Zeitschrift: Schweizer Ingenieur und Architekt
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 108 (1990)
Heft: 36

Artikel: Tschernobyl 4 Jahre danach: eine erste Bilanz der Auswirkungen
Autor: Burkart, Werner
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-77499

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 26.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Sicherheit und Risiko

Tschernobyl 4 Jahre danach

Eine erste Bilanz der radiologischen Auswirkungen

Durch die Freisetzung grosser Teile des Spaltstoffinventars des 4. Reaktorblocks ist praktisch der bis dahin nur hypothetisch und mit kleinster Eintretenswahrscheinlichkeit diskutierte schlimmstmögliche Reaktorunfall in der UdSSR real eingetroffen. Eine nüchterne Einschätzung der Lage zeigt, dass die direkten radiologischen Auswirkungen bis heute relativ klein, die sozio-ökonomischen Auswirkungen auf die direkt betroffenen Sowjetrepubliken jedoch enorm sind. Durch unnötige Geheimhaltung, mangelnde Messinformationen und ein schlecht ausgebildetes, überfordertes Kader im Gesundheitssystem scheinen die lokalen Behörden viele Probleme zusätzlich verschärft zu haben.
Obwohl für die Risikodiskussion im Westen ein Desaster im Ausmass von Tschernobyl ausgeschlossen wird, sind viele ökologische und biologische Erkenntnisse aus Tschernobyl auch für den Strahlen- und Notfallschutz im Westen von grösstem Interesse.

des guten Willens muss jedoch gesagt werden, dass es um die interdisziplinäre Zusammenarbeit zwischen Gesundheitsdiensten sowie biomedizinischen

VON WERNER BURKART, VILLIGEN

verbundenen Vorteile als auch der Gefahren. Tschernobyl mag für den Reaktorspezialisten so exotisch und irrelevant sein wie ein mexikanischer Erddamm für den Erbauer von Betonstaumauern in den Alpen. Auch wenn daher eine quantitative Übertragung der radiologischen Vorgänge in der Ukraine auf Westeuropa kaum Sinn macht, sind die Lehren und Erkenntnisse aus dieser Reaktorkatastrophe vor allem für die Strahlenbiologie, die Radioökologie und die medizinische Notfallschutzplanung so gross, dass im Sinne der zu Beginn angesprochenen Verantwortung eine vertiefte Auseinandersetzung mit Tschernobyl auch im Westen not tut. Wie alle anderen Energieerzeugungssysteme ist auch die Kernenergie nicht risikofrei. Dieses Risiko muss mit vernünftigem Kostenaufwand auf ein annehmbares Mass reduziert, sollte aber nicht verdrängt werden. Noch eine Warnung zu Beginn: Die fast grenzenlose Offenheit der mit den Aufräum- und Dekontaminationsarbeiten betrauten sowjetischen Fachleute hat bei westlichen Experten oft eine falsche Euphorie über die Möglichkeiten der quantitativen Erfassung der Auswirkungen von Tschernobyl erzeugt. Trotz Der verantwortungsvolle Umgang mit modernen Technologien erfordert die klare Beschreibung sowohl der damit und physikalischen Wissenschaften in der Sowjetunion noch schlechter als bei uns bestellt ist. Offenheit nach 70 Jahren Geheimniskrämerei führt leider nicht immer zu Klarheit und Transparenz, sondern zu einem Durcheinander von schwierig zu bewertenden Einzelinformationen und Gerüchten.

Der Ablauf der Radioaktivitätsabgabe

Um 1.23 Uhr Lokalzeit kam es im vierten Kernkraftwerkblock von Tschernobyl, Ukraine, UdSSR, in der Folge eines schlecht geplanten Versuches, der die Sicherstellung der Stromversorgung bei Schnellabschaltungen verbessern sollte (!), nach mehreren groben Verstössen gegen die Betriebsvorschriften zu einer kurzfristigen Leistungsexkursion auf das Hundertfache der Maximalleistung. Dies führte zum Bruch von Brennstoff enthaltenden Druckrohren und zu chemischen Folgereaktionen (Metalloxidation unter Bildung von Wasserstoff, Dampfexplosionen und Graphitbrand). Durch 2 Explosionen wurde die 1000 t schwere obere Platte unter Abscherung aller Druckrohre aufgestellt und etwa 4% des Kerninventars ausgeworfen. Durch die Zufuhr von Sauerstoff und die heissen Brenn-

Grösse	*Anwendung bei*	*Basiseinheit*	*Einheiten* *alt*	*neu*	*Umrechnungen*
Aktivität	Radioakt. Quelle	Zerfälle pro sec $[s^{-1}]$	Curie (Ci)	Becquerel (Bq)	$1\ Bq = 1\ s^{-1}$ $1\ Ci = 3{,}7 \cdot 10^{10} Bq$
Ionendosis	Messinstrument	Ladung pro kg $[As \cdot kg^{-1}]$	Röntgen (R)	keine	$1\ As \cdot kg^{-1} = 3{,}876 \cdot 10^{3} R$ $A \cdot kg^{-1} = 1{,}39 \cdot 10^{7} R \cdot h^{-1}$
Energiedosis (D)	Bestrahlung Material, Gewerbe	Energie pro kg $[J \cdot kg^{-1}]$	rad	Gray (Gy)	$1\ Gy = 1\ J \cdot kg^{-1} = 100$ rad
Äquivalentdosis (H, biologische Dosis)	Bestrahlung Mensch	Energie pro kg × «Qualitätsfaktor» eine Art «Schädigungsfaktor», abhängig vom Strahlentyp: β, γ: 1 α: 20 $[J \cdot kg^{-1}]$	rem	Sievert (Sv)	$1\ Sv = 1\ J \cdot kg^{-1} = 100$ rem
Effektive Äquivalent- (H_{eff})	Bestrahlung Mensch	transformiert eine Organbestrahlung in eine Ganzkörperdosis gleichen Risikos	rem	Sv	Bsp.: 1 Sv Lungendosis $= 0{,}12\ Sv\ H_{eff}$

Einheiten für Radioaktivität, Dosis und Äquivalentdosis; Faustregel: γ-Quellenaktivität: 1 Ci; Mensch in 1 m Entfernung: 1 rem/h; Äquivalentdosis aus natürlichem Untergrund: 0,1–5 rem/Jahr (Schweiz)

Diese erweiterte Tabelle geht auf eine frühere Publikation zurück («Schweizer Ingenieur und Architekt», Heft 32/87) Red.

stofffragmente kam es zu einem mehrtägigen Graphitbrand, der durch Abwurf von 2400 t Blei (Abschirmung, Abkühlung durch Schmelzwärme), 1800 t Sand/Lehm (Filter für Spaltstoffe), 800 t Dolomit (CO_2-Produktion zum Ersticken des Feuers, Abkühlung durch Schmelzwärme) und 40 t Borkarbid (Neutroneneinfang zur Verhinderung der Rekritikalität) bekämpft wurde. Erst 9 Tage nach Unfallbeginn konnten die Abgaben durch Ersticken des Graphitbrandes und Abkühlen der Kerntrümmer mit Stickstoffeinspeisung von unten unter Kontrolle gebracht werden.

Durch den Bruch aller Druckrohre und das Fehlen eines Containments wurde praktisch die gesamte edelgasförmige Spaltproduktaktivität, 20–60% des Jods, 10–15% des Cäsiums und mehrere Prozente der schwererflüchtigen Elemente freigesetzt. Von den Abgaben her war somit der im Westen praktisch ausgeschlossene «Super-GAU», der schlimmstmögliche Grossunfall, eingetroffen. Es wurden gesamthaft über 4×10^{18} Bq (100 MCi) Radioaktivität abgegeben.

Bodenkontamination in der Sowjetunion

Der Auswurf von Brennstoffmaterial führte in der nächsten Umgebung zu sehr hohen Aktivitätsbelegungen und Dosen. Die einzigen westlichen Hinweise in den ersten Wochen waren Satellitenaufnahmen, die zeigten, dass Waldpartien in nächster Nähe des Reaktors akut zugrunde gingen. Im Norden und Westen der Anlage wurden auf einer Fläche von etwa 10 000 km² mehr als 550 kBq/m² (15 Ci/km²) des Leitnuklids ^{137}Cäsium deponiert [1]. Eine Bodenbelegung von 550 kBq/m² ^{137}Cäsium verursachte am 10. Mai 1986 eine Dosisleistung von 50 µSv/h (5 mR/h), was etwa dem Tausendfachen des natürlichen Untergrundes entspricht (Bilder 1 und 2).

Durch die Begleitumstände Graphitbrand und Dampfentwicklung entstand über dem Reaktor ein thermischer Auftrieb (Kamineffekt), der eine effektive Abgabe der Radioaktivität auf einer Höhe von bis zu 1500 m bewirkte und somit – in Abwesenheit von Regen – eine sehr weiträumige Ausbreitung der Radioaktivität zur Folge hatte. Südöstliche Winde führten die Luftmasse mit den ersten Abgaben nach Skandinavien. Dortige Routine-Überwachungsmessungen in der Umgebung von Kernanlagen führten schliesslich zur Alarmierung der Weltöffentlichkeit, die jedoch von sowjetischer Seite erst

Äquivalentdosis	Produkt aus Energiedosis und Qualitätsfaktor. Mass für die Schädlichkeit der Strahlung für den Menschen. Einheiten SI: 1 Sievert (Sv) = 1 J/kg alt: 1 Rem (rem) = 0,01 Sv 1 mSv = 100 mrem m: milli = 10^{-3}
Effektive Äquivalentdosis (H_{eff})	Umrechnung lokaler Organdosen auf die entsprechende Ganzkörperdosis, d.h. auf eine fiktive Ganzkörperbestrahlung, die eine gleich grosse Schädigung (z.B. Krebsrisiko) beinhaltet. Einheiten: Sv und rem
Externe Bestrahlung	Bestrahlung von aussen durch kosmische Strahlung, Radionuklide im Boden oder Baumaterialien (vor allem γ-Strahlung)
Interne Bestrahlung	Bestrahlung durch in den Körper aufgenommene Radionuklide (a, β, und γ).
Halbwertszeiten	*Physikalische:* Zeit, in der die Radioaktivität durch Zerfall um die Hälfte abnimmt. *Biologische:* Zeit, in der die Konzentration eines Schadstoffes im Körper durch Ausscheidung um die Hälfte abnimmt. *Ökologische:* Zeit, in der die Schadstoffkonzentration in einem Kompartiment der Ökosphäre (z.B. Gras) durch Auswaschen, Vergrösserung der Biomasse usw. um die Hälfte abnimmt.
Aktivität	Anzahl Zerfälle pro Sekunde Einheiten: SI: 1 Becquerel (Bq) = 1/s alt: 1 Curie (Ci) = $3{,}7 \cdot 10^{10}$/s 1 Bq = 27 pCi p: pico = 10^{-12} 37 Bq = 1 nCi n: nano = 10^{-9}
Ionendosis	In der Luft durch Ionisation erzeugte elektrische Ladungen: Einheiten: SI: Coulomb/kg (C/kg) alt: Röntgen (R) = $2{,}58 \cdot 10^{-4}$ C/kg
Absorbierte Dosis/ Energiedosis	In der Materie (z.B. in einem Organ) absorbierte Strahlungsenergie pro Masseinheit. Einheiten: SI: 1 Gray (Gy) = 1 Joule/kg alt: 1 Rad (rad) = 0,01 Gy
Qualitätsfaktor (QF)	Mass für die biologische Schädlichkeit verschiedener Strahlenarten (α, β, γ) pro deponierte Energiedosiseinheit. Der QF ist 1 für β und γ, kann jedoch für schwere Teilchen (z.B. α) bis auf 20 ansteigen.

Tabelle 1. Definitionen und Erläuterungen zu den gebräuchlichsten Messgrössen und Einheiten des Strahlenschutzes

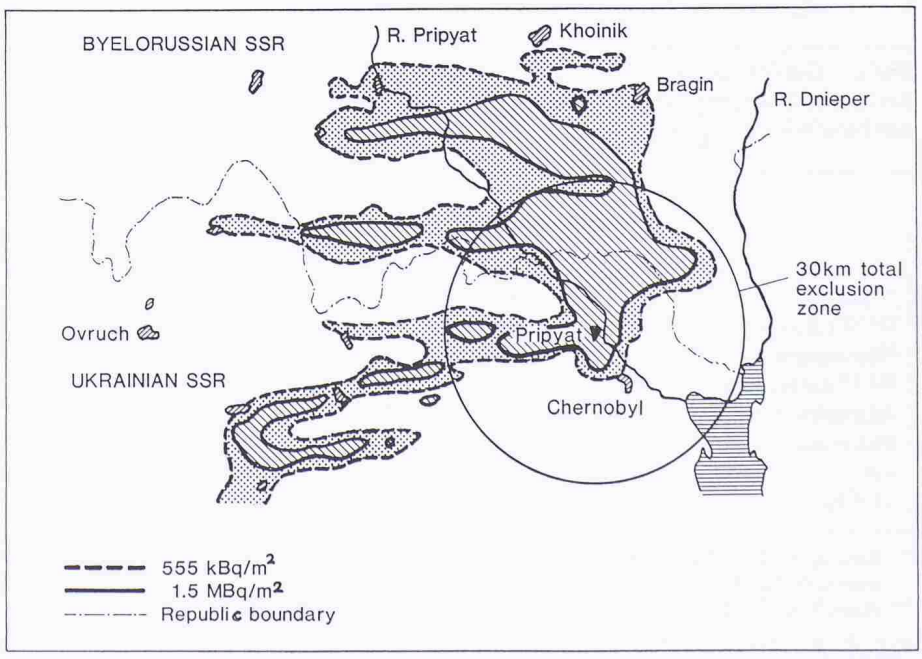

Bild 1. Verstrahlungskarte um Tschernobyl (der Radius der Ausschlusszone beträgt 30 km)

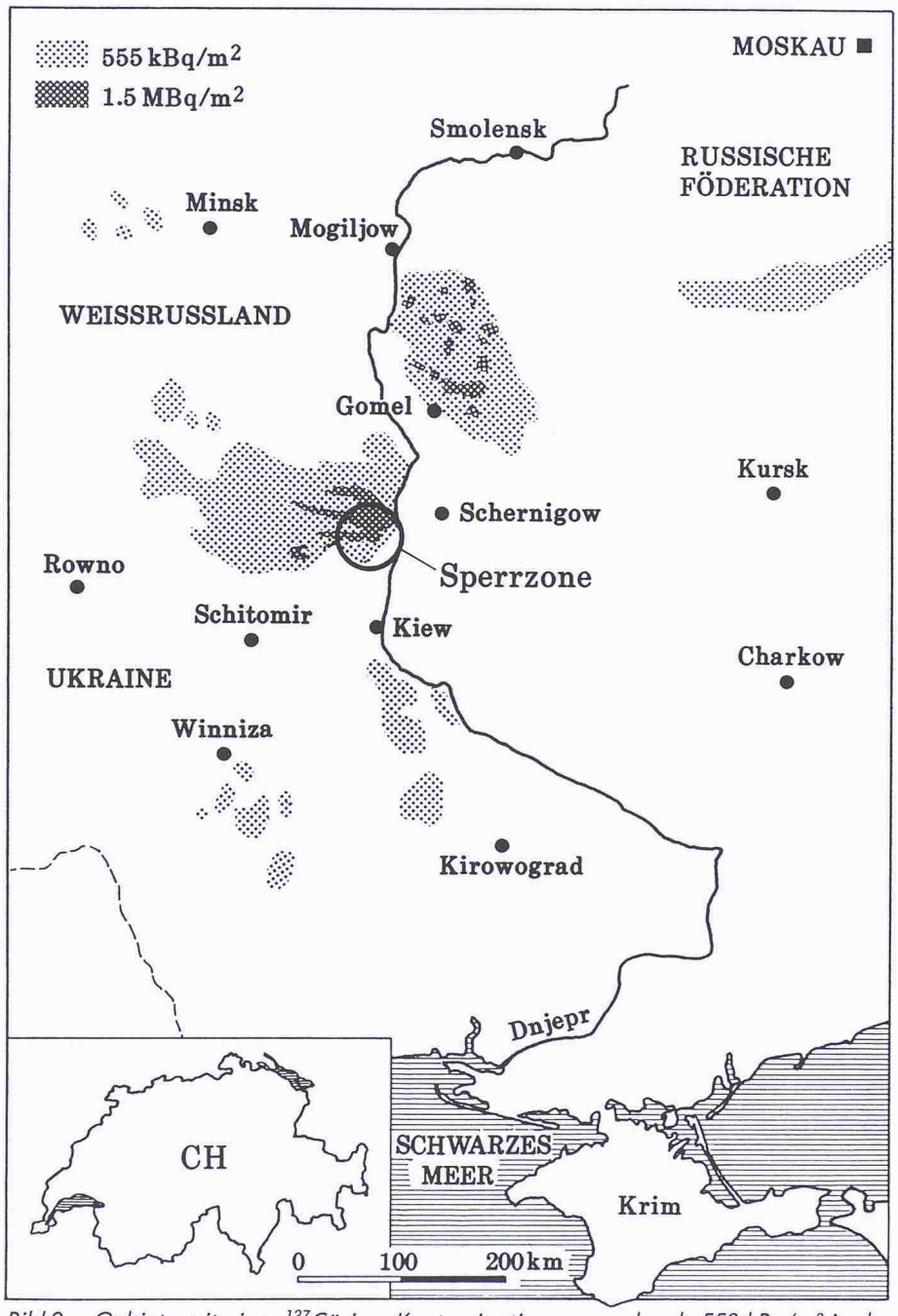

Bild 2. Gebiete mit einer ^{137}Cäsium-Kontamination von mehr als 550 kBq/m² in der Kernzone, in den Regionen von Gomel (Weissrussland) und Bryansk (Russische Föderation) sowie in der Ukraine

	Tschernobyl (*Nahfeld >15 Ci ^{137}Cs pro km²*)	*CH Mittelland*	*Bombentests kumulierter Eintrag**	*heutige Überreste*
^{131}Jod	≥2000	25	8000	0
$^{134/137}$Cäsium	>550	7	38	4
^{90}Strontium	>5	0,05	8	2
$^{103/106}$Ruthenium	>500	5	1580	0
Aktiniden (Uran, Plutonium usw.)				
- α	ca. 4**	0,000 015	0,09	0,08
- (^{241}Pu)	ca. 300**	0,001	0,73	0,18

* Eintrag in die Atmosphäre: kurzlebige Nuklide wie ^{131}Jod und ^{103}Ruthenium zerfallen zum grössten Teil vor der Deposition

** Annahme: 2% des Kerninventars in partikulärer Form deponiert auf 10 000 km²

Tabelle 2. Als Folge des Tschernobyl-Unfalls im Boden deponierte Aktivität für ausgewählte Nuklide. Zum Vergleich ist auch die Deposition durch die atmosphärischen Kernwaffentests angegeben. Werte in kBq · m⁻² [3, 4, 5]

anlässlich einer Konferenz der Internationalen Atomenergieagentur der UNO von Ende August 1986 in Wien erschöpfend orientiert wurde [2]. Die generelle Ostwindlage der folgenden Tage brachte die Radioaktivität auch nach Zentraleuropa und in die Schweiz.

Die Kontamination in Westeuropa

Die Situation in der Schweiz als Beispiel für das Fernfeld zeigte infolge der regional stark unterschiedlichen Niederschläge sehr grosse Unterschiede in der vor allem durch Ausregnen verursachten Kontamination des Bodens (nasse Deposition). Die Nordostschweiz, das Südtessin und die nach Süden gerichteten Täler Graubündens waren durch Gewitterregen und Staulagen bis zu einer Grössenordnung stärker betroffen als das westliche Mittelland. Tabelle 2 zeigt Schätzungen über die anfängliche Ausfallaktivität wichtiger Radionuklide pro m² für das Nahfeld und das schweizerische Mittelland. Gegenüber den nach den atmosphärischen Bombentests untersuchten Kontaminationen ergeben sich im zeitlichen Verlauf, in der Aktivitätsverteilung auf die verschiedenen Nuklidgruppen sowie bei den Strahlenarten bedeutende Unterschiede. Entgegen dem chronischen Eintrag früherer Jahre aus sehr hochliegenden Luftschichten der Stratosphäre kam es zu einer kurzzeitigen, akuten Deposition, die durch kurzlebige Spaltstoffe dominiert wurde. Da im Gegensatz zum gänzlich verdampfenden Bombenmaterial die Flüchtigkeit der Brennstoffmaterialien eine grosse Rolle spielte, waren die schwerflüchtigen Aktiniden Plutonium, Americium und Uran mit ihrer biologisch sehr wirksamen α-Strahlung im Tschernobyl-Ausfall ausserhalb der Nahzone praktisch nicht vorhanden. Die α-Kontamination erfolgte durch mechanisch gebildete Partikel, deren Grössenverteilung vor allem zu einer lokalen Belastung der näheren Umgebung führte.

Schutzmassnahmen der UdSSR während der Akutphase

Dank der weiträumigen Verteilung der abgegebenen Radioaktivität wurden in bewohnten Gebieten auch im Freien *keine akut tödlichen Dosisraten* erreicht. Bei anfänglichen Dosisraten im Bereich von 10 μSv/h (1 rem/h) wurden jedoch sofortige Evakuationen notwendig. Innerhalb von 36 Stunden wurden über 100 000 Personen aus einem Gebiet von etwa 3500 km² evakuiert. Damit verblieben noch etwa 230 000 Personen in einem Gebiet von 10 000 km² mit mehr als 550 kBq ^{137}Cäsium pro

m². Die anfängliche Bevölkerungsdichte in dieser Zone ist mit 35 Personen pro km² für westeuropäische Verhältnisse gering. Etwa 4 Millionen Personen leben heute in Gebieten mit mehr als 37 kBq^{137}Cäsium pro m² [6]. Angesichts der grossen Abgaben von Radiojod wurde nach sowjetischen Angaben stabiles Jod zur Blockierung der Jodaufnahme in die Schilddrüse an die Bevölkerung abgegeben. Zeitpunkt der Abgabe (anscheinend oft zu spät) und Schilddrüsendosen sind aus UdSSR-Angaben schwierig zu rekonstruieren.

Belastungspfad	*Zeitdauer*	*kritische Nuklide*	*Dosisbeitrag in % (Schätzung)*
Externe Bestrahlung			
Wolke	Stunden–Tage	Kurzlebige Radionuklide, Edelgase	<1
Boden	–Jahrhunderte	Cäsium, Ruthenium	60
Interne Bestrahlung			
Inhalation	Stunden–Tage	Jod, Tellur	4
Ingestion	Monate (–Jahrhunderte)	Jod, Cäsium, Strontium	36

Tabelle 3. Einige Charakteristika wichtiger Belastungspfade im Fernfeld nach Tschernobyl

Dosisabschätzungen / Dosiserwartungen

Dosispfade

Radionuklide können den Menschen über mehrere Pfade belasten. Zu Beginn steht die Bestrahlung aus der Schadstoffwolke und die Aufnahme in den Körper durch die Atemluft (Inhalation) im Vordergrund. Nach der Kontamination durch trockene oder nasse Deposition dominieren die Bestrahlung vom Boden und die Aufnahme durch kontaminierte Nahrung (Ingestionspfad). Tabelle 3 zeigt den Zeitverlauf und die kritischen Nuklide für die verschiedenen Pfade. Für die akute Phase spielen die kurzlebigen Jodisotope infolge ihrer Flüchtigkeit, des grossen Inventars und der Anreicherung in der Schilddrüse eine Schlüsselrolle. Externe Expositionen lassen sich durch Dosismessgeräte leicht bestimmen. Inhalationsdosen sind durch Luftaktivitätsbestimmungen und Kenntnisse über die Aufenthaltsdauer quantifizierbar. Schwieriger abschätzbar sind die radiologisch bedeutenden Dosen über die Nahrung, die nur unter Verwendung ökologischer Modelle zu quantifizieren sind. Die jeweiligen Modellparameter sind sowohl für die einzelnen Radionuklide stark unterschiedlich als auch jahreszeitlich grossen Schwankungen unterworfen. So ist der bei uns nach Tschernobyl dominierende Expositionspfad über die Frischmilch bei Unfallereignissen in den Wintermonaten nicht vorhanden, da dann die Fütterung mit eingelagerten und somit unverstrahlten Vorräten erfolgt.

Dosisschätzungen

In der Akutphase war in der Nahzone neben den hohen externen Strahlenfeldern auch die Inhalation von Radiojod ein wichtiger Belastungspfad. Angaben des UdSSR-Gesundheitsministeriums rechnen mit mehr als 2 Sv (200 rem) Schilddrüsendosis bei 20% der Kinder in der Gomel-Region (Weissrussland) und mit mehr als 10 Sv (1000 rem) bei 5% dieser Kinder (Bild 3) [7]. Die akuten Ganzkörper-Dosen durch externe Strahlenfelder lagen für die *direkt betroffene Bevölkerung* im Bereich von *wenigen mSv bis etwa 250 mSv (25 rem)*. Die Expositionen wurden auch nachträglich mit Hilfe der biologischen Dosimetrie durch die Bestimmung von Chromosomenaberrationen in peripheren Lymphozyten erfasst. Sowohl für die Bevölkerung als auch für Aufräum- und Bauequipen am Reaktorblock ergaben sich Maximaldosen im Bereich von 200 bis 300 mSv (20 bis 30 rem). Die chronischen Dosen der Jahre ab 1987 sind vor allem durch externe Bestrahlung und in zweiter Linie durch den Verzehr lokal produzierter Nahrungsmittel bedingt. In vielen Gebieten ausserhalb der Evakuationszone sind die Dosisleistungen trotz Dekontaminationsmassnahmen zu hoch, um die von der UdSSR angestrebte Limite für die Lebensdosis von 350 mSv (35 rem) einzuhalten. Zusätzliche Evakuationen wurden deshalb noch im Jahre 1989 durchgeführt bzw. stehen noch bevor. Bei der Anwendung von Limiten von 370 Bq/l Milch und 1000 Bq/kg Fleisch können im Polesskoje-Distrikt nördlich von Kiew immer noch etwa 25% der Produktion nicht verwendet werden [6]. Bild 3 zeigt Strahlenexpositionen im ersten Jahr nach Tschernobyl für die Schweiz und das Nahfeld. Während in der Schweiz durchschnittlich nur eine Erhöhung um etwa 5% auftrat, sind im Nahfeld die Schutzziele der UdSSR teilweise massiv überschritten worden.

Ein Teil der Radioaktivität im Nahfeld liegt in der Form von heissen Teilchen (α-, β-hot particles) vor. Die Dosen und Risiken aus in den Körper aufgenommenen heissen Teilchen lassen sich mit den gängigen Strahlenschutzkonzepten schlecht modellieren [8]. Die daraus resultierenden Unsicherheiten fallen im Falle von Tschernobyl jedoch kaum ins

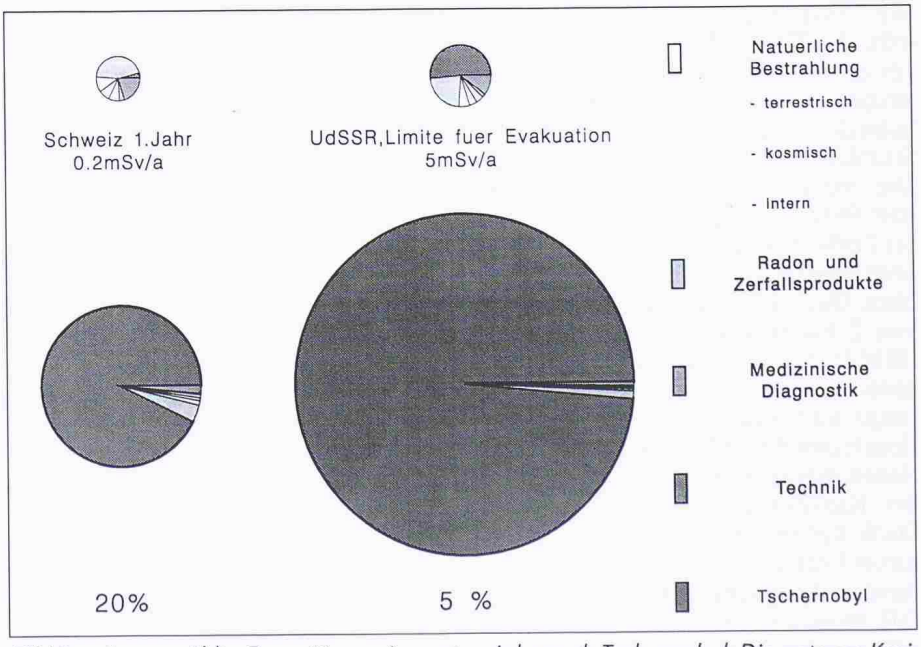

Bild 3. Ausgewählte Expositionen im ersten Jahr nach Tschernobyl. Die unteren Kreise zeigen die Jodexpositionen für die 20 bzw. 5% am stärksten belasteten Kinder in der Region Gomel. Für Vergleichszwecke sind die Schilddrüsendosen des Jods in effektive Äquivalentdosen umgerechnet.

	Bombenstrahlung			Medizinische Bestrahlung											Berufliche Bestrahlung			
	Überlebende Hiroshima/Nagasaki	Bewohner Marshall Inseln	Beteiligte an Bombentests	Morbus Bechterew (Röntgenbestrahlung)	Morbus Bechterew (Radium)	Benigne Beckenerkrankungen	Benigne Brusterkrankungen	Mehrfache Brust-Fluoroskopie	Tinea Capitis (Kinder)	Vergrösserter Thymus (Kinder)	Thorotrast	Schilddrüsenkrebs (^{131}I)	In Utero Röntgenbestrahlung	Diagnostische Röntgenbestrahlung	Radium Zifferblattmaler	Radiologen	Bergwerkarbeiter	Nuklearpersonal
Leukämie	●[a]		○	●		◒				◒	●	○	●	○		●		○
Schilddrüse	●	◒							◒	●								
Weibliche Brust	●				○		●	●										
Lunge	●			●							◒						●	○
Knochen				○	●										●			
Magen	◒			◒														
Speiseröhre	◒			◒														
Blase	◒																	
Lymphoma (inkl. multiple Myeloma)	◒			◒							○					◒		○
Hirn									◒			○				◒		
Uterus						○												
Cervix	○																	
Leber	○										○[b]							
Haut									◒	◒						●	◒	
Speicheldrüse	○								◒	◒								
Niere				○	○						○							
Pankreas																		○
Kolon	○					◒									○			
Dünndarm						○												
Rektum						◒												

[a] ● starke Assoziation.
◒ noch eindeutige, jedoch schlechter quantifizierte Assoziation.
○ wahrscheinliche aber statistisch nicht gesicherte Assoziation.
[b] Obwohl die Korrelation sehr stark ist, wird neuerdings die Chemotoxizität des Thoriums für die beobachteten Leberkrebsfälle verantwortlich gemacht.

Bild 4. In menschlichen Bevölkerungsgruppen epidemiologisch nachgewiesene Krebsarten (modifiziert nach Upton; [9])

Gewicht, da nur ein kleiner Bruchteil der Aktivität in der Form unlöslicher Partikel vorliegt. Eine gefilterte Druckentlastung würde diese Problematik für das Umfeld praktisch vollständig zum Verschwinden bringen.

Dosen in der Schweiz

Mit einer geschätzten Dosis von 0,2 mSv H_{eff} für den Durchschnittsschweizer im Jahr nach der Tschernobyl-Katastrophe liegen die Expositionen in der Schweiz im Schwankungsbereich der Strahlendosen aus natürlichen Quellen. Die integrierten Dosen über die nächsten 50 Jahre liegen im Bereich von 0,5 bis 2 mSv. Dies sollte mit jährlichen Expositionen aus natürlichen und künstlichen Quellen in der Grössenordnung von 2 bis 10 mSv verglichen werden (Bild 3). Ausser beim Fischfang im Luganersee (sehr langsame Wassererneuerung) und beim Verzehr von Wildfleisch und Pilzen konnten alle Restriktionen innerhalb des ersten Jahres nach der Katastrophe aufgehoben werden. Dank der grossen Distanz vom Ereignisort kann für die Schweiz klar gesagt werden, dass Tschernobyl und sein Ausfall zwar eine unerfreuliche Überraschung, aber kein radiologisches Risiko von Bedeutung darstellte. Diese Einschätzung ergibt sich auch aus dem Maximalwert und dem Verlauf der Radioaktivität in der Milch, die im schweizerischen Mittelland schon nach zwei Monaten im Untergrund der natürlichen Radioaktivität unterging.

Von der Dosis zum Risiko

Gesundheitliche Auswirkungen im Nahfeld

Nach Aussagen von Wissenschaftern und des Gesundheitministeriums von Weissrussland ergaben sich bis 1989 in den Statistiken über Kindersterblichkeit, Missbildungsraten bei Neugeborenen, Todesfallrate der gesamten Bevölkerung und der Inzidenz von Invalidität bis heute keine negativen Verschiebungen. Die Kindersterblichkeit in der schwer kontaminierten Gegend von Gomel hat z.B. von 16,3 pro Tausend 1985 auf 12,3 pro Tausend 1988 abgenommen. Anderseits wird von den gleichen offiziellen Stellen über eine Verdoppelung bis Vervierfachung des Auftretens von Bluthochdruck, Diabetes, Herzleiden, nervöser Zustände, Magengeschwüre und Lungenbeschwerden berichtet. Es ist praktisch auszuschliessen, dass diese Effekte direkt von den Strahlenexpositionen herrühren; anderseits werden sie von der Bevölkerung und von einem grossen Teil des lokalen sowjetischen Medizinpersonals der Strahlung zugeschrieben [6, 7]. Erste Berichte von Hämatologen über ein Ansteigen der Leukämiefälle bei Kindern in Weissrussland sind kompatibel mit dem strahlenbiologischen Wissensstand. Eine Quantifizierung dieses Risikos wird jedoch mehrere Jahre in Anspruch nehmen.

Die teilweise hohen Schilddrüsendosen bei Kindern bis 10 Sv und mehr führten zur Etablierung eines Registers beim «All Union Institute of Radiation Medicine». Nach unserem strahlenbiologischen Wissensstand könnten die Jod-Expositionen nach einer Latenzzeit von etwa 10 Jahren zu einer zwar kleinen, aber epidemiologisch fassbaren Erhöhung der Schilddrüsenkrebs-Inzidenz führen. Schon heute werden jedoch pathologische Veränderungen der Schilddrüse von der Bevölkerung und ihren Ärzten befürchtet und auch beschrieben. Obwohl durch die jahrzehntelange klinische Anwendung von Radiojod bekannt ist, dass Dosen von *mehr als 100 Sv (10 000 rem)* notwendig sind, um eine *anhaltende Unterfunktion der Schilddrüse* zu bewirken, könnte ein Teil der beschriebenen Effekte real sein, weil Weissrussland als Jodmangelgebiet gilt (viele Kropffälle) und die im Gefolge des Unfalls verbesserte medizinische Versorgung schon vor dem Un-

fall vorhandene Schilddrüsenprobleme aufzeigt.

Sich teilweise widersprechende Statistiken und Aussagen existieren für Weissrussland über Frühgeburten und Abtreibungen. Es scheint, dass nicht nur die Furcht der Bevölkerung, sondern auch medizinische Beratung zu zusätzlichen Schwangerschaftsabbrüchen im Jahre 1987 führte. Bei Dosen ab 100 mSv (10 rem) und bei oft zum Zeitpunkt des Entscheides unbekannten Dosen ist dies auch unter fachlichen Gesichtspunkten nachvollziehbar. Anämie (Eisenmangel) ist ein weiterer Befund für einen Grossteil der Bevölkerung. Hier stehen wieder indirekte Effekte des Unfalls im Vordergrund wie Restriktionen beim Verzehr von Frischprodukten und eine bessere medizinische Diagnose. Die grossen Mengen Blei, die auf den geschmolzenen Reaktorkern abgeworfen wurden und teilweise verdampften, führten bei Kindern auch zu stark erhöhten Bleikonzentrationen im Blut; dieser Faktor wurde bis heute noch nicht berücksichtigt.

Die potentiell wichtigste Auswirkung der Strahlenexpositionen im Bereich bis 500 mSv (50 rem), *Krebsinduktion*, kann auch im Nahfeld nur durch äusserst genaue epidemiologische Verfolgung der betroffenen Bevölkerung über die nächsten 80 (!) Jahre vollständig erfasst werden. Die Grösse der evakuierten Bevölkerung ist in etwa mit den Überlebenden von Hiroshima/Nagasaki zu vergleichen, bei denen in den 35 Jahren von 1950 bis 1985 einige hundert von etwa 7000 Krebstoten auf die Bombenstrahlung zurückgeführt werden konnten. Die Dosen nach Tschernobyl sind jedoch im Durchschnitt deutlich kleiner, und die Qualität der sowjetischen Mortalitäts- und Morbiditätsregister scheint nach den bisherigen Erfahrungen kaum japanisches Niveau zu erreichen. Anders ausgedrückt, die Katastrophe von Tschernobyl wird in den ersten 5 Jahren auch für das Nahfeld aller Voraussicht nach noch keine eindeutigen Informationen, bis zum Jahre 2000 eventuell einen statistisch signifikanten Anstieg der Leukämien und bis 2020 Informationen über das Risiko bei soliden Tumoren liefern. Anstelle von Spekulationen beruht daher der nächste Abschnitt auf dem Wissen, das in den letzten Jahrzehnten in der Strahlenepidemiologie mühsam zusammengetragen wurde.

Spätschäden, die Wirkung kleiner Strahlendosen

Die Wirkungen von Strahlendosen im Bereich von null bis mehreren Dutzend mSv sind zu klein, um sie direkt durch eine Erhöhung strahlungsbedingter Krankheiten in der Bevölkerung feststellen zu können. Dies lässt für das einzelne Individuum den positiven Schluss zu, dass das Risiko kleiner Strahlendosen im Vergleich zu anderen Risiken des Lebens relativ unbedeutend ist. So ist es bis heute nicht gelungen, die Auswirkungen der regional stark verschiedenen natürlichen und zivilisatorischen Bestrahlung, die im Extremfall immerhin mehrere Dutzend mSv pro Jahr (mehrere 1 rem/a) erreicht, zu erfassen. Anderseits wissen wir durch epidemiologische Studien an Menschen, die in der Medizin (Therapie), im Beruf oder durch militärische Aktivitäten mit Dosen im Bereich von 0,1 bis Dutzenden von Sv (10 bis mehrere 1000 rem) bestrahlt wurden, recht gut Bescheid über die Strahlenrisiken in höheren Dosisbereichen (Bild 4).

Daraus lassen sich grobe Risikofaktoren für die Induktion von Krebs herleiten. Es wird dabei für den höchsten Wert konservativerweise angenommen, dass kein Schwellenwert für die Schädigung besteht und dass die Dosis/Wirkung-Beziehung linear verläuft [9]. Bild 5 zeigt diese Annahme (a1) neben anderen, auch diskutierten Möglichkeiten, die für niedrige Dosen bedeutend geringere biologische Effekte prognostizieren würden. Im rechten Teil der Abbildung ist die Dosis/Wirkung-Kurve für den akuten Strahlentod nach Ganzkörperbestrahlung dargestellt. Die Kurve verläuft sehr steil und hat einen Schwellenwert im Bereich von etwa 500 mSv (50 rem).

Die Weiterverfolgung des Gesundheitszustandes der Überlebenden von Hiroshima und Nagasaki und ihrer Nachkommen über jetzt immerhin 35 Jahre (1950–1985) hat 2 schlechte und eine gute Nachricht ergeben:

1) Das längerfristige Krebsrisiko für solide Tumoren scheint grösser, als früher auf Grund des schnellen Abklingens des Leukämierisikos angenommen.
2) Der Embryo/Fötus im Mutterleib ist im 3. und 4. Schwangerschaftsmonat äusserst empfindlich auf Schädigungen des Grosshirns.
3) Anderseits ist im Gegensatz zu früheren Befürchtungen bis jetzt keine signifikante Erhöhung der Erbschäden in den Nachkommen der Bombenopfer festzustellen.

Daraus lässt sich eine obere Grenze des Risikos abschätzen. Der heutige Risikofaktor des UNSCEAR [10] für Spätschäden, der diesen neuen Erkenntnissen Rechnung trägt, liegt bei $1\text{–}12 \times 10^{-2}$ per Sv. Das heisst, dass nach der Bestrahlung von 100 Personen mit 1 Sv (100 rem) mit 1 bis 11 tödlich verlaufenden Krebsfällen und etwa einem Erbschaden gerechnet werden muss. Bei einer Gesamtdosis über die nächsten Jahrzehnte durch Tschernobyl von etwa 0,33 mSv (33 mrem) für den Durchschnitts-Schweizer kann man mit dem UNSCEAR-Risikokoeffizienten überschlagsmässig 3 bis 40 Krebstote pro Million Schweizer abschätzen. Dabei ist zu bedenken, dass etwa 250 000 einer Million Schweizer auch ohne zivilisatorische Strahlung an Krebs sterben werden und dass 10% der Neugeborenen «spontane» Erbschäden verschiedenster Art aufweisen.

Es ist daher einleuchtend, dass die Effekte kleiner Strahlendosen nie direkt epidemiologisch bestimmt werden können. Dies führt dazu, dass sich dieses Gebiet als Tummelfeld für stark übertriebene, aber oft nicht direkt widerlegbare Meldungen über die Gefährdung der ionisierenden Strahlung bestens eignet. Im Gegensatz zum Anschein, den die Medien erwecken, sind sich jedoch die wissenschaftlichen Körperschaften der Strahlenbiologie und der Medizin weitgehend einig, dass die Annahme einer linearen Dosis/Wirkung-Beziehung für das Krebsrisiko nach Bestrahlung eher eine Überschätzung und sicherlich nicht eine Unterschätzung des Risikos kleiner Strahlendosen darstellt. Abschliessend lässt sich sagen, dass auch bei der Anwendung der linearen Hypothese und der neuen Koeffizienten das Einzelrisiko durch Tschernobyl ausserhalb des Nahfelds unbedeutend ist. Die Multiplikation mit der gesamten Bevölkerung Europas führt jedoch zu Tausenden von prognostizierten Toten. Bei solchen Rechenkonstruktionen ist jedoch zu bedenken, dass ähnlich konservative Rechnungen mit den viel bedeutenderen natürlichen, medizinischen und zivilisatorischen Strahlenexpositionen entsprechend Zehntausende von Krebstoten pro Jahr ergeben würden.

Zivilisatorische Strahlenexpositionen im Vergleich

Radioaktivität ist seit Anbeginn ein Bestandteil unserer Umwelt. Nur die verfeinerten Messmethoden, die in den letzten Jahrzehnten entwickelt wurden, ermöglichen jedoch die Erfassung der sehr kleinen Mengen, die in Nahrungsmitteln und Gegenständen des täglichen Gebrauchs natürlich oder durch menschliche Aktivitäten vorhanden sind. Die natürliche ^{40}Kalium-Radioaktivität der Kuhmilch beträgt immerhin 44 Bq/l. Je nach Wahl der Einheiten, 44 Bq/l, 1200 pCi/l bzw. 1,2 nCi/l, lassen sich damit stark unterschiedliche Emotionen wecken. Im schweizerischen Mittelland hat bereits zwei Monate nach dem Unfall bereits wieder die na-

Methode	*Geeignet für*	*Aufwand*	*Reduktionsfaktor*
Abtragen der obersten Erdschicht	Gärten, Parks	gross	5–100
Tiefpflügen	Landwirtschaftsland	mittel	3–10
Hochdruckreinigung von Fassaden, Asphalt	Häuser, Strassen	mittel	2–10
Asphaltieren, Zudecken	Strassen, Plätze	gross	–10 (Abschirmung)

Tabelle 4. Dekontaminationsmethoden: Aufwand und Ertrag

türliche Radioaktivität der Milch dominiert. Damit soll nicht gesagt werden, dass was sich im Schwankungsbereich der natürlichen Radioaktivität bewegt, von vornherein unbedenklich oder akzeptabel ist. Die Relationen stimmen jedoch nicht mehr, wenn in der Öffentlichkeit eine grosse Verängstigung entsteht bei Dosen, die um Grössenordnungen kleiner sind als jene Expositionen, die Jahr für Jahr durch die Haustechnik (Innenluftschadstoff Radon) [8] und durch diagnostische Verfahren der Medizin anfallen.

Obwohl Vergleiche der Risiken verschiedener zivilisatorischer Aktivitäten notgedrungen immer hinken, möchte ich zum Schluss doch folgende zwei Beispiele zur Einstufung der Umweltradioaktivität im Vergleich zu anderen Risiken des täglichen Lebens anführen: Da auf 2 Millionen (2×10^6) konsumierte Zigaretten ein durch Rauchen bedingter Todesfall zu erwarten ist, entspricht bei linearer Risikobetrachtung jede Zigarette einer Strahlenexposition von etwa 10 µSv (1 mrem). Ein Tag Individualverkehr in der Schweiz (durchschnittlich 3 Tote) entspräche dem hypothetischen Todesfallrisiko durch strahleninduzierten Krebs nach einer kollektiven Strahlendosis von 60 Sv (6000 rem). Die Gefährdung des Durchschnittschweizers durch den Verkehr beträgt somit in der Währung der Strahlenhygiene etwa 9 µSv (1 mrem) pro Tag oder 3,3 mSv (340 mrem) pro Jahr. Bereits ab einer jährlichen Dosis von 5 mSv wird in der UdSSR evakuiert.

Dekontaminationsversuche zur Reduktion der Dosis – finanzielle Folgen

Die nach dem ersten Jahr für die Radiotoxizität wichtigsten Radionuklide ($^{134/137}$Cs, Aktiniden) verbleiben weitgehend in den obersten Bodenschichten. Auch das ^{137}Cs des Bombenfallouts ist bis heute in ungestörtem Boden nur wenig gewandert. Die Infiltration des Grundwassers ist somit ausser für grobsandige Böden kein Problem. Verschleppung durch Wind, z.B. durch Blattfall bei Bäumen, wurde beobachtet, betraf jedoch immer nur eine kleine Fraktion der vorhandenen Aktivität. Diese vertikale und horizontale Immobilität eröffnet die Möglichkeit, radioaktive Strukturen und Gelände zu dekontaminieren. Tabelle 4 gibt eine Übersicht über angewandte Methoden, geschätzte Reduktionsfaktoren und Aufwand. Lokale Dekontaminationbemühungen, z.B. bei den verbleibenden KKW-Blöcken in Tschernobyl, waren sehr erfolgreich. Aufwand und Ertrag bei den Tausenden von km² schwächer kontaminierten landwirtschaftlichen Bodens klaffen jedoch auseinander.

Zusätzliche kostengünstige Methoden zur Reduktion der Strahlenexpositionen aus landwirtschaftlichen Aktivitäten sind:

- Fixierung der Aktivitäten zur Verhinderung der Inhalation und Ingestion
- Verdünnung der Radionuklide mit ähnlichen Elementen zur Verhinderung der Aufnahme in Pflanzen (z.B. Kaliumdüngung gegen Cäsiumaufnahme)
- Anpflanzung von Pflanzen mit niedriger Cäsiumaufnahme in das Produkt (Hanf, Ölsaaten, Zuckerrüben).

Generell scheint man in der UdSSR, für die der Wert des Bodens deutlich geringer ist als im Westen, für den grössten Teil der evakuierten Gebiete ein Abklingen der Radioaktivität abzuwarten.

Die Kosten für die bisherigen und geplanten Arbeiten gehen laut sowjetischen Angaben in die Dutzende von Milliarden Rubel. Alleine Weissrussland hat gegenüber Moskau eine (politisch motivierte?) Zahl von 200 Milliarden Rubel genannt. Bei einem mittleren Monatssalär von 300 Rubel scheinen diese Zahlen extrem hoch. Auch ohne Landkosten in Betracht zu ziehen, sind jedoch bei verlorenen Infrastrukturinvestionen von nur Fr. 100 000 pro Person (Wohnen, Verkehr, Arbeitsplätze usw.) allein für 150 000 evakuierte Personen Verluste von Fr. 15 000 000 000 einzusetzen.

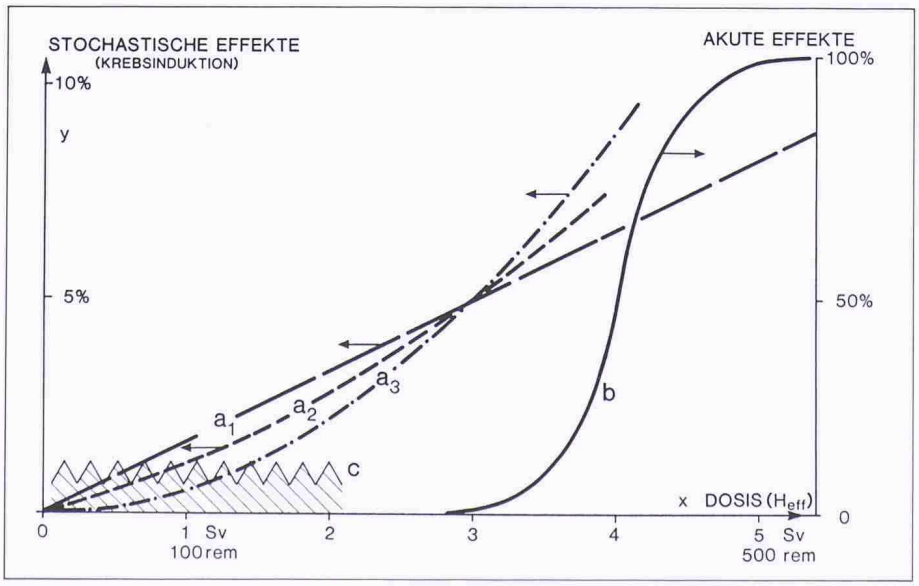

Bild 5. Dosis/Wirkungs-Verlauf für strahleninduzierte Gesundheitsschäden: a) flacher Verlauf für Krebsrisiko und genetische Schäden, b) steiler Verlauf mit Schwellenwert für akute Strahlenschäden und c) spontane, nicht strahlenbedingte Krebsfälle/genetische Schäden

Der Zerfall des sozio-ökonomischen Netzes – psychische Belastungen

Eine Hauptlehre aus Tschernobyl ist die Bedeutung sozio-ökonomischer und psychischer Faktoren für die betroffenen Gebiete im Nahfeld. Obwohl hier auch die gleichzeitig erfolgenden politischen Veränderungen in der UdSSR eine Rolle spielen und die Übertragung auf westliche Gesellschaften auch aus anderen Gründen schwierig ist, zeigt sich, dass neben dem Strahlenschutz

viele begleitende Aktivitäten zur Behebung von Verstrahlungslagen notwendig sind. Es scheint, dass auf diesem Gebiet die sowjetische Verwaltung teilweise krass versagt hat.

Die Kontamination von Land und Landesprodukten hat für Hunderttausende von in der Landwirtschaft tätigen Personen an der Grenze zu den evakuierten Gebieten zu extremen Veränderungen der Lebensbedingungen geführt. Arbeitslosigkeit und Mangel an kontrollierten Nahrungsmitteln scheinen weit verbreitet. In Regionen mit mehr als 40 Ci/km² (1,5 MBq/m²) und mehr als 15 Ci/km² (550 kBq/m²) erhalten Bewohner eine monatliche Auszahlung von 30 bzw. 15 Rubel, um höhere Beschaffungskosten für Nahrungsmittel auszugleichen (10 bzw. 5% eines typischen Salärs). Der Zustupf wird von den Betroffenen «Sarggeld» genannt. Die Situation wird oft auch kompliziert durch die Abhängigkeiten zwischen Dörfern, Feldern und Zentrumsfunktionen. Wenig kontaminierte Dörfer sind teilweise für Schule und Einkauf von Zentren abhängig, die evakuiert wurden oder vor der Evakuation stehen. Die Komplexität der sozialen Beziehungen führt damit schliesslich zu mehr Relokationen, als es die radiologische Lage alleine erfordern würde [6]. Es stellt sich hier die grundsätzliche Frage, welches Ausmass von Restriktionen für einen akzeptablen Lebensstil längerfristig tragbar ist.

Die Information der betroffenen Bevölkerung in den ersten Tagen und Monaten war ungenügend und teilweise inexistent. So erklärte beispielsweise der Gesundheitsminister von Weissrussland Anfang Mai 1986, dass alles unter Kontrolle sei. Die ersten Evakuationen spielten sich weitgehend unter Ausschluss der Öffentlichkeit ab. Die grossen Dekontaminations- und Relokationsoperationen ab Juni 1986 involvierten etwa 600 000 Arbeiter und Soldaten und führten zum entsprechenden Aufsehen in den betroffenen Regionen Weissrusslands, der Ukraine und Russlands. Medizinische Überwachung, Restriktionen für Kinder und Kontrollen von Nahrungsmitteln betrafen Hunderttausende der Bevölkerung. Erst im März 1988, zwei Jahre nach dem Unfall, wurde durch den Druck der Betroffenen und der Medien von den Behörden eine offene und vollständige Informationspolitik eingeführt. Die späte Offenheit scheint die Unsicherheit der Bevölkerung und den Vertrauensverlust der Verwaltung zurzeit eher zu vergrössern [6]. Durch den Exodus der Kader (Lehrer, Ärzte) und der Jungen ergeben sich weitere Einschränkungen der Lebensqualität.

Folgerungen

4 Jahre nach Tschernobyl sind die Folgen der Reaktorkatastrophe für die nähere Umgebung noch nicht vollständig absehbar. Neben den vergleichsweise noch recht gut abzuschätzenden gesundheitlichen Risiken der Strahlung ergaben sich eine Reihe sozio-ökonomischer und psychischer Probleme, die schwer quantifizierbar und noch schwieriger auf andere Gesellschaftssysteme übertragbar sind. Die *Hauptfolgerung für Westeuropa* ist eindeutig: Die *Wahrscheinlichkeit für eine solche Katastrophe muss annähernd null sein.* Daher müssen – ausgehend vom Sicherheitsstandard des RBMK-Reaktors im Jahre 1986 – für ein umweltverträgliches Kernkraftwerk sowohl bei der Anlage als auch bei den Betriebsvorschriften und bei der Personalausbildung jeweils um Grössenordnungen bessere Lösungen glaubhaft nachgewiesen werden können. Durch den vermehrten Einsatz *passiver, auf inhärenten Eigenschaften* basierender Regelsysteme und den Rückgriff auf beständigere Brennstoffe müssen mittelfristig auch qualitative Verbesserungen in neue Reaktoren inkorporiert werden, die den maximal möglichen Quellterm um mehrere Grössenordnungen verringern.

Auf dem Gebiet des Strahlenschutzes und der Notfallschutzplanung *kann und soll Tschernobyl nicht zum Massstab* werden. Zwar sind – auch bei einer zehntausendmal kleineren Abgabe, aber bei ungünstiger Witterung und bei Ausregnen auf eine entsprechend viel kleinere, lokal begrenzte Fläche – Kontaminationen vergleichbarer Stärke denkbar. Für solche Möglichkeiten muss unabhängig von den Erwartungswerten in jedem Land die fachliche Kompetenz und Kapazität zur Erfassung und Eingrenzung der Schäden vorhanden sein. Dies geschieht am besten durch kleine Gruppen qualifizierter Fachleute, die im Ereignisfall die Notfalldienste leiten und angepasste Lösungen entwickeln können. Für solche Spezialisten sollten auch von der Schweiz die seit der politischen Öffnung der UdSSR bestehenden Möglichkeiten zur aktiven Mitarbeit bei der Behebung der Schäden in Tschernobyl und beim Studium der radioökologischen und strahlenbiologischen Auswirkungen im Nahfeld ergriffen werden.

Literatur

[1] *Izrael Yurii / Rich Vera,* Soviet Data Made Public. Nature 338, 367 (1989)

[2] INSAG Summary Report: Post-Accident Review Meeting on the Chernobyl Accident, IAEA, Wien (1986)

[3] UNSCEAR (1982) United Nations Scientific Committee On The Effect Of Atomic Radiation: Ionizing Radiation: Sources and Biological Effects. United Nations, New York

[4] *Görlich W., Portmann W., Wernli C., Linder H.P. and Burkart W.,* Tschernobyl-Fallout: EIR-Data Base and First Correlations for 1986/87. PSI-Bericht No. 1, CH-5232 Villigen-PSI (1988)

[5] SSK, Auswirkungen des Reaktorunfalls in Tschernobyl auf die Bundesrepublik Deutschland. Veröffentlichungen der Strahlenschutzkommission Deutschlands, Gustav-Fischer-Verlag, Stuttgart (1987)

[6] League of Red Cross and Red Crescent Societies: Report on Assessment Mission to the Areas Affected by the Chernobyl Disaster, UdSSR (1990)

[7] Soci, First International Workshop on severe accidents and their consequences. Soci, Black Sea Coast (1989)

[8] *Burkart W.,* The Radiation Biology of the Lung, The Science of the Total Environment 89, 1-230 (1989)

[9] BEIR, Committee on the Biological Effects of Ionizing Radiation, U.S. National Research Council. Health Effects of Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation. National Academy Press, Washington (1990)

[10] UNSCEAR (1988) United Nations Scientific Committee On The Effect Of Atomic Radiation: Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation. United Nations, New York

Adresse des Verfassers: PD Dr. *W. Burkart,* Strahlenbiologe, Paul-Scherrer-Institut (PSI), 5232 Villigen.