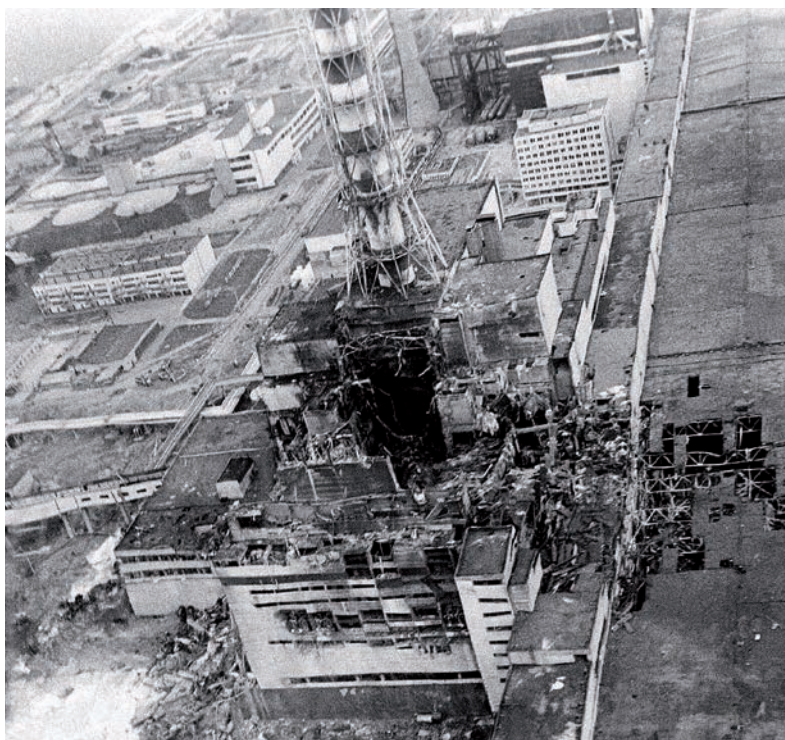
Ist eine Nutzung der kontaminierten Gebiete wieder möglich?

Clemens Walther, Peter Brozynski und Sergiy Dubchak

Die Auswirkungen der nuklearen Katastrophe von Tschernobyl sind auch heute noch zu spüren: Große Flächen um das ehemalige Kraftwerk weisen nach wie vor hohe Kontaminationen mit Radionukliden auf. Die Natur hat sich weitgehend von den akuten Schäden erholt, sodass ein einzigartiges Ökosystem ohne Einfluss des Menschen entstanden ist. In der Ukraine gibt es erste Versuche, die kontaminierten Gebiete wieder zu nutzen.

Am 26. April 1986 kam es in Reaktorblock 4 des Kernkraftwerks Tschernobyl in der heutigen Ukraine zum schwerwiegendsten Unfall in der zivilen Nutzung der Kernenergie [1]. In einem Test sollte geprüft werden, ob die Rotationsenergie der Turbinen zur Energieversorgung des Reaktors ausreicht, bis Notstromaggregate anspringen. Bei dem RBMK-Reaktor (Reaktor Bolschoi Moschtschnosti Kanalny – Hochleistungsreaktor mit Kanälen) handelt es sich um einen graphitmoderierten Siedewasserreaktor. Das Spaltmaterial befindet sich in Druckröhren, die das Kühlwasser durchströmt. Wechselnde Lastanforderungen im Vorfeld des Tests führten zu einem äußerst instabilen Zustand des Reaktors, der den Abbruch des Test erfordert hätte.

Um den Test fortzuführen, überbrückte das Personal aber vorsätzlich sicherheitsrelevante Einrichtungen. Fehleinschätzungen des unzureichend geschulten Personals sowie Designschwächen dieses Reaktortyps – insbesondere ein Ansteigen der Reaktorleistung bei Dampfblasenbildung und die Bauart der Abschalt- und Regelstäbe – führten zu einer sprunghaften Leistungsexkursion bis zum Sechzigfachen der Nennleistung innerhalb weniger Sekunden. Infolgedessen explodierte der Reaktor, sprengte die 3000 Tonnen schwere Reaktordeckplatte ab und fing Feuer. Durch eine fehlende weitere druckfeste Sicherheitsbarriere lag der zerstörte Reaktorkern frei, sodass es durch den Brand zu einem massiven Austrag radioaktiven Materials in bis zu mehrere Kilometer Höhe kam. Erst zehn Tage später gelang es, den Brand zu löschen und den Reaktor vorläufig abzudecken. In dieser Zeit wurden je nach Isotop zwischen ein und fünfzig Prozent des radioaktiven Inventars, insgesamt etwa 5300 PBq, freigesetzt. Der größte Anteil entfiel auf flüchtige Stoffe wie die Isotope der Edelgase Xenon und Krypton sowie ^{129m}Te und ^{132}Te , mehrere Iodisotope, ^{134}Cs und ^{137}Cs (Abb. 3



Als der Brand im Reaktorblock 4 des Kernkraftwerks Tschernobyl nach zehn

Tagen gelöscht ist, zeigt sich das ganze Ausmaß der Zerstörung.

auf Seite 41). Vom radioaktiven Strontium wurden etwa drei bis fünf Prozent emittiert, von den schwer flüchtigen Elementen sowie den Actiniden Uran, Neptunium, Plutonium und Americium etwa ein Prozent. Wechselnde Winde verteilten die flüchtigen Stoffe über weite Teile Europas [2]. Regenfälle wuschen die radio-

KOMPAKT

- Die Nuklearkatastrophe von Tschernobyl führte zu Kontaminationen in großen Teilen Europas.
- Die Gebiete um das ehemalige Kernkraftwerk werden engmaschig überwacht. Die Daten helfen auch dabei, besser zu verstehen, wie sich Radionuklide langfristig in der Umwelt verhalten.
- Um eine Wiederbesiedelung der kontaminierten Gebiete vorzubereiten, laufen Pilotprojekte zur Erzeugung und Verarbeitung von Biokraftstoffen aus Raps.
- Die Einrichtung eines Biosphärenreservats soll garantieren, dass die vom Menschen seit dreißig Jahren unbeeinflusste Natur weiter erforscht wird, während sich die kontaminierten Gebiete von den akuten Auswirkungen des Unfalls erholen.

Prof. Dr. Clemens Walther, Peter Brozynski, Institut für Radioökologie und Strahlenschutz, Leibniz Universität Hannover, Herrenhäuser Str. 2, 30419 Hannover;
Dr. Sergiy Dubchak, State Ecological Academy of Postgraduate Education and Management, V. Lypkivsky Str. 35, 03035 Kyiv, Ukraine

aktiven Stoffe aus und kontaminierten eine Fläche von mehr als 190 000 km² mit Depositionsdichten von über 37 kBq/m² durch ¹³⁷Cs [3]. Davon lagen 45 000 km² außerhalb der damaligen Sowjetunion, wobei die höchsten Depositionsdichten in einigen Gebieten Skandinavien, Österreichs und des Bayerischen Waldes zu verzeichnen waren. Der bei weitem größte Teil der kontaminierten Flächen mit Depositionsdichten über 185 kBq/m² befand sich in den heutigen Staaten Ukraine, Belarus und Russland [4], darunter auch die hoch kontaminierten Gebiete mit über 1500 kBq/m². Mehr als 90 % der Actiniden sowie ⁹⁰Sr, ¹⁴¹Ce und ¹⁴⁴Ce wurden in Form von bis zu 10 µm großen Brennstofffragmenten freigesetzt. Da diese Partikel nicht in große atmosphärische Höhen gelangten, gingen sie meist in Entfernungen von bis zu 30 Kilometern um den Unglücksort nieder [5]. Diese Isotope haben also ausschließlich Gebiete in den heutigen Staaten Ukraine, Belarus und Russland kontaminiert.

Evakuierung nach dem Unfall

In den betroffenen Gebieten lebten rund fünf Millionen Menschen, von denen mehr als 350 000 aufgrund zu hoher zu erwartender Strahlungsdosen ihre Heimat verlassen mussten. Nur 116 000 Menschen wurden unmittelbar nach dem Unfall evakuiert, die restlichen zum Teil erst mit über einer Woche Verzögerung. Dies ist aus Sicht des Strahlenschutzes sehr bedenklich, da diese Menschen das kurzlebige Isotop ¹³¹I ($T_{1/2} = 8$ d) aufgenommen haben, wobei teils Schilddrüsendosen weit über 1 Gy die Folge waren (Infokasten „Einheiten der Dosimetrie“). Zu erklären ist diese schrittweise und zu langsame Evakuierung u. a. mit dem damaligen sowjetischen Schutzziel einer maximalen Lebenszeitdosis von 350 mSv. Nach dem Reaktorunfall wurde die zulässige Jahresdosis schrittweise reduziert: von 100 mSv im Mai 1986 zu 30 mSv im Jahr 1987 und schließlich auf 25 mSv im Jahr 1988. Diese Dosen rechtfertigten die späte Evakuierung, weil sie nur durch die erwartete Exposition mit dem langlebigeren ¹³⁷Cs und Ingestion dieses Isotops erreicht worden wäre.

EINHEITEN DER DOSIMETRIE

Die **Aktivität** bezeichnet die Zerfallsrate von Radionukliden und wird in Becquerel (Bq) gemessen, d. h. der Anzahl der Zerfälle pro Sekunde. Vor Einführung der SI-Einheiten war die Einheit Curie (Ci) gebräuchlich: $1 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$. Die **Flächendepositionsdichte** in Bq/m², also die flächenbezogene Aktivität der am Boden abgelagerten Radionuklide, ist ein Maß für den radioaktiven Fallout.

Die Wechselwirkung ionisierender Strahlung mit lebender Materie kann zu Zellschäden führen. Die Strahlenexposition wird als **Energiedosis**, also absorbierte Energie pro Masse, mit der Einheit Gray (Gy = J/kg) angegeben. Eine Exposition des menschlichen Körpers mit mehr als einem Gray löst akute Strahlenkrankheit aus. Um die Energiedosis, die Strahlenart sowie die unterschiedliche Strahlenempfindlichkeit unserer Organe oder Teilkörperexpositionen zu berücksichtigen, gibt es die **effektive Dosis**. Auch sie hat die SI-Einheit

DOSISWERTE

Menschen sollen vor den schädlichen Folgen ionisierender Strahlung geschützt werden. Geeignete Maßnahmen lassen sich anhand von Dosiswerten beurteilen. Dabei unterscheidet man verschiedene Größen.

Als **Eingreifrichtwert** wird ein Dosiswert (z. B. effektive Dosis) bezeichnet, bei dessen tatsächlicher oder prognostizierter Überschreitung eine Schutzmaßnahme für die Bevölkerung zu erwägen ist. Liegt eine Notfall-Expositionssituation (z. B. ein nuklearer Unfall) vor, gelten Expositionen oberhalb des **Referenzwerts** als unangemessen. Ein **Grenzwert** im engeren Sinn ist z. B. eine Dosis, die aufgrund von Vorgaben in Gesetzen oder Verordnungen insbesondere bei geplanten Expositionssituationen nicht überschritten werden darf. Ein Beispiel hierfür ist die jährliche maximale effektive Dosis von 20 mSv für beruflich strahlenexponierte Personen.

Später wurde die Jahresdosis auf 1 bis 5 mSv abhängig der Zone korrigiert. Diese Werte sind angelehnt an den in vielen westlichen Ländern gültigen Wert für die maximale Jahresdosis durch Emissionen kerntechnischer Anlagen – allerdings im Normalbetrieb und für Personen, die nicht beruflich strahlenexponiert sind (Infokasten „Dosiswerte“).

Generell ist eine Evakuierung bei der Gefahr stark erhöhter Folgedosen unvermeidlich. Aber wie hoch ist „hoch“? Die internationale Strahlenschutzkommission empfiehlt einen Referenzwert von 100 mSv für das erste Jahr nach einem Unfall [6]. Gleichzeitig ist zu berücksichtigen, dass eine Evakuierung einen massiven Eingriff in das Leben der Menschen bedeutet und gesundheitliche Folgen nach sich ziehen kann, die gegen potenzielle strahlenbedingte Erkrankungen abzuwägen sind. Dazu zählen stressbedingte Symptome, Depressionen und psychosomatische Erkrankungen, Hilflosigkeit, Ungewissheit der eigenen Zukunft und das Wahrnehmen einer Opferrolle. Verhaltensmuster reichen von extrem übervorsichtigem Verhalten und extrem hohen gesundheitlichen Bedenken bis hin zu Negieren der Realitäten und unkontrolliertem (illegalen) Konsum von Lebensmitteln aus hoch kontaminierten Gebieten. Untersuchungen ergaben, dass Personen, die in ihren Siedlungen verblieben oder nach kurzer Zeit

J/kg, wird aber mit Sievert (Sv) abgekürzt. Ein Sievert ist bereits eine sehr hohe Dosis, üblich sind daher mSv und µSv. So beträgt die mittlere effektive Dosis in Deutschland aufgrund natürlicher Quellen etwa 2 mSv pro Jahr.

Man unterscheidet verschiedene Arten der Exposition. Teilchenstrahlen haben eine sehr geringe Reichweite und schädigen hauptsächlich nach Aufnahme in den Körper (Inhalation und Ingestion). Wichtige Vertreter sind die Beta-Emitter ⁹⁰Sr ($T_{1/2} = 28,6$ a) und ²⁴¹Pu ($T_{1/2} = 14,3$ a) sowie die alpha-strahlenden Actiniden ²³⁸Pu ($T_{1/2} = 87,7$ a), ²³⁹Pu ($T_{1/2} = 24 100$ a), ²⁴⁰Pu ($T_{1/2} = 6560$ a) und ²⁴¹Am ($T_{1/2} = 432$ a). Durchdringende Strahlung (Gamma-Strahlung und Neutronen) schädigt auch bei externer Exposition, z. B. durch Aufenthalt auf kontaminiertem Boden. Dosisrelevant ist i. Allg. ¹³⁷Cs ($T_{1/2} = 30,2$ a; Beta- und Gammastrahler). Alle diese Radionuklide sollten nicht in die Nahrungskette gelangen.

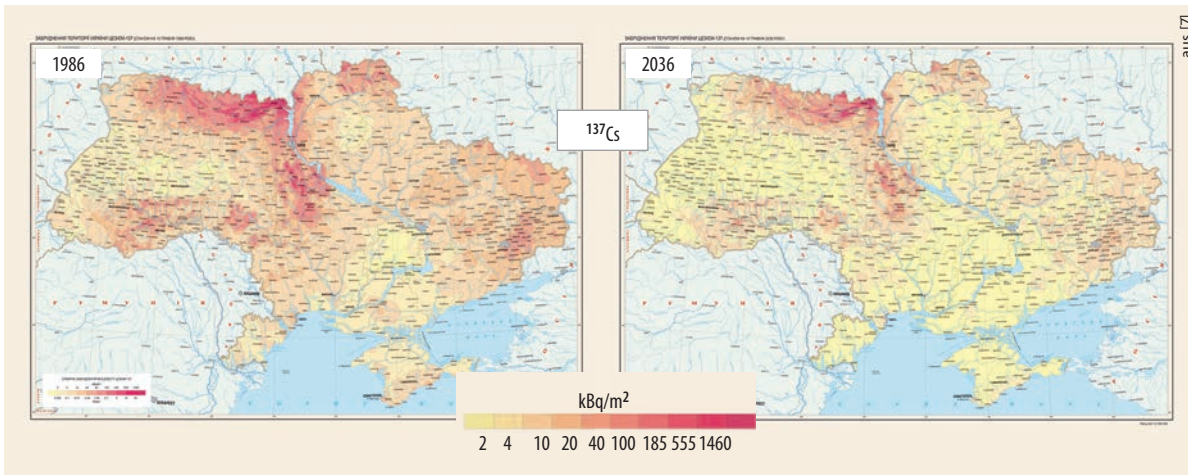


Abb. 1 Ein Vergleich der Kontamination mit dem Radionuklid ^{137}Cs in der Ukraine von 1986 mit der Prognose für 2036 zeigt,

dass die Aktivität in den betroffenen Gebieten deutlich zurückgehen wird.

zurückkehrten, mit den Folgen besser zurecht kamen. Daher ist es wichtig, die kontaminierten Gebiete bezüglich einer möglichen Rückkehr und erneuter Nutzung kontinuierlich zu beobachten und zu evaluieren.

Aktuelle Kontaminationen und Besiedelung

Die betroffenen Ökosysteme werden seit dem Unfall routinemäßig engmaschig überwacht und studiert. Das radiologisch sehr gefährliche ^{131}I ist aufgrund seiner kurzen Halbwertszeit bereits vollständig abgeklungen. Die Isotope ^{90}Sr ($T_{1/2} = 28,6$ a) und ^{137}Cs ($T_{1/2} = 30,2$ a) werden noch über viele Jahrzehnte eine Gefahr darstellen. Die Aktivitäten dieser Nuklide sinken ebenfalls, nicht nur durch den radioaktiven Zerfall, sondern auch durch Transport und Sedimentation (Abb. 1). Auch in Belarus geht der Anteil der Staatsfläche, die mit Depositionsdichten von über 37 kBq/m^2 durch ^{137}Cs kontaminiert ist, kontinuierlich zurück von 23 Prozent im Jahr 1986 auf heute 16 Prozent und voraussichtlich zehn Prozent bis 2046 [8].

Die im näheren Umkreis um das Kraftwerk deponierten Partikel (so genannte „hot particles“) verwirbeln. Das führt zu einer anhaltenden Freisetzung von z. B. ^{90}Sr über die nächsten zehn bis zwanzig Jahre [9, 10]. Noch länger werden die Actiniden eine Rolle spielen. Zwar ist zurzeit der Beitrag der Plutonium-Isotope zur radiologischen Gefährdung im Vergleich zu ^{137}Cs gering. Da diese Isotope aber noch über Tausende von Jahren vorhanden sein werden und durch den Beta-Zerfall des ^{241}Pu weiterhin ^{241}Am gebildet wird, ist das Maximum dieser Aktivität erst Mitte dieses Jahrhunderts zu erwarten.

In den Gebieten der früheren UdSSR war es nötig, etwa 8000 km^2 Fläche für die landwirtschaftliche Nutzung zu sperren (Ukraine: 2500 km^2). Außerdem gingen der Forstwirtschaft knapp 7000 km^2 Wald (Ukraine: knapp 3000 km^2) verloren [11]. Bis heute liegen diese Flächen brach. Lediglich Vorsorgemaßnahmen wie das Mähen von Wiesen, Aufforstung und die Errichtung von Brandschutzfluren um Waldgebiete

wurden durchgeführt, insbesondere um das erneute Aufwirbeln und damit eine weitere Verteilung kontaminierter Materials zu verhindern.

Die Ukraine ist nach wie vor in drei Zonen der Kontamination unterteilt (Abb. 2). Die innerste und am höchsten kontaminierte Zone ist die Chernobyl Exclusion Zone (CEZ) mit etwa 2200 km^2 Fläche. Im Süden der CEZ leben permanent 172 Personen (142 Personen in der Stadt Tschernobyl). Bereits 1987 begannen Bewohner, in die CEZ zurückzukehren. Die Population erreichte von 1987 bis 1988 mit rund 1200 Personen das Maximum und sank seitdem kontinuierlich aufgrund der Altersentwicklung: Das Durchschnittsalter in der CEZ liegt heute bei 63 Jahren. An die CEZ schließt sich Zone 2 mit 2230 km^2 an. Hier lebten 1991 rund 50 000 Personen. Ab 1992 wurden 35 500 von ihnen umgesiedelt. Zone 3 umfasst $23 300 \text{ km}^2$ und beinhaltet 841 Städte und Gemeinden, in denen Anfang 2012 etwa 619 500 Personen lebten.

Um die Möglichkeiten der künftigen Landnutzung zu beurteilen, sind einige Prozesse zu betrachten, welche die Kontamination beeinflussen. Dazu gehören

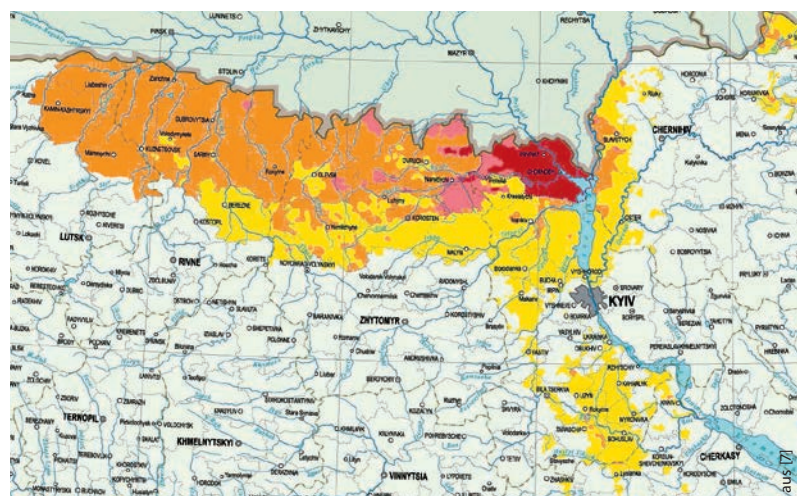


Abb. 2 Die kontaminierten Gebiete in der Ukraine sind in drei Zonen eingeteilt: die sog. Chernobyl Exclusion Zone (rot), Zone 2 mit einer Kontamination durch

^{137}Cs von über 555 kBq/m^2 (rosa) und Zone 3 (185 bis 555 kBq/m^2 , orange). Daneben wird die vormalige Zone 4 radioökologisch überwacht (gelb).

z. B. Verwitterung, radioaktiver Zerfall, Migration von Radionukliden in tiefere Bodenschichten und gegebenenfalls die Veränderung der Oxidationszustände, welche die Bioverfügbarkeit beeinflussen. Der folgende kurze Exkurs zeigt die Komplexität des Verhaltens von Radionukliden in der Umwelt und die Schwierigkeit, Mobilitäten und Bioverfügbarkeiten vorherzusagen.

Mobilität und Verfügbarkeit der Radionuklide

Durch die Analyse von Bodenproben aus Prypjat lassen sich Tiefenprofile von ^{137}Cs , ^{241}Am sowie Plutoniumisotopen erstellen (Abb. 3). Die Stadt liegt etwa vier Kilometer vom Kraftwerk entfernt mitten in der CEZ. Dennoch ist die Deposition der Radionuklide sehr inhomogen, wie der Vergleich zweier Proben mit etwa einem Meter Abstand zeigt. Die Proben werden zunächst gammaspektroskopisch auf ^{137}Cs und ^{241}Am untersucht. Der Gehalt an Plutonium folgt aus der Alpha-spektrometrie. Die ursprünglich hoch kontaminierten Böden sind mit weniger kontaminiertem Material bedeckt, und die anfangs nur oberflächliche Deposition ist bereits in tiefere Bodenschichten migriert. Dies gilt nicht nur für ^{137}Cs , sondern auch für Plutonium, dessen Isotope erwartungsgemäß alle gleich schnell migrieren. Aktuelle Arbeiten widmen sich der Frage, ob auch Kleinstbodenlebewesen die Bodenschichten verlagern können.

Eine zusätzliche Information ergibt sich aus dem Signal von ^{241}Am . Das dreiwertige Americium ist normalerweise mobiler als das unter Umweltbedingungen

vierwertige Plutonium und sollte schneller in tiefere Bodenschichten migrieren. Zur Americium-Aktivität in tieferen Bodenschichten tragen zwei Prozesse bei: die direkte Migration und die Nachbildung aus dem Beta-Zerfall von ^{241}Pu . Da mit tieferen Schichten das Verhältnis von Plutonium zu Americium abnimmt, überwiegt der zweite Prozess (Abb. 3). In tieferen Bodenschichten bildete sich viel weniger ^{241}Am nach, weil ^{241}Pu sehr langsam migriert und durch seine kurze Halbwertszeit von 14,3 Jahren der größte Teil auf dem Weg in tiefere Bodenschichten zerfällt. Dies gilt nicht für die langlebigeren Isotope ^{238}Pu , ^{239}Pu und ^{240}Pu .

Auch Verwitterung spielt eine wichtige Rolle: Plutonium lag im Brennstoff ursprünglich vierwertig vor. Diese Oxidationsstufe ist chemisch inert, kaum wasserlöslich und wenig mobil. Verwitterungsprozesse führen durch Oxidation zu fünf- und sechswertigem Plutonium. Unter Umweltbedingungen ist es nicht lange stabil, hat aber kurzfristig eine erhöhte Mobilität zur Folge, die auch größer sein kann als für das dreiwertige Americium.

In offenem Gelände wie Feldern und Wiesen führen Dekontaminationsmaßnahmen sowie die oben betrachteten Prozesse dazu, dass sich Radionuklide verlagern und immer weniger in Pflanzen und in die weitere Nahrungskette gelangen. Dadurch sinken die höchsten Beiträge zur effektiven Dosis, die sich aus der Aufnahme von ^{137}Cs über Milch, Fleisch und einige Gemüsesorten ergeben, in den meisten Gebieten unter die zulässigen Grenzwerte. Anders ist es bei in Wäldern geernteten Pilzen, Beeren sowie beim Fleisch dort lebender Wildtiere. Diese sind nach wie vor hoch

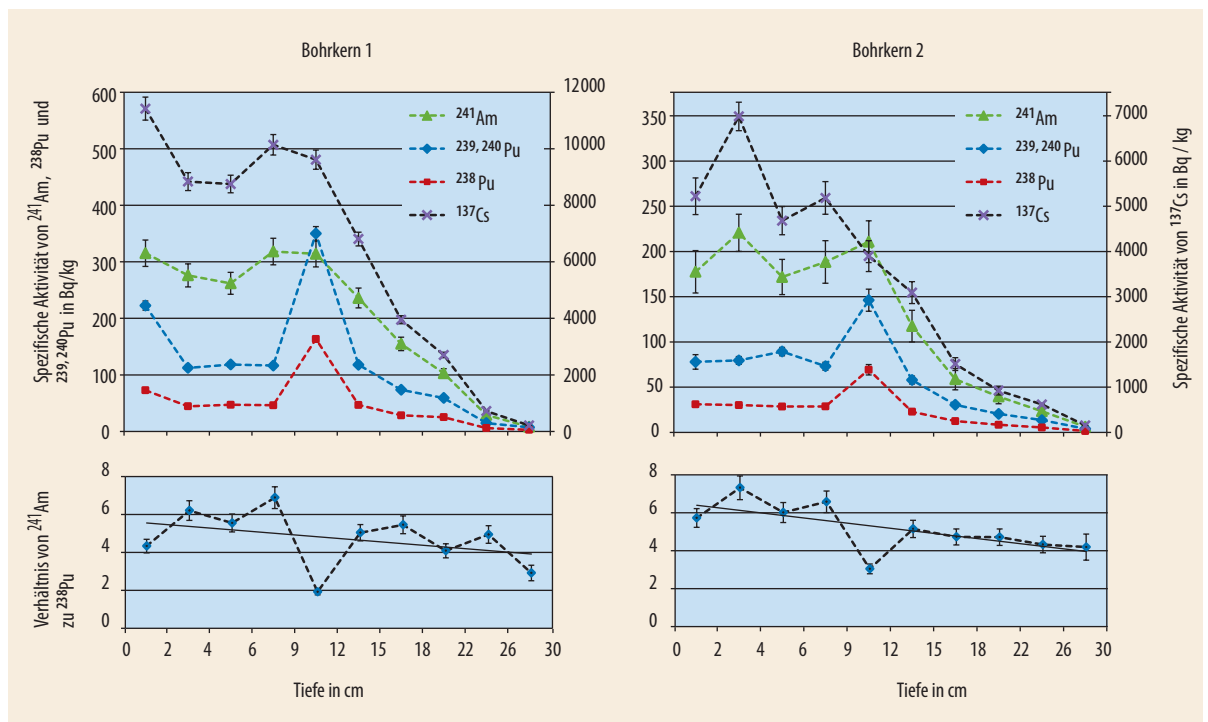


Abb. 3 Zwei Bohrkern, die eine Länge von 30 cm und einen Durchmesser von 3,8 cm haben, ergeben jeweils zehn Teilproben mit Dicken von 2 bis 4 cm. Vergleicht man die Aktivitäten der Teilpro-

ben aus beiden Bohrkernen, zeigen sich sehr heterogene Tiefenprofile für die Plutoniumisotope sowie ^{137}Cs und ^{241}Am . In den Teilproben aus 9 bis 12 cm Tiefe findet sich die maximale Aktivität aller

Plutoniumisotope: Diese Schicht entspricht wohl der Erdoberfläche vor 30 Jahren. Darüber liegt eine recht dicke Schicht organischen Materials, in der die Aktivität von ^{137}Cs erhöht ist.



Abb. 4 Der Blick von einer Straßenbrücke kurz vor Prypjat in Richtung des Reaktorblocks 4 zeigt, dass sich die Natur zwischen 1997 und 2014 deutlich erholt hat. Von der Anlage des

ehemaligen Kraftwerks ist aufgrund der hohen Bäume nur die die neu errichtete „Shelter“ zu erkennen, die sich noch neben dem zerstörten Reaktorblock befindet.

kontaminiert, da es praktisch nicht möglich ist, Waldgebiete zu dekontaminieren. Eine Abnahme ist nur durch den Zerfall und eine langsame Migration des ^{137}Cs zu erwarten.

Unmittelbar nach dem Unfall wurden in direkter Umgebung des Reaktors strahleninduzierte Krankheiten bei Tieren sowie das Absterben von Nadelbäumen (sog. roter Wald) beobachtet. Unter den heutigen Bedingungen in der CEZ entwickeln sich Pflanzen jedoch völlig normal [12]. Das jetzige Niveau der ionisierenden Strahlung schränkt die Wahl potenzieller Nutzpflanzen nicht ein. Allerdings sollte die Weitergabe von ^{137}Cs in die Nahrungskette möglichst gering sein.¹⁾ Etliche Maßnahmen eignen sich dazu: Erhöht man durch Düngung die Menge von Kalium im Boden, nehmen Pflanzen weniger des chemisch homologen ^{137}Cs auf. Der Übergang in die Milch verringert sich, wenn man das Tierfutter mit Cäsium-Bindemittel behandelt. Während diese Maßnahmen anfangs die Belastung von Lebensmitteln drastisch reduzieren konnten, ist dieser positive Trend seit Mitte der 1990er-Jahre – auch wegen ökonomischer Probleme – rückläufig.

Generell nimmt die Kontamination durch ^{137}Cs ab. Daher erwägen die betroffenen Länder, die Grenzen und die Nutzung der kontaminierten Gebiete neu zu organisieren. Etliche Gebiete, die wenige Jahre nach dem Unfall als gefährlich galten, sind heute wieder sicher genug, um sie zu besiedeln und zu nutzen. Die derzeit gültigen Abgrenzungen sind weit restriktiver, als es aus Sicht des Strahlenschutzes erforderlich wäre [13]. In der Ukraine wurde dem mit der Aufhebung von Zone 4 im Jahre 2015 Rechnung getragen (Abb. 2). Für Bewohner der Zonen 2 und 3 wurden einige Privilegien abgeschafft, weil sich die radiologische Belastung reduziert und es Anstrengungen gibt, ein normales Leben zu ermöglichen, wie folgende Beispiele zeigen.

Biokraftstoffe in Zone 2

Um Zone 2 erfolgreich wieder zu besiedeln, sind wirtschaftliche Projekte notwendig, die den Bewohnern Unabhängigkeit und Perspektiven eröffnen. Die vor 1986 überwiegend landwirtschaftliche Nutzung in

vollem Umfang wieder herzustellen, ist schwierig. Obwohl auch in einigen Teilen der Zone 2 die Produktion von Nahrungsmitteln möglich ist, geschieht dies ausschließlich zum privaten Gebrauch. Dabei mögen neben dem hohen Aufwand für die Kontrolle der Lebensmittel auch potenzielle Schwierigkeiten bei ihrer Akzeptanz und Vermarktung eine Rolle spielen. Einige innovative Projekte zur wettbewerbsfähigen Produktion von Gütern sollen die sozioökonomische Entwicklung anstoßen, die für eine Wiederbesiedlung notwendig ist. Eines davon ist der Anbau von Pflanzen für die Nutzung als Energieträger.

Seit 2007 gibt es in Zone 2 das Pilotprojekt „Raps für die Wiederbelebung des Distrikts Narodychi“. Auf Böden, die immer noch mit mehr als 555 kBq/m^2 durch ^{137}Cs kontaminiert sind, werden Nutzpflanzen für die industrielle Verwertung angebaut. Der Rapsanbau verfolgt zwei Ziele: Einerseits wird durch Aufnahme des ^{137}Cs in die Pflanze der Boden um einige Prozent pro Wachstumszyklus dekontaminiert (Phytoremediation). Andererseits dient der Raps dazu, Biodiesel und Biogas zu gewinnen.

In der Nähe des wiederbesiedelten Ortes Stare Sharne wachsen auf einer Fläche von 18 Hektar Plusnull-Raps und Winterraps, weil es dort noch nicht erlaubt ist, Nahrungsmittel anzubauen. Im Rahmen eines japanischen Hilfsprojekts entstand in Narodychi eine Anlage zur Produktion von täglich bis zu 450 Litern Biodiesel. Als Pilotanlage dient sie der Forschung und soll helfen, größere Anlagen zu entwickeln. In Lasky liefert eine Biogas-Anlage die Energie zur Warmwasserversorgung.

Im Rahmen des Versuchsbetriebs ist es möglich, verschiedene Parameter wie Art und Umfang der Düngung zu variieren und den Einfluss der Bodentypen zu untersuchen. Will man die Pflanzen später weiter nutzen, darf nur möglichst wenig Cäsium vom Boden in die Pflanze übergehen. Will man dagegen die Phytoremediation optimieren, sollte der Transfer in die Pflanzen so hoch wie möglich sein. Der Versuchsbetrieb zeigte, dass sich die im Distrikt Narodychi herrschenden Klimabedingungen für den Rapsanbau eignen und mit Hilfe von Kalkdüngung gute Ernten möglich sind. Auch über mehrere Jahre hinweg hat die

1) Als Abschätzung gilt, dass eine einmalige Zufuhr von $100 \text{ Bq } ^{137}\text{Cs}$ zu einer effektiven Ein-Jahres-Folgedosis von $1,3 \mu\text{Sv}$ führt. Nach einem Jahr ist das ^{137}Cs vollständig ausgeschieden. Eine einmalige Exposition bleibt daher höchstwahrscheinlich folgenlos. Gefährlich ist der dauerhafte Verzehr belasteter Lebensmittel.

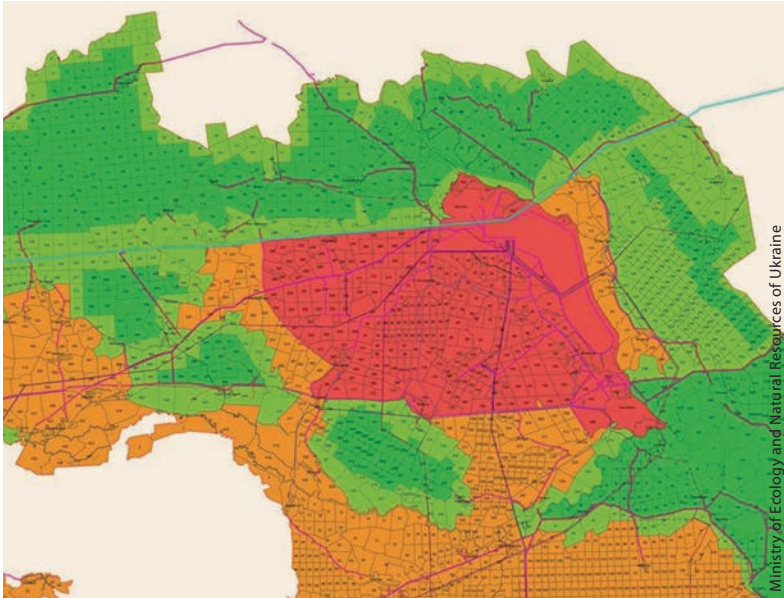


Abb. 5 Das geplante Biosphärenreservats spart u. a. Industriekomplexe des ehemaligen Kernkraftwerks aus (rot). Die „conservation area“ (dunkelgrün) dient allein der Forschung und ist von

Pufferzonen (hellgrün) umgeben. Wirtschaftliche Aktivitäten wie Forstwirtschaft oder Landnutzung sollen der Rehabilitation der kontaminierten Flächen dienen (orange).

Fruchtbarkeit des Bodens nicht abgenommen. In der oberen Bodenschicht verlagerte sich ^{137}Cs , während der wasserlösliche Anteil stark absank.

Im Rapssamen findet sich hauptsächlich ^{137}Cs , wohingegen ^{90}Sr eher in die restlichen Pflanzenteile übergeht. Für beide Isotope gelang es, die derzeitigen Grenzwerte zur Gewinnung technischer Produkte wie Öl einzuhalten und die Pflanzen ohne Einschränkung zu verwenden.²⁾ Nach der Ölproduktion verbleibt Schlamm, in dem sich Aktivitäten von knapp 600 Bq/kg durch ^{137}Cs und bis zu 67 Bq/kg durch ^{90}Sr finden. Dieses Material dient als Basis, um Biogas zu gewinnen. Bei gleichzeitiger Produktion von 800 bis 1000 kg Biodiesel und 3000 m³ Biogas pro Hektar und Jahr nimmt die gesamte Kontamination als Nebeneffekt um etwa 0,1 Prozent ab. Bezogen auf den für Pflanzen verfügbaren Teil des ^{137}Cs beträgt die Remediation immerhin rund 17 Prozent pro Jahr.

Bei diesen Arbeiten in Zone 2 ist es erforderlich, die Produkte zu überwachen und den Strahlenschutz der Beschäftigten sicherzustellen. Zur Erprobung werden weitere Nutzpflanzen angebaut, u. a. Silbergras, schnell wachsende Weidesorten und Artischocken.

Biosphäre in Reaktornähe

Eine Wiederbesiedlung oder landwirtschaftliche Nutzung der am höchsten kontaminierten Gebiete in der CEZ ist derzeit nicht geplant. Das Ministerium für Ökologie und natürliche Ressourcen der Ukraine erarbeitet dagegen seit 2013 gezielte Pläne, ein Biosphärenreservat in der CEZ einzurichten. In den kontaminierten Gebieten der CEZ haben sich Flora und Fauna nicht nur von den frühen Schädigungen durch lokal extrem hohe Strahlenbelastungen erholt.

So paradox dies erscheinen mag, entwickelt sich in der CEZ ein einzigartiges ökologisches Schutzsystem, weil der Mensch keinen Einfluss mehr nimmt (Abb. 4). Zahlreiche internationale Forschungsprojekte, auch außerhalb der Radioökologie, nutzen bereits diese „ungestörte“ Naturlandschaft.

Vor diesem Hintergrund erscheint es konsequent, ein offizielles Reservat einzurichten. Das Reservat soll knapp 2300 km² von CEZ und Zone 2 umfassen. Dabei bleiben die Industriekomplexe des ehemaligen Kernkraftwerks, der Abfallentsorgungskomplex „Vector“ sowie der Lagerbereich für radioaktive Abfälle „Buryakivka“ und einige weitere Komplexe mit über 320 km² ausgenommen (Abb. 5). Die Grenzen der heutigen CEZ bleiben erhalten; allerdings werden der rechtliche Status und der praktische Umweltschutz gestärkt.

Die Einrichtung des Biosphärenreservats soll helfen, die natürlichen Bedingungen des Ökosystems der Polissya Region zu bewahren und gleichzeitig die Barrierefunktion der CEZ zu erhalten und auszubauen. Ein weiteres Ziel besteht darin, das hydrologische Regime zu stabilisieren und die kontaminierten Gebiete zu rehabilitieren. Innerhalb des Biosphärenreservats ist geplant, das Umweltüberwachungssystem zu verbessern sowie nationale und internationale Forschungsvorhaben zu unterstützen.

Umgeben von Flächen des Biosphärenreservats befindet sich der Reaktorblock 4, den zukünftig der New Safe Confinement einhüllen soll. Massive ausländische Subventionen hauptsächlich von EU-Mitgliedsstaaten finanzieren zurzeit die Errichtung dieser „Shelter“. Sie soll den Reaktorblock 4 und den inzwischen maroden Sarkophag einschließen und langfristig einen Rückbau ermöglichen. Etwa 750 km² des Reservats bilden die sog. „Conservation Area“. Hier sollen Forschungsaktivitäten gemäß nationaler Gesetze stattfinden. Außerdem wird es möglich sein, Vorrichtungen zum Schutz vor Waldbränden und Löschwassertanks zu errichten und Schädlingsbekämpfung durchzuführen. Während Maßnahmen zum Schutz und zur Stabilisierung des Grundwassers gestattet sind, wird jegliche Art wirtschaftlicher Nutzung untersagt sein. Pufferzonen mit einer Fläche von etwa 700 km² umgeben diesen Bereich. Sie schützen vor Bränden und dienen der Forschung und Ausbildung. Darüber hinaus umfasst das Reservat Flächen für wirtschaftliche Aktivitäten, in denen Landnutzung, Forstwirtschaft und Wassernutzung möglich sind, die aber bei der Rehabilitation der kontaminierten Flächen helfen.


Mit dem Gesetz blickt das Ministerium in die Zukunft, indem es Maßnahmen zur potenziellen Wiederherstellung so genannter „anthropogener Landflächen“ des Biosphärenreservats zu einem späteren Zeitpunkt in Aussicht stellt. Zunächst aber soll gemeinsam mit Belarus unter Einbeziehung der dortigen kontaminierten Gebiete ein transnationales, insgesamt 5000 km² umfassendes Reservat entstehen. Dieses Reservat „Polesskiy“ soll Teil des UNESCO-Programms „Man and Biosphere“ sein, das zum Ziel hat, das Verhältnis von Menschen zu ihrer Umwelt zu verbessern.

2) Die Grenzwerte betragen für ^{137}Cs 600 Bq/kg und für ^{90}Sr 200 Bq/l. Zum Vergleich: Die EU empfiehlt als Grenzwert für die Aktivität von ^{137}Cs in Milchprodukten 350 Bq/kg und für alle anderen Erzeugnisse 600 Bq/kg [14]. Diese Werte dienen der Herstellung der Versorgungssicherheit bei großflächig kontaminierten Gebieten. Diese Gefahr hat in Deutschland zu keiner Zeit bestanden.

Literatur

- [1] Details zum Unfallablauf finden sich in Physik Journal, April 2006, ab S. 29
- [2] R. Michel und G. Voigt, Physik Journal, April 2006, S. 37
- [3] R. Michel, in: 20 Jahre nach Tschernobyl - Eine Bilanz aus der Sicht des Strahlenschutzes, Fachverlag H. Hoffmann GmbH, Berlin (2006)
- [4] Sources and effects of ionizing radiation, Vol. II, Annex D: Health effects due to radiation from Chernobyl accident, UNSCEAR Report (2008)
- [5] 20 years after Chornobyl Catastrophe. Future Outlook, National Report of Ukraine, Kyiv (2006)
- [6] The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 103, Ann. ICRP 37 (2-4), (2007).
- [7] Atlas of Radioactive Contamination of Ukraine (2008), www.isgeo.com.ua/en/products/atlases/radatlas
- [8] Radiation conditions on the territory of the Republic of Belarus (Map), State Committee on Land Resources, Geodesis and Cartography of the Republic of Belarus, Minsk (2000)
- [9] S. V. Fesenko et al., J. Environ. Radioact. 34, 287 (1997)
- [10] V. A. Kashparov et al., J. Environ. Radioact. 72, 335 (2004)
- [11] Chernobyl's legacy: health, environmental and socio-economic consequences. The Chernobyl Forum 2003-2005. 2nd edition, www.iaea.org/sites/default/files/chernobyl.pdf
- [12] Sources, effects and risks of ionizing radiation, Vol. II, Annex B: Effects of radiation exposure of children, UNSCEAR Report (2013)
- [13] Chernobyl Nuclear Accident, In Focus, IAEA www.iaea.org/newscenter/focus/chernobyl
- [14] Verordnung (EG) Nr. 733/2008 des Rates vom 15. Juli 2008, beck-online.beck.de/?bcid=Y-100-G-EWG_VO_733_2008

DIE AUTOREN



Clemens Walther (FV Massenspektrometrie, Strahlen- und Medizinphysik) studierte Physik in Mainz und Seattle. Er promovierte 1998 und wechselte danach zum heutigen KIT, Institut für Nukleare Entsorgung (INE). 2008 habilitierte er sich in Kernchemie. Seit 2012 leitet er das Institut für Radioökologie und Strahlenschutz an der Universität Hannover. Er ist Mitglied des Ausschusses Radioökologie der Strahlenschutzkommission, stellv. Leiter der Fachgruppe Nuklearchemie der GDCh und war von 2012 bis 2015 Leiter des Fachverbands Massenspektrometrie der DPG.

Peter Brozynski hat in Hannover Physik studiert und arbeitet derzeit an seiner Masterarbeit zum Thema „Migration von Radionukliden in Bodenproben aus der nördlichen Ukraine“. Im Herbst 2014 hat er an einer Exkursion nach Tschernobyl teilgenommen, im Januar 2016 war er in Fukushima.



Sergiy Dubchak erwarb 1997 in Kiew, Ukraine, seinen Master in Festkörperphysik und Radioökologie. 2007 bis 2013 promovierte er am Institut für Umweltp Physik in Krakau, Polen. 2014 wurde er zum Associate Professor in Kiew ernannt. Er befasst sich insbesondere mit der Migration von Radionukliden und der Artenbildung im Ökosystem der „Chernobyl Exclusion Zone“.

