

## 20 Jahre nach Tschernobyl

**Die Folgen des Reaktorunglücks von Tschernobyl sind für Mensch und Umwelt – das zeigen Untersuchungen internationaler Gremien – weniger schlimm als befürchtet und immer noch kolportiert. Es bleiben aber zu Vergangenheit und Zukunft der hoch kontaminierten Gebiete Fragen, deren Beantwortung nuklearchemische Kompetenz erfordert.**

◆ Am frühen Morgen des 26. April 1986 kam es im Kernkraftwerk von Tschernobyl zum bisher größten Unfall in der Geschichte der friedlichen Nutzung der Kernenergie. Es geschah während eines technischen Tests bei niedriger Leistung in Block 4 der Anlage: Sicherheitssysteme waren abgeschaltet worden, und unsachgemäßer und instabiler Betrieb des Reaktors

führte zu einer unkontrollierbaren Leistungsexkursion, als deren Konsequenz sich Dampfexplosionen ereigneten, die das Reaktorgebäude schwer beschädigten und den Reaktor vollständig zerstörten.

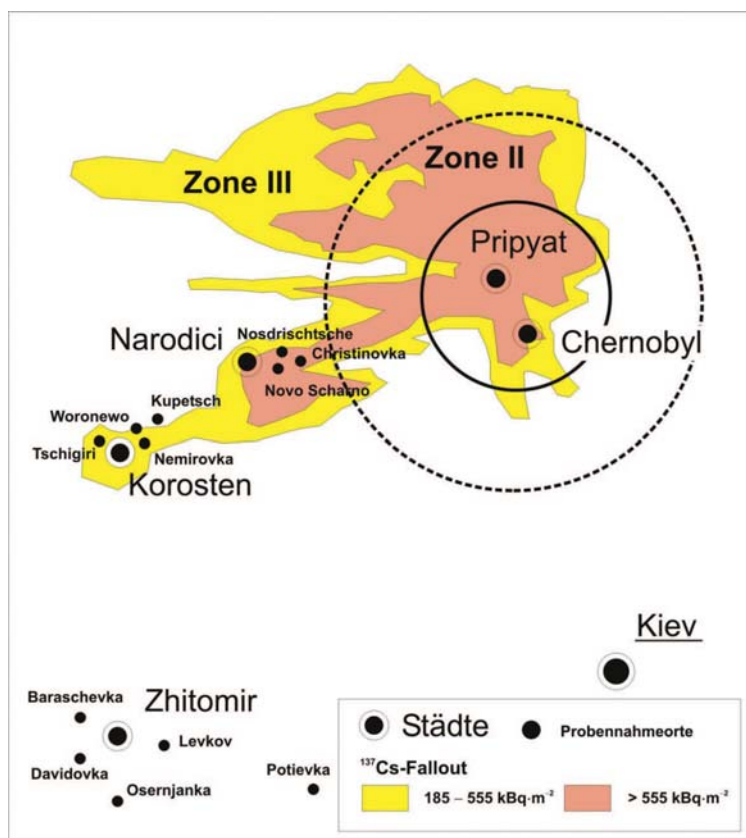


Abb. 1. Karte mit den Kontaminationszonen II und III in der nördlichen Ukraine und im südlichen Belarus (Weißrussland). Die Kreise zeigen Abstände von 30 und 60 km vom Reaktor an. Die Zone I entspricht weitgehend dem 30-km-Umkreis um den Reaktor und ist hier nicht speziell ausgewiesen. Weitere hoch kontaminierte Gebiete liegen in Belarus im Raum Gomel/Mogilev und in der Russischen Föderation östlich von Bryansk.<sup>7)</sup> Eingezeichnet sind Probennahmeorte bei Korosten und Narodici in der Ukraine, die vom Zentrum für Strahlenschutz und Radioökologie der Universität Hannover untersucht wurden. Die Probennahmeorte in der Umgebung von Zhitomir sind praktisch nicht vom Fallout des Unfalls betroffen und dienen zur Bestimmung des Prä-Tschernobyl Fallouts.

### Freisetzung und Fallout von Radionukliden

◆ Durch die einleitenden Explosionen, die nachfolgenden Brände und Emissionen des schmelzenden Reaktorkerns im Kernkraftwerk Tschernobyl kam es zur Freisetzung von Radionukliden mit einer Aktivität (ohne Edelgase) von insgesamt 5300 PBq (1 PBq =  $10^{15}$  Bq), davon 1760 PBq  $^{131}\text{I}$ , 33 PBq  $^{137}\text{Cs}$ , 5 PBq  $^{90}\text{Sr}$  und 10 PBq Pu (Erläuterung zu diesen und weiteren radiologischen Maßeinheiten siehe Infokasten „Strahlenschutz“ auf S. 395). Sowohl im Anteil an der Gesamtaktivität als auch im zeitlichen Verlauf der Freisetzungen unterschieden sich die einzelnen Radionuklide deutlich voneinander. So nimmt man eine vollständige Emission der Edelgase an. Von den flüchtigen Elementen, zu denen Te, I und Cs zu rechnen sind, wurden 30 bis 50% freigesetzt, mittelflüchtige Elemente, darunter Sr und Ru, zu ca. 5% und schwerflüchtige wie Mo, Zr und die Aktinoide nur zu ca. 3% des Inventars.

Der Transport der Radionuklide in der Troposphäre bei stark wechselnden meteorologischen Bedingungen in geringer Höhe und lokale Niederschläge machten den Fallout

sehr inhomogen. Im Fernbereich überwogen Iod- und Cäsiumisotope, wenn auch das gesamte Spektrum emittierter Nuklide in ganz Europa nachweisbar war. Die überwiegenden Aktivitäten von <sup>90</sup>Sr und der Aktinoide wurden nicht großräumig verfrachtet, sondern verblieben im Nahbereich um den Reaktor.

Die unfallbedingten Kontaminationen mit langlebigen Radionukliden werden im Allgemeinen als <sup>137</sup>Cs-Fallout angegeben. Dabei hat sich eine Einteilung in vier Kontaminationszonen eingebürgert, die bereits 1986 von den sowjetischen Behörden eingeführt und von den Nachfolgestaaten in gesetzlichen Regelwerken übernommen wurde (Tabelle 1).

Gebiete mit den drei höchsten Kontaminationsklassen liegen nahezu ausschließlich in Belarus (Weißrussland), der Russischen Föderation und der Ukraine (Abbildung 1). Die Zonen I und II wurden nacheinander zwangsevakuiert. Die Bewohner der Zone III konnten bleiben, erhielten aber ein Anrecht auf freiwillige Umsiedlung. Zone IV gilt als Zone andauernder radiologischer Kontrolle.

**Strahlenexpositionen in den hoch kontaminierten Gebieten**

◆ Die aus dem Unfall resultierenden Strahlenexpositionen wurden vielfach durch internationale Gremien evaluiert.<sup>1-7)</sup> Nach nunmehr

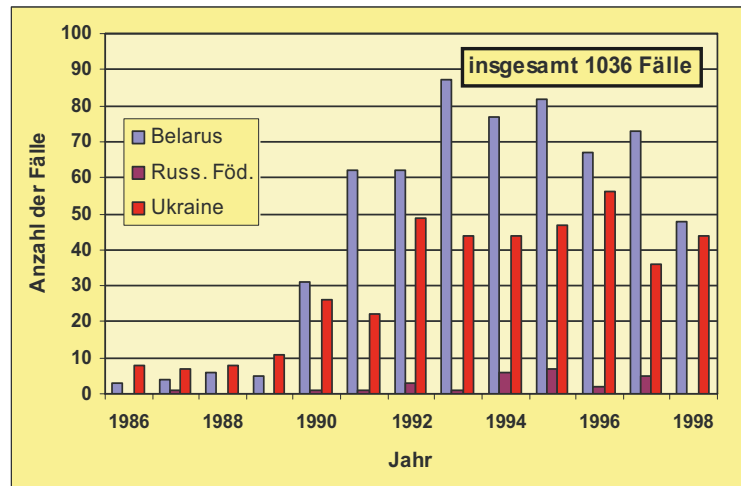


Abb. 2. Anstieg des Schilddrüsenkrebses bei Personen, die zum Zeitpunkt des Unfalls Kinder oder Jugendliche waren und in den hoch kontaminierten Gegenden der Strahlenexposition durch Radioiod ohne Gegenmaßnahmen ausgesetzt waren.

20 Jahren liegen zusammenfassende Darstellungen des UN-Tschernobyl-Forums vor,<sup>8,9)</sup> die eine sichere Bewertung der Unfallfolgen für die Rettungsmannschaften, die Liquidatoren, die Evakuierten und die an ihren Wohnorten verbliebene Bevölkerung ermöglichen. Diese Forum wurde 2003 als Expertengremium von der IAEA in Zusammenarbeit mit der FAO, UNDP, UNEP, UNOCHA, UNSCEAR, WHO und der Weltbank und den zuständigen Behörden in Belarus, der Russischen Föderation und der Ukraine mit dem Ziel eingerichtet, umfassende Beurteilungen („authoritative consensual statements“) der Folgen des Unfalls für Mensch und Umwelt abzugeben sowie Empfehlungen für Sanierungsmaßnahmen, Gesundheitsprogramme und zukünftigen Forschungs-

bedarf zu erarbeiten.

Die Rettungsmannschaften, die unmittelbar bei den Löscharbeiten zum Einsatz kamen, erhielten Strahlendosen bis 16 Gy. Bei 237 Personen bestand Verdacht auf akute Strahlenkrankheit; er bestätigte sich bei 134 Personen. 31 Personen von den Rettungsmannschaften verstarben infolge der Explosionen und der Strahlenkrankheit im Jahr 1986, weitere 19 verstarben von 1987 bis 2004 aus unterschiedlichen Ursachen.

Auch die knapp 400 000 Liquidatoren – sie waren von 1986 bis 1989 mit Sanierungs- und Aufräumarbeiten beschäftigt – erhielten hohe Strahlenexpositionen von im Mittel 170 mSv (187 000 Personen im Jahr 1986), 130 mSv (107 000 Personen im Jahr 1987), 30 mSv (45 000 Personen im Jahr 1988) und 15 mSv

Land	Ausdehnung des <sup>137</sup> Cs-Fallouts in km <sup>2</sup>			
	Zone IV 37 – 185 kBq · m <sup>-2</sup>	Zone III 185 – 555 kBq · m <sup>-2</sup>	Zone II 555 – 1480 kBq · m <sup>-2</sup>	Zone I 1480 – 3700 kBq · m <sup>-2</sup>
Russische Föderation	49800	5700	2100	300
Belarus	29900	10200	4200	2200
Ukraine	37200	3200	900	600
Schweden	12000	Außerhalb der ehemaligen USSR gab es <sup>137</sup> Cs-Fallout von mehr als 185 kBq · m <sup>-2</sup> lediglich auf kleinen Flächen in Schweden bei Gävle und in Österreich bei Salzburg.		
Finnland	11500	Der <sup>137</sup> Cs-Fallout in Deutschland betrug im Voralpenland 32 kBq · m <sup>-2</sup> , südlich der Donau 16 kBq · m <sup>-2</sup> und nördlich der Donau 4 kBq · m <sup>-2</sup> .		
Österreich	8600	Im Bayerischen Wald und südlich der Donau wurden durch lokale Niederschläge kleinräumig bis zu 100 kBq · m <sup>-2</sup> <sup>137</sup> Cs abgelagert. In der norddeutschen Tiefebene betrug der <sup>137</sup> Cs-Fallout dagegen selten mehr als 4 kBq · m <sup>-2</sup> .		
Norwegen	5200			
Bulgarien	4800			
Schweiz	1300			
Griechenland	1200			
Slowenien	300			
Italien	300			
Republik Moldawien	60	<sup>137</sup> Cs enthält 2 – 4 kBq · m <sup>-2</sup> aus dem globalen Fallout der oberirdischen Kernwaffenexplosionen in den 1960ern.		

Tab. 1. Durch den Unfall von Tschernobyl mit <sup>137</sup>Cs-Fallout von mehr als 37 kBq·m<sup>-2</sup> kontaminierte Regionen in Europa.<sup>7)</sup>

Land	Gegend	Zeitraum im Jahr 1986	Zahl	Schilddrüsendosis [mSv]	Externe effektive Dosis [mSv]	Interne effektive Dosis [mSv]
Belarus	insgesamt 108 Siedlungen	2. Mai – Sept.	24725	1000	30	6
Russische Föderation	4 Dörfer im Krasnaya-Gora-Distrikt, Bryansk-Region	August	186	< 5000	< 50	< 50
Ukraine	insgesamt 75 Siedlungen	27. April –Sept.	9406	470	20	13

Tab. 2. Mittelwerte der Strahlenexposition der nach dem Unfall von Tschernobyl im Jahr 1986 evakuierten Personen.<sup>7)</sup>

(42 500 Personen im Jahr 1989). Erst ab 1988 war möglich, den damals gültigen Grenzwert von 50 mSv pro Jahr für die berufliche Strahlenexposition einzuhalten. Heute können die aktuellen Grenzwerte bei den andauernden Sanierungsarbeiten eingehalten werden.

Zwischen dem 27. April 1986 und September 1986 wurden in der USSR 187 Siedlungen mit 116 317 Einwohnern evakuiert. Große Anstrengungen galten der Rekonstruktion der Strahlenbelastung der Evakuierten (Tabelle 2). Im Jahr 1986 dominierten bei diesen Personen die kurzlebigen Radionuklide die Strahlenexposition. <sup>131</sup>I, <sup>132</sup>Te+<sup>132</sup>I und <sup>140</sup>Ba+<sup>140</sup>La bewirkten 60 bis 80% der effektiven Dosis; <sup>137</sup>Cs trug lediglich 3 bis 5% bei.

Die nicht evakuierte Bevölkerung in Gebieten mit <sup>137</sup>Cs-Fallout von mehr als 37 kBq·m<sup>-2</sup> erhielt sowohl hohe Expositionen durch <sup>131</sup>I als auch in den Folgejahren durch langlebige Radionuklide und bildet die eigentliche kritische Gruppe der strahlenexponierten Bevölkerung. Während die Evakuierung einen Teil der potentiellen Strahlenexposition der Betroffenen abwendete,

wurden in den ersten Tagen nach dem Unfall praktisch keine Maßnahmen getroffen, die zu einer Verringerung der Strahlenexposition der Bevölkerung in den hoch kontaminierten Gegenden hätte führen können. Speziell Maßnahmen zur Schilddrüsenblockade durch Verabreichung stabilen Iods waren weder rechtzeitig, noch systematisch, noch flächendeckend.

**Strahlenexpositionen durch Radioiod**

◆ Zur Beurteilung der Strahlenexposition der in diesen Gebieten verbliebenen Bevölkerung ist es sinnvoll, die Strahlenexposition der Schilddrüsen durch Radioiod, vor allem <sup>131</sup>I, getrennt von der weiterer Gewebe und Organe durch andere Radionuklide zu betrachten. In den ersten Monaten nach dem Unfall waren wegen der <sup>131</sup>I-Freisetzen die Schilddrüsen die höchstexponierten Gewebe. Der Hauptexpositions-pfad war der Weide-Kuh-Milch-Pfad zusätzlich zu einer weniger bedeutenden Komponente durch Inhalation.

Von besonderer Bedeutung ist die Altersabhängigkeit der Schilddrü-

senexposition. Die Strahlenexposition der Schilddrüse ist für Kinder um Faktoren zwischen zwei und zehn höher als für Erwachsene. Sowohl für Kinder unter sieben Jahren als auch für die Gesamtbevölkerung lagen die Schilddrüsenexpositionen in ländlichen Gegenden um einen Faktor zwei höher als im städtischen Umfeld.

In Belarus muss man davon ausgehen, dass 466 600 Personen eine mittlere Schilddrüsendosis von 0,3 Gy erhielten. Dabei lag die mittlere Schilddrüsendosis von Kindern unter 18 Jahren deutlich höher. 46 700 Kinder erhielten Dosen von im Mittel 0,7 Gy.

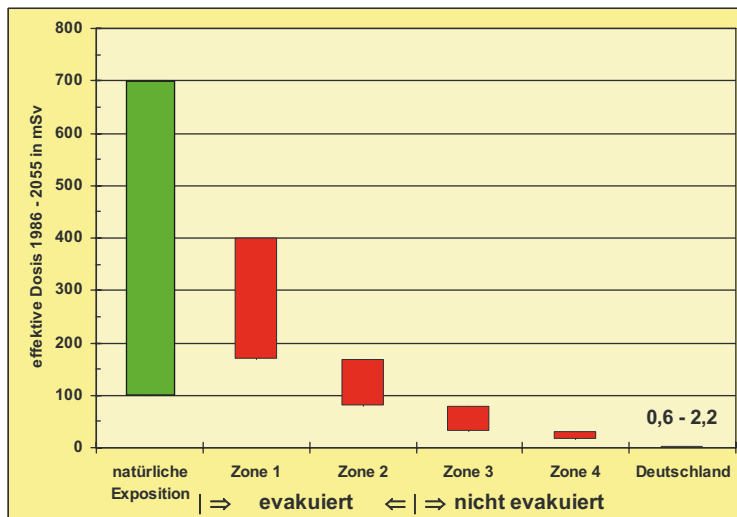
Maximale Schilddrüsendosen überstiegen aber für mehr als 99% der erwachsenen Bevölkerung wohl nicht 10 Gy. Mittlere Schilddrüsendosen für die gesamte Bevölkerung der Ukraine von 12 450 000 Personen lagen bei 0,03 Gy. 1 725 000 Personen erhielten Schilddrüsendosen oberhalb 0,05 Gy, die mittlere Dosis lag bei dieser Bevölkerungsgruppe bei 0,15 Gy.

**Gesundheitliche Effekte**

◆ Beginnend mit dem Jahr 1990 stieg die Erkrankungsrate an Schilddrüsenkrebs in Belarus und in der Ukraine unter den Personen drastisch an, die zum Zeitpunkt des Unfalls Kinder oder Jugendliche waren (Abbildung 2). Bisher traten als Folge der hohen Strahlenexpositionen durch Radioiod mehr als 4 000 Fälle von Schilddrüsenkrebs bei Kindern auf; neun Patienten sind verstorben. Die große Zahl der Betroffenen machte es zum ersten Mal möglich, die Höhe des Krebsrisikos durch Inkorporation von Radioiod abzuschätzen.<sup>10)</sup>

Bei keiner der exponierten Personengruppen kam es zu einer sig-

Abb. 3. Lebenszeitdosen (1986 bis 2055) ländlicher Selbstversorger ohne Schilddrüsendosis in Gebieten mit <sup>137</sup>Cs-Fallout von mehr als 37 kBq·m<sup>-2</sup> im Vergleich zum Bereich natürlicher Strahlenexpositionen. Für die in Deutschland durch den Unfall von Tschernobyl bedingten Strahlenexpositionen sind die Dosisabschätzungen der SSK<sup>5)</sup> angegeben.



nifikant Erhöhung anderer strahlenbedingter Erkrankungen als Schilddrüsenkrebs. Insbesondere kam es weder zu mehr soliden Tumoren, Leukämien, Erbschäden oder Geburtsfehlern.

Es kam allerdings vermehrt zu Gesundheitsstörungen, für die eine ursächliche Verbindung mit Strahlenwirkungen bisher nicht nachgewiesen werden kann, die aber mit dem posttraumatischen Stress und den schweren sozialen Konsequenzen des Unfalls in Zusammenhang stehen können.

### Rekonstruktion der <sup>131</sup>I-Expositionen

◆ Voraussetzung für die Ermittlung des Schilddrüsenkrebsrisikos ist die Rekonstruktion der Strahlenexposition durch Radioiod. In den ersten Wochen nach dem Unfall wurden in der damaligen USSR ca. 350 000 Direktmessungen der <sup>131</sup>I-Aktivitäten menschlicher Schilddrüsen durchgeführt. Diese Studien waren von sehr unterschiedlicher Qualität, und es besteht weiterhin Bedarf an zuverlässigen Dosisrekonstruktionen. Das Tschernobyl-Forum hat diese retrospektive Dosimetrie als eins der wichtigsten Themen in der Nachsorge des Unfalls von Tschernobyl bezeichnet.

Eine Möglichkeit zur retrospektiven Dosimetrie bietet die Analyse von langlebigem <sup>129</sup>I mit einer Halbwertszeit von 15,7 Millionen Jahren.

Durch den Unfall wurden etwa 13 GBq <sup>129</sup>I zusammen mit dem kurzlebigen <sup>131</sup>I freigesetzt. Während das <sup>131</sup>I mit acht Tagen Halbwertszeit wenige Wochen nach dem Unfall zerfallen war, ist das <sup>129</sup>I noch in den Böden der betroffenen Gebiete zu finden und bietet die Möglichkeit, den damaligen Fallout von <sup>131</sup>I heute wiederum zu ermitteln. Mit der Beschleunigermassenspektrome-

trie lassen sich in Bodenproben noch 0,3 mBq·kg<sup>-1</sup> nachweisen.

Die State University of Agriculture and Ecology der Ukraine in Zhitomir, die Universität Hannover und das PSI/ETH-Tandem-AMS-Laboratorium an der ETH Zürich haben derartige Untersuchungen durchgeführt.<sup>11)</sup> In der Zone II in der nördlichen Ukraine wurden massenspektrometrisch Schilddrüsendosen



**Rolf Michel**, Jahrgang 1945, Professor für Strahlenschutz und Radioökologie, studierte Physik an der Universität zu Köln, (Diplom in Physik, 1971) und promovierte 1975 über neutroneninduzierte Effekte in der Mondoberfläche. 1980 habilitierte er sich in Kernchemie und ist seit 1984 Professor an der Universität Hannover, wo er das Zentrum für Strahlenschutz und Radioökologie der Universität Hannover leitet. Er ist Träger des Fritz-Strassmann-Preises der Fachgruppe Nuklearchemie in der GDCh.



von bis zu 15Sv für Kinder in den erst nach dem Zerfall des  $^{131}\text{I}$  evakuierten Gebieten um Narodici ermittelt. In Zone III bei Korosten lagen die Schilddrüsendosen bei Kindern noch um 1 Sv.

#### Strahlenexpositionen durch langlebige Radionuklide

◆ Die langfristige Strahlenexposition der Bevölkerung als Folge des Unfalls geschah als externe Bestrahlung durch  $^{137}\text{Cs}$  und andere Radionuklide und als interne Bestrahlung durch Aufnahme von Radionukliden mit Nahrungsmitteln, Wasser und Luft. In den Jahren 1986 bis 2005 lagen die mittleren kumulierten effektiven Dosen (ohne Schilddrüsendosis) für die Bevölkerung der mit mehr als  $37\text{ kBq}\cdot\text{m}^{-2}$  durch  $^{137}\text{Cs}$  kontaminierten Zonen zwischen 10 und 20mSv. Weniger als 0,3% der Bevölkerung erhielten Strahlenexpositionen von mehr als 100 mSv.

Die große Mehrheit der etwa fünf Millionen Menschen, die in den kontaminierten Zonen in Belarus, der Russischen Föderation und der Ukraine leben, erhalten effektive Dosen von weniger als 1 mSv pro Jahr. Die gesamten, internen und externen unfallbedingten Expositionen ohne Schilddrüsendosen lagen im Zeitraum 1986 bis 2005 für 5,2 Millionen Menschen im Mittel bei 10mSv zusätzlich zur natürlichen Exposition von im weltweiten Mittel 48mSv.

Obwohl die Abnahme der Strahlenexposition in den kontaminierten Zonen voraussichtlich sehr langsam vonstatten gehen wird (ca. 3 bis 5% pro Jahr), ist die überwiegende Dosis durch den Unfall bereits akkumuliert, sodass bereits jetzt sichere Abschätzungen der Lebenszeitdosen möglich sind (Abbildung 3).

#### Die Zukunft der evakuierten Zonen

◆ Die aktuellen jährlichen Strahlenexpositionen in den hoch kontaminierten Gebieten können am Beispiel des Jahres 2001 eingeschätzt werden (Tabelle 3, S. 394). Dabei ist die Strahlenexposition abhängig von den Böden, auf denen die Menschen le-

ben, da diese die Sorption der Radionuklide und den Transfer vom Boden zu Mensch und Tier beeinflussen. Für die hoch kontaminierten Regionen ist, von ländlichen Gegenden mit Torfböden einmal abgesehen, damit zu rechnen, dass die jährlichen Strahlenexpositionen als Folge des Unfalls von Tschernobyl in den nicht evakuierten Zonen unterhalb des in den drei Ländern geltenden Grenzwertes von 1 mSv pro Jahr liegen.

Selbst in weiten Bereichen der evakuierten Zonen II und I liegen die durch den Unfall bedingten Strahlenexpositionen heute vielfach im Bereich der natürlichen Strahlenexpositionen. Ein Beispiel für die kritische Gruppe in diesen Zonen ist die Bevölkerung von Christinovka, einige Kilometer östlich von Narodici in der Westfahne des Fallouts in der nördlichen Ukraine, ca. 75 km Luftlinie südwestlich vom Reaktor in Tschernobyl entfernt. Christinovka ist ein typisches Bauerndorf der Zone II in der „Polesskoje“ mit landwirtschaftlich genutzten Flächen, semi-natürlichen Weiden und Wäldern. Die Böden im Gebiet von Narodici sind sodige und lehmige Podsole. Die Einwohner wurden erst zwischen 1988 und 1990 evakuiert. Seit 1994 sind ca. 30 Familien in ihre Heimat zurückgekehrt. Sie sind Selbstversorger und leben mit Ausnahme von Brot von lokal angebau-



Abb. 4.  
**Messung der Körperaktivität bei Bewohnern von Christinovka.**

ten Nahrungsmitteln. Seit Mitte der 1990er Jahre wird die Strahlenexposition dieser Rückkehrer in Zusammenarbeit der State University of Agriculture and Ecology der Ukraine in Zhitomir und der Universität Hannover untersucht.<sup>12,13)</sup>

Zwischen Juli 1997 und Juli 1998 wurde die Strahlenexposition der Einwohner von Christinovka durch <sup>137</sup>Cs mit Personendosimetern und Ganzkörpermessungen (Abbildung 4) ermittelt.<sup>12)</sup> Für 18 Personen ergab sich eine mittlere totale effektive Dosis von 1,3 mSv. Unter den untersuchten Personen waren zwei, die aufgrund ungewöhnlich langer Aufenthalte in den Wäldern und extrem hohen Pilzverzehr effektive Dosen von 13 und 21 mSv erhielten. Für das Jahr 2003 ergab sich eine mittlere effektive Dosis der Bewohner von Christinovka von 1,6 mSv.<sup>13)</sup> Dieser Wert liegt höher als in den Jahren 1997/1998. Er berücksichtigt auch eine interne Exposition durch <sup>90</sup>Sr von 0,4 mSv und den Umstand, dass im Jahr 2003 aufgrund anderer Witterungsbedingungen, die den Transfer der Radionuklide vom Boden in die Nahrungskette beeinflussten, erhöhte Aktivitäten in Waldbeeren und Pilzen höhere Expositionen verursachten.

Abb. 5  
**Der Sarkophag im Jahr 2002. Diese Schutzvorrichtung wurde von Mai bis Oktober 1986 unter großem zeitlichem Druck und sehr schwierigen Randbedingungen als Konstruktion aus Stahl und Beton um den zerstörten Reaktor erbaut, um den weiteren Austrag radioaktiver Stoffe zu verhindern. Er war für eine Standzeit von rund 30 Jahren konzipiert. In den nächsten Jahren wird der Sarkophag mit einem „Shelter“ genannten Bau überdeckt werden, in dem auch der vollständige Rückbau der Anlage vorgenommen werden soll.**

Angesichts dieser relativ niedrigen Strahlenexpositionen in Teilen der evakuierten Zonen im Bereich der Schwankungsbreite der natürlichen Strahlenexpositionen stellt sich für die Zukunft die Frage, wann und unter welchen Bedingungen zur Normalität zurückgekehrt werden kann. Dort wird jedoch auch die Existenz kleiner kritischer Bevölkerungsgruppen mit vergleichsweise hohen Expositionen und die nur mit radiochemischer Analytik erfassbaren Beiträge von <sup>90</sup>Sr und Pu zu berücksichtigen sein.

#### **Offene Fragen und Resümee**

◆ Auch zwanzig Jahre nach dem Unfall ist eine Reihe von wissenschaftlichen, technischen und praktischen Fragen unbeantwortet, die hier nur angedeutet werden können. Neben den Problemen hoher Strah-



Abb. 6. In der am höchsten kontaminierten Zone I um den Reaktor war es im „Roten Wald“ zu massiven Verbrennungen der Bäume durch Beta-Strahlung gekommen. Der geschädigte Wald wurde zum großen Teil abgeholzt und der hoch kontaminierte Oberboden entfernt. Die Abbildungen zeigen den Blick über den Roten Wald auf das havarierte Kraftwerk in den Jahren 1997 (links) und 2002 (oben) mit dem frischen Aufwuchs von Bäumen und Büschen. Hier bietet sich die Möglichkeit zum Studium des Langzeitverhaltens langlebiger Radionuklide in der Umwelt und der Auswirkungen hoher chronischer Expositionen auf Pflanzen- und Tierpopulationen.

lenexpositionen durch <sup>131</sup>I unmittelbar nach dem Unfall, der lebenslangen Expositionen der kritischen Bevölkerungsgruppen und der Zukunft der evakuierten Gebiete handelt es sich um Fragen der Langzeitsicherheit der nächsten Umgebung des Kraftwerks, der Entsorgung radioaktiver Abfälle und den Bau eines Schutzes für den Sarkophag, unter dem auch der Rückbau der Anlage vorgenommen werden kann (Abbildung 5). Die Zone I bietet die außergewöhnliche Möglichkeit zum Studium des Langzeitverhaltens langlebiger Radionuklide (<sup>137</sup>Cs, <sup>90</sup>Sr, der Pu und <sup>241</sup>Am) in der Umwelt, der

Auswirkungen relativ hoher chronischer Expositionen auf Pflanzen- und Tierpopulationen und der Radioökologie noch nicht umfassend untersuchter Ökosysteme (Abbildung 6). Zur Lösung dieser Probleme kann nuklearchemische Expertise und Forschung beitragen.

Auch 2005 gilt die Beurteilung, die UNSCEAR bereits im Jahr 2000 in Erkenntnis des erhöhten Strahlenrisikos für Kinder mit hohen <sup>131</sup>I-Expositionen und von Rettungsmannschaften und Liquidatoren in absolutem Gegensatz zur öffentlichen Wahrnehmung vornahm:<sup>7)</sup> „Die große Mehrheit der Bevölkerung

braucht nicht in der Furcht vor ernstesten Gesundheitsschäden leben. ... Das Leben wurde durch den Unfall von Tschernobyl gestört, aber aus radiologischer Sicht und auf der Grundlage dieses Berichtes sollten sich generell positive Zukunftsaussichten für die Gesundheit der meisten Individuen durchsetzen.“

Rolf Michel  
Zentrum für Strahlenschutz  
und Radioökologie  
Universität Hannover  
michel@zsr.uni-hannover.de

- 1) International Atomic Energy Agency (IAEA), The International Chernobyl Project, Volume 1–3, IAEA, Vienna, 1991.
- 2) IAEA, One decade after Chernobyl: Summing up the consequences of the Accident, Proceedings of an International Conference of the EC, IAEA, WHO, Vienna, 8–12 April 1996, IAEA, Vienna, 1996.
- 3) IAEA, Present and future environmental impact of the Chernobyl accident, IAEA-TECDOC-1240, IAEA, Vienna, 2001, Download: www.iaea.org.
- 4) Nuclear Energy Agency of the Organisation for Economic Co-Operation and Development (NEA), Chernobyl, Ten years on – Radiological and health impact, An assessment by the OECD, NEA, Paris, 1995.
- 5) Strahlenschutzkommission des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (SSK), Zehn Jahre nach Tschernobyl – eine Bilanz (Hrsg.: A. Bayer, A. Kaul, C. Reiners), Gustav-Fischer-Verlag, Stuttgart, 1996.
- 6) World Health Organisation (WHO), Health consequences of the Chernobyl accident, Results of the IPHECA pilot projects and related national programmes (Hrsg.: G. N. Souchkevitch, A. F. Tsyb), Scientific Report, WHO/EHG 95–19, 1996.
- 7) United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), Sources and Effects of Ionizing Radiation, 2000 Report to the General Assembly, United Nations, New York, 2000, Download: www.unscear.org
- 8) Chernobyl Forum, Chernobyl's Legacy: Health, Environmental and Socio-economic Impacts and Recommendations to

Tab. 3.

Mittlere Strahlenexposition im Jahr 2001 von erwachsenen Bewohnern von Gebieten mit <sup>137</sup>Cs-Fallout von mehr als 37 kBq·m<sup>-2</sup>.<sup>9)</sup>

	<sup>137</sup> Cs Fallout [kBq · m <sup>-2</sup> ]	Zone	effektive Jahresdosen [mSv]		
Bodentyp			Schwarzerde	Podsol	Torf
Landbevölkerung	37 – 555	IV und III	0,05 – 0,8	0,1 – 1	0,02 – 2
	555 – 3700	II und I	–		
Stadtbevölkerung	37 – 555	IV und III	0,03 – 0,4	0,05 – 0,6	0,1 – 1

- the Governments of Belarus, the Russian Federation and Ukraine, IAEA, Vienna, 2005, Download: [www.iaea.org](http://www.iaea.org).
- 9) *Chernobyl Forum*, Environmental Consequences of the Chernobyl Accident and Their Remediation: Twenty Years of Experience, IAEA, Vienna, 2005, Download: [www.iaea.org](http://www.iaea.org).
- 10) P. Jacob, J. Kenigsberg, I. Likhtarev, M. Tronko, S. Shinkarev, R. Meckbach, Y. Demidchik, L. Kovgan, T. Bogdanova, A. Ulanovski, Y. Gavrilin, E. Buglova, S. Vavilov, C. Schotola, J. Kruk, M. Chepurnij, G. Pröhl, *Thyroid Exposure in Belorussian and Ukrainian Children after the Tschernobyl Accident and Resulting Risk of Thyroid Cancer. Schriftenreihe Reaktorsicherheit und Strahlenschutz, BMU-2005–668, 2005, Download: [www.bfs.de](http://www.bfs.de).*
- 11) R. Michel, J. Handl, T. Ernst, W. Botsch, S. Szidat, A. Schmidt, D. Jakob, D. Beltz, L.D. Romantschuk, H.-A. Synal, C. Schnabel, J. M. López-Gutiérrez, *Sci. Total Environ.* 2005, 340, 35–55.
- 12) J. Handl, D. Beltz, W. Botsch, S. Harb, D. Jakob, R. Michel, L.D. Romantschuk, *Health Phys.* 2003, 84, 502–517.
- 13) R. Michel, *Klausurtagung des Radioökologieausschusses der SSK 2003*, 25./26. Nov. 2003, Eltville; Realistische Ermittlung der Strahlenexposition, *Veröffentlichungen der Strahlenschutzkommission, Band 55, BMU, Urban & Fischer, München, 2005, 205–245.*

### ◆ Strahlenschutz

Die Aktivität bezeichnet die Zerfallsrate von Radionukliden; sie wird in Becquerel (Bq), d. h. der Zahl der Zerfälle pro Sekunde, gemessen. Ein Maß für den Fallout ist die flächenbezogene Aktivität der am Boden abgelagerten Radionuklide in  $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}$ .

Die Wechselwirkung ionisierender Strahlung (Alpha-, Beta-, Gamma- und andere Strahlenarten) mit lebender Materie kann Zellen schädigen, wobei diese sterben oder verändert werden können. Die Strahlenexposition wird als Energiedosis, d. h. absorbierte Energie pro Masse, ausgedrückt. Die Einheit der Energiedosis ist das Gray (Gy); sie ist gleich einem Joule pro Kilogramm. Eine Strahlenexposition des menschlichen Körpers von einigen Gray löst akute Strahlenkrankheit aus.

Zusätzlich zur Energiedosis wird im Hinblick auf die Verursachung bösartiger Erkrankungen und genetischer Defekte die effektive Dosis benutzt, um das gesundheitliche Risiko zu quantifizieren. Die effektive Dosis berücksichtigt die Energiedosis, die Strahlenart und die Strahlenempfindlichkeit verschiedener Organe und Gewebe und dies sowohl für externe wie auch interne Bestrahlung. Sie erlaubt auch die Berücksichtigung von Teilkörperbestrahlungen. Die Einheit der effektiven Dosis ist das

Sievert (Sv). Ein Sievert ist eine sehr hohe Dosis. Daher wird für die effektive Dosis meist das Millisievert (mSv) zur Angabe normaler Expositionsbereiche verwendet.

Die Internationale Strahlenschutzkommission schätzt, dass das Lebenszeitrisiko für Krebs und genetische Defekte linear mit der Dosis ansteigt, mit einer Steigung von  $7 \times 10^{-2}$  pro Sv.

Alle Lebewesen sind permanent ionisierender Strahlung aus natürlichen Quellen ausgesetzt. Diese umfassen die kosmische Strahlung, kosmogene und terrestrische Radionuklide wie  $^{40}\text{K}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  und ihre Zerfallsprodukte einschließlich  $^{222}\text{Rn}$  (Radon). UNSCEAR hat geschätzt, dass die natürliche Strahlenexposition im weltweiten Mittel 2,4 mSv im Jahr beträgt mit einem typischen Bereich zwischen 1 und 10 mSv pro Jahr. Die Lebenszeitdosen liegen generell zwischen 100 und 700 mSv. Einige Bewohner in Gegenden erhöhter natürlicher Radioaktivität, z. B. in Indien, Brasilien und China, erhalten Strahledosen von mehr als 25 mSv pro Jahr durch Radionuklide in Böden, auf denen sie ohne erkennbare Gesundheitsschäden leben. Zusätzliche Strahlenexpositionen können als niedrig bezeichnet werden, wenn sie im Bereich von einigen mSv pro Jahr liegen.