

ILK

INTERNATIONALE
LÄNDERKOMMISSION
KERNTECHNIK

Baden-Württemberg · Bayern · Hessen



ILK-Stellungnahme

zu den Auswirkungen des Unfalls von Tschernobyl –
Eine Bestandsaufnahme nach 20 Jahren

English version also available!

Januar 2006
Nr.: ILK-26 D

Vorwort

Die Internationale Länderkommission Kerntechnik - ILK - der Länder Baden-Württemberg, Bayern und Hessen wurde im Oktober 1999 gegründet und besteht derzeit aus 11 Wissenschaftlern und Experten aus Deutschland, Finnland, Frankreich, Schweden, der Schweiz und den USA. Durch die unabhängige und objektive Beratung der drei Länder in Fragen der Sicherheit kerntechnischer Anlagen, der Entsorgung radioaktiver Abfälle sowie der Risikobewertung der Kernenergienutzung soll die ILK insbesondere einen wichtigen Beitrag liefern, den hohen international anerkannten Sicherheitsstandard der süddeutschen Kernkraftwerke zu erhalten und weiter zu entwickeln.

Auch 20 Jahre nach dem Unfall im Kernkraftwerk Tschernobyl in der Ukraine sind die Diskussionen über die Folgen noch nicht abgeschlossen. Die ILK möchte daher in der vorliegenden Stellungnahme die neuesten Erkenntnisse über die verschiedenen Auswirkungen dieses Unfalls in Form eines objektiven Überblicks vorstellen. Diese Stellungnahme wurde vom externen Experten Dr. H. Métivier (vormals IRSN, Paris) mit Unterstützung durch Prof. W.-U. Müller (Universität Duisburg-Essen) vorbereitet und auf der 39. ILK-Sitzung am 30. Januar 2006 in Stuttgart verabschiedet.

Der Vorsitzende



Dr.-Ing. Erwin Lindauer

Zusammenfassung	4
1 Unfallhergang	9
1.1 Der Reaktor	9
1.2 Der Unfall	10
1.3 Der Graphitbrand	11
2 Freisetzung, Ausbreitung und Ablagerung radioaktiver Materialien	13
2.1 Freisetzung	13
2.2 Ausbreitung und Ablagerung innerhalb der ehemaligen Sowjetunion	15
2.3 Ausbreitung und Ablagerung außerhalb der ehemaligen Sowjetunion	17
3 Expositionspfade	18
4 Schutzmaßnahmen	20
4.1 Innerhalb der ehemaligen Sowjetunion	21
4.2 Außerhalb der ehemaligen Sowjetunion	22
5 Auswirkungen auf Umwelt und Landwirtschaft	25
5.1 Auswirkungen auf die Landwirtschaft	25
5.2 Auswirkungen auf Waldgebiete	28
5.3 Strahlungsbedingte Auswirkungen auf die Umwelt	29
6 Schätzung der Strahlenbelastung	30
6.1 Feuerwehrleute und Liquidatoren	31
6.2 Evakuierte	32
6.3 In den kontaminierten Gebieten lebende Bevölkerung der ehemaligen Sowjetunion	33
6.4 Bevölkerung in Westeuropa und Übersee	33
7 Gesundheitliche Auswirkungen	35
7.1 Schilddrüsenerkrankungen	35
7.2 Leukämie	36
7.3 Solide Karzinome	36
7.4 Voraussage der Krebsmortalität	37
7.5 Nichtkrebserkrankungen	38
7.6 Kindergesundheit	40
7.7 Gesundheitliche Strahlenschäden in Deutschland	42
8 Psychische und gesellschaftliche Auswirkungen	43
8.1 Feuerwehrleute und Liquidatoren	43
8.2 Bewohner der kontaminierten Gebiete	44
8.3 Auswirkungen der Reaktionen der Behörden in der ehemaligen Sowjetunion	45
8.4 Verbesserungen	46
9 Potentiell verbleibende Risiken	48
9.1 Sarkophag	48
9.2 Grundwasser	49
10 Lehren aus dem Unfall	51
11 Literatur	55
Mitglieder der ILK	61
ILK-Veröffentlichungen	62

Zusammenfassung

Der **Reaktorunfall von Tschernobyl** war das Ergebnis einer nicht inhärent sicheren Reaktorauslegung und mangelnder „Sicherheitskultur“. Der Reaktor war nicht ausreichend sicher konstruiert. Sicherheitstechnische Auslegungsprinzipien wie beispielsweise eine „Fehler verzeihende“ Technik wurden beim Design des RBMK nicht angewandt. Zudem war das Betriebspersonal nicht über Schwächen der Auslegung informiert und war sich sehr wahrscheinlich auch nicht bewusst, dass die bei dem Versuch gewählte Fahrweise zu Explosionsbedingungen im Reaktor führen würde. Die mangelhafte Sicherheitskultur äußert sich vor allem in der Tatsache, dass sich die Betriebsmannschaft nicht an bewährte betriebliche und sicherheitsorientierte Verfahrensweisen hielt. Die Kombination all dieser Faktoren löste den schwersten nuklearen Unfall aus, durch den der Reaktor innerhalb weniger Sekunden völlig zerstört wurde. Die Folgen können als das Produkt der Überlagerung von zwei schwerwiegenden Unfällen gesehen werden: die Explosion des Reaktors und die Kernschmelze zusammen mit dem intensiven und lang anhaltenden Brand des Graphitmoderators.

Die direkte Folge des Reaktorunfalls von Tschernobyl war eine enorme Freisetzung radioaktiver Materialien in die Umwelt, die vor allem auf einem Gebiet von ungefähr 4.000 km² zu einer sehr starken Kontamination des Bodens führte. Dieses Gebiet ist immer noch eine Sperrzone. Mittlerweile liegen recht genaue Schätzungen der Gesamtmenge des **freigesetzten radioaktiven Materials** vor. Der Freisetzungsprozess dauerte über eine Woche. Unmittelbar nach der Explosion wurden vor allem gasförmige, flüchtige (I, Cs) und feste Stoffe – insbesondere Brennstoff – mit vergleichsweise großen Partikelgrößen freigesetzt. Die großen Partikel wurden in Entfernungen < 100 km, hauptsächlich im Umkreis von 30 km abgelagert. Die zweite Phase bestand aus der Freisetzung aus dem geschmolzenen Kern bei gleichzeitigem Brand des Graphitmoderators und erreichte ihren Höhepunkt nach ca. 8 Tagen. Dabei wurden Aerosole und Feststoffe geringer Partikelgröße freigesetzt, die infolge des Brandes in große Höhen aufstiegen und über große Entfernungen transportiert wurden. Infolge der Freisetzungseigenschaften wurden weiter entfernte Gebiete (> ca. 100 km) hauptsächlich durch I, Cs, Te belastet, während in der Nahzone auch Brennstoff (U, Pu), sowie hitzebeständige Elemente (Zr, Mo, Ce, Np) und Zwischenprodukte (Ru, Ba, Sr) niedergingen. Während dieses Prozesses änderten sich Zusammensetzung und Eigenschaften des radioaktiven Materials aufgrund von Zerfall, chemischen Umwandlungen, Veränderungen der Partikelgröße und nassen oder trockenen Ablagerungen. Das **Ablagerungsmuster** war sehr uneinheitlich. Zu signifikanten Radionuklidablagerungen kam es dort, wo der Durchzug der radioaktiven Fahne zeitlich mit Regenfällen zusammentraf. Obgleich die gesamte nördliche Hemisphäre betroffen war,

trat nur im Bereich der früheren Sowjetunion und in kleinen Teilen des sonstigen Europa eine **signifikante Kontamination** auf.

Während der ersten beiden Wochen waren Inhalation, direkte Bestrahlung und der Verzehr von Milch und frischem Gemüse die **Hauptbelastungspfade**. Nach einigen Monaten dominierten dann der Genuss von Milch sowie der Verzehr von Fleisch und (Süßwasser-)Fischen. Auch zwanzig Jahre später gibt es in stark belasteten Gebieten, insbesondere in den kontaminierten Zonen der ehemaligen Sowjetunion, immer noch hohe Werte bei Milch, Pilzen und Waldbeeren sowie bei Wild- und Schaffleisch.

Der Unfall von Tschernobyl überraschte die Behörden hinsichtlich seines Ausmaßes und seiner Dauer sowie der Kontamination über große Entfernungen. Da für einen solchen Unfall keine Richtlinien vorlagen, es nur wenige Entscheidungshilfen gab und großer Druck von Politik und Öffentlichkeit ausgeübt wurde, etwas zu unternehmen, wurden sowohl innerhalb als auch außerhalb der Sowjetunion häufig übervorsichtige Entscheidungen getroffen. Die psychologischen Auswirkungen einiger offizieller Entscheidungen auf die Öffentlichkeit waren nicht vorhersehbar. Unterschiedliche Auslegungen oder gar Fehlinterpretationen von ICRP-Empfehlungen, insbesondere hinsichtlich der **Interventionswerte** bei Lebensmitteln, führten zu widersprüchlichen Maßnahmen und Ratschlägen. Dies verstärkte die Verwirrung der Öffentlichkeit und führte zu Misstrauen und unnötigen wirtschaftlichen Verlusten. Sehr bald begannen jedoch internationale Bemühungen, die Kriterien und Verfahren der **Notfallbeherrschung** zu **harmonisieren**.

Die Menge der aufgrund des Unfalls in der **Umwelt** abgelagerten Radionuklide ist mittlerweile gut bekannt. Die Höhe der Bodenkontamination und die entsprechende Bedeutung der Strahlendosen nahm mit zunehmender Entfernung ab, obwohl beispielsweise in den skandinavischen Ländern, in Österreich und in Bayern einige „Hot Spots“ (mit im Vergleich zur näheren Umgebung der Anlage deutlich niedrigerer Kontamination) gemessen wurden, die auf Auswaschung durch starke Regenfälle zurückzuführen sind. Eine Gesamtfläche von 11.000 km² wurde mit Cs-134/137-Werten von mehr als 555 kBq/m²¹ kontaminiert. In der Ukraine ist hauptsächlich der Wald betroffen. Die im **landwirtschaftlichen Bereich** ergriffenen Gegenmaßnahmen waren wirkungsvoll. Am wirksamsten waren die Verarbeitung landwirtschaftlicher Nahrungsmittel sowie die Aufarbeitung des Bodens und die Änderung seiner Bewirtschaftung. Heute weist die überwältigende Mehrheit der landwirtschaftlichen Produkte Kontaminationswerte auf, bei denen die durchschnittliche Individualdosis 1 mSv pro Jahr nicht überschreitet. Auswirkungen auf die Umwelt wurden bei Tieren und Pflanzen in der Sperrzone beobachtet.

¹ Zum Vergleich: Die auf den Atombombenfall zurückzuführende Kontamination betrug in den mittleren nördlichen Breiten zwischen 1,5 und 5 kBq/m².

In den betroffenen Gebieten finden sich zwanzig Jahre nach dem Unfall immer noch Radionuklide in den obersten Bodenschichten, die weiterhin in Pflanzen, insbesondere Pilze, Beeren und forstwirtschaftliche Produkte, übergehen. Die Belastung der Böden nimmt nur langsam ab z.B. durch **Transfer in Pflanzen**. Die Verringerung der Belastung in den nächsten Jahren wird fast ausschließlich auf die physikalische Halbwertszeit von Cs-137 (30 a) zurückzuführen sein. Die Erholung der betroffenen Flora und Fauna in der Sperrzone wurde durch die Abwesenheit menschlicher Aktivitäten positiv beeinflusst.

Die **Strahlendosis** der Feuerwehrleute und Liquidatoren, die der ersten Phase ausgesetzt waren, reichte von wenigen hundert mSv bis zu mehr als 10 Sv für einige Feuerwehrleute. Es bleibt unsicher, welche Dosis die an den späteren Aufräumarbeiten beteiligten 200.000 bis 600.000 Liquidatoren erhalten haben, aber die Dosis lag überwiegend zwischen 100 und 500 mSv; ein großer Teil dieser Personengruppe erhielt eine viel niedrigere Dosis. Hinsichtlich ihrer Schilddrüsenedosis gibt es nur ungenaue Angaben. Die evakuierten Personen waren schätzungsweise einer durchschnittlichen Dosis von etwa 20 mSv ausgesetzt. Dies ist vergleichbar mit der Dosis, die man bei einer Computertomographie des Rumpfes erhält. Für Bewohner der strikten Kontrollzonen (270.000 Personen, die weiterhin in Gebieten mit einer Cs-137-Ablagerung von über 555 kBq/m² leben) liegt die durchschnittliche Dosis bei 50 mSv. Zwei Drittel der Populationen in den kontaminierten Gebieten (6.400.000 Personen, die in Gebieten mit einer Cs-137-Kontamination über 37 kBq/m² leben) empfangen eine Jahresdosis von weniger als 1 mSv, beim restlichen Drittel lag die Dosis zwischen 1 und 10 mSv. Dies ist mit der natürlichen Hintergrundstrahlung vergleichbar, die weltweit bei einigen mSv pro Jahr liegt.

Für die Bevölkerungen im Westen betrug die berechnete Gesamtdosis 1 mSv in Nordeuropa und 0,15 mSv in Westeuropa. Für zu den Selbstversorgern zählende Familien, die in einem „Hot Spot“ außerhalb der Sowjetunion leben und sich von ihren eigenen Produkten ernähren, konnten die Strahlendosen 20- bis 50fach über dem Durchschnitt liegen. Vorsorgemaßnahmen, wie der Verzicht auf frische Milch für ungefähr zwei Monate, wurden für diese Gruppen empfohlen.

Viele Studien wurden durchgeführt, um Zusammenhänge zwischen Strahlendosis und diversen **gesundheitlichen Auswirkungen** zu suchen. Die möglicherweise schwerwiegenden gesundheitlichen Probleme, die mit diesem Unfall in Zusammenhang gebracht werden können, betreffen sowohl die Bevölkerung, die in oder in der Nähe der Sperrzone lebten oder evakuiert und umgesiedelt wurden als auch viele Arbeiter und Soldaten (Liquidatoren), die bei Notfallmaßnahmen und beim Bau des Sarkophags eingesetzt wurden. Offensichtliche akute Effekte wurden zuerst bei Feuerwehrleuten und bestimmten stark bestrahlten Liquidatoren be-

obachtet. 134 Patienten wurden behandelt; 28 von ihnen starben 1986, 11 Personen später. Die zweite Gruppe von Personen mit strahlenbedingten gesundheitlichen Auswirkungen ist die Gruppe von ungefähr 3.000 Kindern und Jugendlichen mit **Schilddrüsenkrebs**; neun dieser Menschen starben. Bei **Leukämieerkrankungen** sprechen jüngste Studien von einer Verdoppelung der aufgetretenen Fälle zwischen 1986 und 1996 bei russischen Hilfsmannschaften (11 Fälle), die einer Strahlendosis von mehr als 150 mSv ausgesetzt waren (externe Dosis). Bei Dosen über 250 mSv kann der Unfall von Tschernobyl zu Katarakten (grauer Star) geführt haben. Andere mögliche gesundheitliche Auswirkungen auf die Bevölkerung wie Leukämie oder angeborene Fehlbildungen konnten statistisch nicht mit der Strahlendosis korreliert werden. Eine Studie zu vorgeburtlich strahlenbelasteten Kindern zeigt psychische Störungen und Erkrankungen des Nervensystems auf, die auf die Strahlung oder auf die Stressbelastung der Mütter zurückgeführt werden könnten, die zu der Gruppe der evakuierten und umgesiedelten Personen gehörten.

Allgemein kann gesagt werden, dass die beobachteten gesundheitlichen körperlichen Auswirkungen, die wissenschaftlich mit der Strahlenexposition korreliert werden können, auf die Personen beschränkt sind, die relativ hohen Strahlendosen ausgesetzt waren (Feuerwehrleute, Liquidatoren, Evakuierte und Kinder aus kontaminierten Gebieten).

Die **Zahl der Todesfälle**, die auf den Unfall von Tschernobyl zurückzuführen sind und sein werden, war für die Öffentlichkeit, die Wissenschaftler, die Massenmedien und die Politiker von großem Interesse. Diese Zahl wurde kürzlich auf ungefähr 4.000 geschätzt. Darin sind die Todesfälle aufgrund von akutem Strahlensyndrom, Schilddrüsenkrebs-erkrankungen bei Kindern und Krebserkrankungen in der Bevölkerung eingeschlossen.

Nach 20 Jahren ist das Trauma des Unfalls von Tschernobyl bei einer Bevölkerung von 7 Millionen Menschen, die in der Nähe der Sperrzone leben, immer noch greifbar. Die Angst vor möglichen Spätfolgen der Strahlung wirkt paralyisierend und verursacht Stress. Vorliegende Studien haben gezeigt, dass mit dem Reaktorunfall in Tschernobyl in Zusammenhang stehende psychische Probleme sich im Laufe der Zeit nicht verringerten. Bei einem erheblichen Teil der Liquidatoren wurde ein chronisches Erschöpfungssyndrom beobachtet, das durch Strahlendosen in Verbindung mit **psychologischer Belastung** bedingt sein könnte. Unter den Bewohnern der stark kontaminierten Gebiete gibt es eine signifikante Zunahme verschiedener psychiatrischer Störungen. Durch die psychische Belastung nach dem Unfall veränderte sich die Einstellung der Bevölkerung zur eigenen Gesundheit ganz erheblich. Die Ärzte sind wichtige Multiplikatoren; die Wahrnehmung des Strahlenrisikos durch die Ärzte ist von Bedeutung, da sie ihre

Beziehungen zu den Patienten beeinflusst. Ein Aufklärungsprogramm für Ärzte wäre sehr hilfreich. Auch hat das System der staatlichen Ausgleichszahlungen und Privilegien, das immer noch in Kraft ist, vielen nicht betroffenen Menschen die Botschaft vermittelt, dass sie Opfer sind und einen Zustand von Apathie verursacht. Das Gesamtergebnis ist ein generelles Misstrauen. Gegenwärtig ist Tschernobyl immer noch eine psychologische, soziale und ökonomische Katastrophe. Allerdings wurde die psychische Belastung einiger Bevölkerungsgruppen durch positive Maßnahmen gemildert. Zu diesen Maßnahmen gehörten das ETHOS-Programm für **nachhaltige Wiederbelebung** und auch ein Schüleraustausch.

Eines der **verbliebenen Risiken** ist der mögliche Einsturz des **Sarkophags**. Die Wahrscheinlichkeit dafür ist nicht sehr hoch, auch seine radiologischen Auswirkungen außerhalb der Sperrzone würden gering bleiben. In einem internationalen Projekt wird der Bau einer neuen sicheren Umhüllung über dem zerstörten Reaktor von Tschernobyl geplant. Das zweite Risiko könnte die zukünftige Kontamination **natürlicher Gewässer** und aquatischer Ökosysteme sein durch die Austragung von Cs-137 und Sr-90 von den kontaminierten Böden und von den vielen improvisierten Abfalldeponien in der Sperrzone.

Der Unfall von Tschernobyl führte zu einer Vielzahl von Maßnahmen im Hinblick auf die Vermeidung weiterer Unfälle bei RBMK-Reaktoren. Darüber hinaus wurden Untersuchungen an anderen Reaktortypen durchgeführt und im wesentlichen Accident management-Maßnahmen eingeleitet. Als wichtige Aktivität ist auch die verstärkte internationale Zusammenarbeit auf dem Gebiet der Sicherheit zu nennen. Gute **internationale Zusammenarbeit** ist auch unerlässlich für eine Verbesserung der Fähigkeit, Gegenmaßnahmen zu ergreifen. Dies schließt sowohl eine Harmonisierung von Kriterien auf der Grundlage akzeptierter Strahlenschutzprinzipien und abgestimmte Verfahren zur Zusammenarbeit als auch effektive nationale Überwachungs- und Notfallschutzsysteme ein.

1 Der Unfallhergang

Der Schwerpunkt dieser Stellungnahme liegt auf den Folgen des Reaktorunfalls. Aus diesem Grund sind die Ausführungen zum Reaktor selbst und zum Unfallhergang kurz gefasst.

1.1 Der Reaktor

Das Kernkraftwerk Tschernobyl liegt etwa 130 km nördlich von Kiew in der Ukraine und ungefähr 20 km südlich der Grenze zu Belarus (Weißrussland). Zum Zeitpunkt des Unfalls am 26. April 1986 beruhte das sowjetische Kernenergieprogramm im Wesentlichen auf zwei Reaktortypen, dem WWER, einem Druckwasser-Reaktor, und dem RBMK, einem graphitmoderierten Leichtwasserreaktor mit einer Leistung von 1.000 (Tschernobyl Block 4, entspricht 3.200 MWth) oder 1.500 MWeI. Der RBMK, eine sowjetische Konstruktion, war auf die Staaten der Sowjetunion beschränkt. Er verwendet leicht angereicherten (2 % Uran-235) Urandioxid-Brennstoff. Beim RBMK handelt es sich um einen Druckröhren-Siedewasserreaktor mit direkter Dampfeinspeisung in die Turbinen ohne einen zwischengeschalteten Wärmetauscher. Das Wasser dient als Kühlmittel und versorgt außerdem die Turbinen mit Dampf. Die 1693 senkrecht angeordneten Druckröhren enthalten den mit einer Zirkoniumlegierung ummantelten Urandioxid-Brennstoff, der von Kühlwasser umgeben ist. Auf Grund der Reaktorkonstruktion und mittels einer speziell konstruierten Brennelementlademaschine ist es möglich, Brennelemente bei laufendem Betrieb zu wechseln.

Der Moderator besteht aus Graphit. Ein Helium-Stickstoff-Gemisch umströmt die Graphitblöcke, um die Temperatur zu begrenzen und dadurch eine Oxidation des Graphits zu verhindern. Der Kern selbst ist etwa 7 m hoch und hat einen Durchmesser von ungefähr 12 m. Durch Ein- und Ausfahren von 211 Regelstäben wird die Leistung des Reaktors gesteuert. Mehrere Sicherheitssysteme wie ein Notkühlsystem, ein Abschaltsystem und andere technische Vorkehrungen (siehe u.a. INSAG-7 Anhang II (IAEO 1992b)) sind Bestandteile des Sicherheitssystems. Diese technischen Einrichtungen werden durch sicherheitsorientierte Vorschriften ergänzt. Dazu gehört u.a. die Vorschrift, dass bei laufendem Reaktor mindestens 30 Steuerstäbe in den Kern eingefahren sein müssen.

Im Volllastbereich verfügt der RBMK über einen insgesamt schwach negativen Leistungskoeffizienten, was bedeutet, dass der Reaktor ein selbst-stabilisierendes Verhalten zeigt und dass sich dementsprechend bei einer Reaktivitätszufuhr durch Verfahren der Regelstäbe eine neue stationäre Leistung einstellt. Bei einer Leistung von weniger als 20 Prozent der Volllast und niedrigem Dampfgehalt weist

der Reaktor allerdings einen positiven Void-Koeffizienten auf, insbesondere bei Gleichgewichtsabbrand. Das heißt, dass ein höherer Dampfgehalt in den Druckröhren, verursacht durch eine höhere Leistung oder reduzierten Wasserdurchfluss nicht zu einer Stabilisierung, sondern zu weiterem Leistungsanstieg führt. Diese Tatsache war ein wesentlicher Faktor beim Unfallhergang.

Als weiterer wesentlicher technischer Faktor kam hinzu, dass die Regelstäbe nur langsam eingefahren werden können (ca. 20 s) und dass die spezielle Konstruktion (bestehend aus einem Wasserverdränger aus Graphit und dem Absorberteil, die über ein Gestänge miteinander verbunden sind) zur Folge hat, dass der aus der voll ausgefahrenen Stellung einfahrende Regel- bzw. Abschaltstab zu Beginn des Einfahrens sogar eine Reaktivitätszunahme bewirkt.

1.2 Der Unfall

Am 25. April 1986 sollte der Reaktor des Blocks 4 zu routinemäßigen Wartungsarbeiten abgefahren werden. Man hatte beschlossen, dies zu nutzen, um zu testen, ob und wie lange die Kernkühlung bei einem Lastabwurf und Spannungsausfall durch den Strom, den der Turbogenerator beim Auslaufen produziert, aufrecht erhalten werden kann (GRS 1996). Dazu wurde die Turbine abgeschaltet und einige Kühlmittelpumpen wurden vom auslaufenden Generator versorgt. Zu diesem Zweck wurde das Notkühlsystem absichtlich unverfügbar geschaltet, die Notstromversorgung blieb aber aktiv.

Auf Grund des zeitlich verzögerten Versuchsbeginns mussten die Anfangsbedingungen gegenüber der ursprünglichen Planung gravierend verändert werden. Insbesondere war die Reaktorleistung auf ca. 200 MW abgefallen und weniger als die vorgeschriebenen 30 Steuerstäbe (6 bis 8 Steuerstäbe) waren in den Kern eingefahren. Ferner war der Dampfgehalt unzulässig niedrig, da das vorgesehene Begrenzungs-system, das den Reaktor bei zu niedrigem Dampfgehalt abgeschaltet hätte, unwirksam gemacht worden war. Demzufolge bestand bereits zu Versuchsbeginn ein äußerst instabiler Zustand (stark positiver Void-Koeffizient und insgesamt positiver Leistungskoeffizient). Mit dem Turbinenauslauf gemäß Versuchsprogramm nahm der Kühlmitteldurchsatz ab; die auf den auslaufenden Turbogenerator geschalteten Kühlmittelpumpen liefen nach Beginn des Auslaufens noch etwa 36 Sekunden. Folglich nahm der Dampfgehalt zu, was wegen des positiven Void-Koeffizienten zu einem Leistungsanstieg führte.

Offensichtlich versuchte man den Anstieg durch die Schnellabschaltung des Reaktors zu begrenzen. Auf Grund der beschriebenen Fehlkonstruktion bewirkte das Einfahren der Regelstäbe eine positive Reaktivitätszufuhr, d. h. beim Einfahren

der Stäbe stieg die Leistung noch weiter an. Dieser positive Reaktivitätseffekt der Regel- und Abschaltstäbe, verbunden mit einem extrem positiven Dampfblaseneffekt und einem insgesamt positiven Leistungskoeffizienten, hat dazu geführt, dass ein prompt überkritischer Zustand mit einem Anstieg der Reaktorleistung mit einer Periode im Millisekundenbereich erreicht wurde. Dadurch nahm die Wärmeerzeugung im Kern sehr schnell zu.

Infolge der plötzlich erhöhten Wärmeerzeugung zerbrach ein Teil der Brennelemente, und kleine, heiße Brennstoffpartikel reagierten mit Wasser und verursachten so eine Dampfexplosion, die den Reaktorkern zerstörte. Außerhalb des Reaktorgebäudes beobachteten Augenzeugen zwei Explosionen innerhalb von drei Sekunden.

Der Unfall ereignete sich am Samstag, dem 26. April 1986, um 01.23 Uhr, als die Explosionen den Kern von Block 4 und das Dach des Reaktorgebäudes zerstörten. In dem, was von Block 4 übrig geblieben war, breiteten sich Feuer aus, und es bildeten sich Dampf- und Staubwolken; auch das Dach des benachbarten Maschinenhauses und mehrere Lager mit Diesel und brennbarem Material fingen Feuer.

Eine erste Gruppe von 14 Feuerwehrleuten traf um 01.28 Uhr am Unfallort ein. Bis etwa 04.00 Uhr wurde Verstärkung zum Unfallort gebracht, dann waren 250 Feuerwehrleute verfügbar, und 69 Feuerwehrleute beteiligten sich an den Brandbekämpfungsmaßnahmen. Bis 02.10 Uhr waren die größten Brandherde auf dem Dach der Maschinenhalle gelöscht, gegen 02.30 Uhr waren die größten Feuer auf dem Dach des Reaktorgebäudes unter Kontrolle. Um 05.00 Uhr desselben Tages schienen die Feuer unter Kontrolle zu sein, aber zu diesem Zeitpunkt hatte der Graphitbrand bereits begonnen.

Seitens sowjetischer Wissenschaftler wurde die Verantwortung des Betriebspersonals für den Unfall stark hervorgehoben und den Fehlern in der Reaktorauslegung dabei nur wenig Beachtung geschenkt (INSAG-1 und INSAG-7 Anhang II (IAEO 1992b)). Unabhängige Bewertungen (IAEO 1986b) zeigen, dass der Unfall auf eine Kombination dieser beiden Faktoren zurückzuführen ist.

1.3 Der Graphitbrand

Der Brand des Graphitmoderators stellte ein besonderes Problem dar, und es bestand die sehr reale Furcht, dass jeder Versuch, den Brand zu löschen, zu einer verstärkten Freisetzung von Radionukliden, möglicherweise durch Dampfbildung, führen oder sogar eine Rekritikalität im Kernbrennstoff hervorrufen könnte.

Es wurde schließlich festgelegt, den Graphitbrand mit großen Mengen unterschiedlicher Materialien abzudecken. Die ersten Maßnahmen zur Bekämpfung des

Brandes und zur Eindämmung der Radionuklidfreisetzung bestanden darin, dass neutronenabsorbierende Verbindungen und Materialien zur Brandbekämpfung in den bei der Zerstörung des Reaktors entstandenen Krater abgeworfen wurden, um die Rekritikalität des Kernbrennstoffs auszuschließen. Insgesamt wurden etwa 5.000 t Material, davon ca. 40 t Borverbindungen, 2.400 t Blei, 1.800 t Sand und Lehm und 600 t Dolomit sowie Natriumphosphate und polymere Flüssigkeiten, abgeworfen. Etwa 150 t Material wurden am 27. April abgeworfen, gefolgt von 300 t am 28. April, 750 t am 29. April, 1.500 t am 30. April, 1.900 t am 1. Mai und 400 t am 2. Mai. Es wurden ca. 1.800 Hubschrauberflüge durchgeführt, um Material über dem Reaktor abzuwerfen. Bei den ersten Flügen verharrten die Hubschrauber über dem Reaktor, während sie das Material abwarfen. Da jedoch die von den Hubschrauberpiloten während dieses Vorgangs erhaltene Dosis zu hoch war, beschloss man, die Materialien ohne Anzuhalten während des Überflugs über den Reaktor abzuwerfen. Durch dieses Vorgehen kam es zu weiteren Zerstörungen an den noch stehenden Strukturen und die Kontamination wurde weiter verbreitet.

Über den weiteren Ereignisablauf wird immer noch spekuliert. Die obere Graphitschicht wirkte zunächst bei der Freisetzung flüchtiger Verbindungen wie ein Filter. Aber nach einer gewissen Branddauer ging die Filterwirkung einer abdeckenden Graphitschicht verloren und die Freisetzung flüchtiger Spaltprodukte aus dem Brennstoff nahm zu. Am achten Tag nach dem Unfall schmolz das Corium (beschädigter Reaktorkern) durch die untere dicke Abschirmung und floss auf den Boden der darunter liegenden Ebene. Diese Neuverteilung des Coriums kann die Freisetzung von Radionukliden verstärkt haben. Durch den Kontakt von Corium mit Wasser entstand Dampf, der eine Zunahme der Radionuklidfreisetzung in der letzten Phase der aktiven Periode verursachte.

Am 9. Mai war der Brand gelöscht, und die Arbeiten an einer massiven Stahlbetonplatte mit eingebautem Kühlsystem unter dem Reaktor begannen. Dazu musste ein Tunnel von Block 3 aus gegraben werden. Etwa vierhundert Personen arbeiteten an diesem Tunnel, der innerhalb von 15 Tagen fertig gestellt wurde. Dieses Core Catcher Projekt wurde nie abgeschlossen.

Zusammenfassung

Der Reaktorunfall von Tschernobyl war das Ergebnis einer nicht inhärent sicheren Reaktorauslegung und mangelnder „Sicherheitskultur“. Der Reaktor war nicht ausreichend sicher konstruiert. Sicherheitstechnische Auslegungsprinzipien wie beispielsweise eine „Fehler verzeihende“ Technik wurden beim Design des RBMK nicht angewandt. Zudem war das Betriebspersonal nicht über Schwächen der Auslegung informiert und war sich sehr wahrscheinlich auch nicht bewusst, dass

die bei dem Versuch gewählte Fahrweise zu Explosionsbedingungen im Reaktor führen würde. Die mangelhafte Sicherheitskultur äußert sich vor allem in der Tatsache, dass sich die Betriebsmannschaft nicht an bewährte betriebliche und sicherheitsorientierte Verfahrensweisen hielt. Die Kombination all dieser Faktoren löste den schwersten nuklearen Unfall aus, durch den der Reaktor innerhalb weniger Sekunden völlig zerstört wurde. Die Folgen können als das Produkt der Überlagerung von zwei schwerwiegenden Unfällen gesehen werden: die Explosion des Reaktors und die Kernschmelze zusammen mit dem intensiven und lang anhaltenden Brand des Graphitmoderators.

2 Freisetzung, Ausbreitung und Ablagerung radioaktiver Materialien

Das betroffene Gebiet der Ukraine um Tschernobyl wird als Waldgebiet ähnlich dem in Belarus mit einer niedrigen Bevölkerungsdichte beschrieben. Die etwa 3 km vom Reaktor entfernt gelegene neue Stadt Pripjat hatte vor dem Unfall 49.000 Einwohner. Die alte Stadt Tschernobyl mit damals 12.500 Einwohnern liegt ungefähr 15 km südöstlich des Kernkraftwerks. Innerhalb eines Radius von 30 km um die Anlage lebten damals zwischen 115.000 und 135.000 Menschen.

Die Freisetzung von Radionukliden in die Atmosphäre begann während der anfänglichen Explosion des Reaktors und hielt ungefähr 10 Tage an. Die Zusammensetzung der freigesetzten Radionuklide variierte während dieser Zeit. Die anfänglichen Explosionen führten vor allem zur Ablagerung von Brennstoffpartikeln im Umkreis von 30 km um den Reaktor. Innerhalb dieses Gebiets bestand der radioaktive Fallout hauptsächlich aus großen, „nicht oxidierten“ Brennstoffpartikeln (~10 µm). Während der zweiten Phase, dem nachfolgenden Graphitbrand, waren die Partikel kleiner und „oxidiert“. Flüchtige Radionuklide hafteten an diesen kleinen Staubpartikeln (Aerosolen) und verteilten sich in Europa.

2.1 Freisetzung

Die Freisetzung radioaktiver Substanzen in die Atmosphäre bestand aus Gasen, Aerosolen und feinen Brennstoffteilchen. Durch die beiden Explosionen wurden auch Brennstoff, Bestandteile des Kerns, Graphit und Strukturkomponenten in die Luft geschleudert, die in Form heißer und hoch radioaktiver Bruchstücke niedergingen. Der zerstörte Kern wurde freigelegt. Eine aus Rauch, radioaktiven Spaltprodukten und Bruchstücken des Kerns und des Gebäudes bestehende Fahne stieg 1 bis 2 km hoch auf. Die erste große Freisetzung bestand im Wesentlichen aus den flüchtigeren Radionukliden wie Edelgasen, Jod und kleineren Mengen Cäsium. Die zweite große

Freisetzung zwischen dem siebten und dem zehnten Tag nach dem Unfall wurde durch die hohen Temperaturen der Kernschmelze bestimmt. Durch den starken Graphitbrand kam es zur Ausbreitung von Radionukliden und Spaltfragmenten bis hoch in die Atmosphäre. Die Emissionen hielten etwa zwanzig Tage an, verringerten sich aber nach dem zehnten Tag, als der Graphitbrand gelöscht war.

Die schwereren Bruchstücke in der Fahne gingen in der Nähe des Unfallorts nieder, während kleinere Partikel weiter verteilt wurden. Leichtere Bestandteile einschließlich der Spaltprodukte und praktisch des gesamten Edelgasinventars wurden von den vorherrschenden Winden in nordwestliche Richtung getragen. Man stellte eine Partikelgröße von 0,3 bis 1,5 µm bei den kleineren Partikeln und 10 µm bei den größeren Partikeln fest. Die größeren Partikel enthielten nichtflüchtige Radionuklide wie Zr-95, Nb-95, La-140, Ce-144 und die in der Uranmatrix des Brennstoffs eingebetteten Transurane. Andere Kondensate des verdampften Brennstoffs wie radioaktives Ruthenium bildeten Metallpartikel. Ebenso wie die kleinen Brennstoffpartikel wurden diese Partikel oft als „heiße Partikel“ bezeichnet und noch in großer Entfernung vom Unfallort gefunden (IAEO 1986a). In großen Entfernungen bestand der radioaktive Fallout allerdings im Allgemeinen nicht aus Brennstoffpartikeln.

In einer ersten Abschätzung der Freisetzungen durch sowjetische Wissenschaftler, die beim Post-Accident Assessment Meeting der IAEO in Wien (IAEO 1986a) vorgelegt wurde, ging man davon aus, dass das Edelgasinventar des Kerns (Xenon und Krypton) zu 100 % entwichen war, und zwischen 10 und 20 % der leicht flüchtigen Elemente wie Jod, Tellur und Cäsium freigesetzt worden waren. Die Menge des in die Umwelt freigesetzten Brennstoffmaterials wurde auf $3,5 \pm 0,5$ % geschätzt (IAEO 1986a, Dreicer 1996). Dies entspricht dem Austrag von 6 t Brennstofffragmenten.

Für die radiologische Betrachtung sind I-131 und Cs-137 die wichtigsten Radionuklide, denn sie sind für den größten Teil der Strahlenbelastung der Allgemeinbevölkerung verantwortlich. Nach dem Unfall wurden für diese beiden Radionuklide verschiedene Freisetzungsschätzungen vorgelegt. Die erste stammte von sowjetischen Wissenschaftlern, und später – 1988 – legte das United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR) Freisetzungswerte vor, die nicht nur auf den sowjetischen Daten beruhten, sondern auch die weltweiten Zahlen zur Ablagerung mit einbezogen. Die Gesamtfreisetzung von Cs-137 wurde auf 33 % des Kerninventars d.h. 70 bis 85 Petabecquerel (PBq) (10^{15} Bq) geschätzt, wovon 31 PBq in der Sowjetunion niedergingen. Nach eingehender Durchsicht der vielen Berichte (IAEO 1986a, Buzulukov 1993) wurde dies bestätigt. Im Falle von I-131 hielt man 50 bis 60 % des Kerninventars von 3.200 PBq für die genaueste Schätzung.

Die Schätzung von 1986 ist immer noch gültig, aber man ist der Meinung, dass die Ergebnisse hinsichtlich der Freisetzung kurzlebiger Radionuklide (I-132 und I-135)

unvollständig sind. Im UNSCEAR-Bericht aus dem Jahr 2000 (UNSCEAR 2000) werden die Gesamtfreisetzungen kurzlebiger Jodisotope auf der Grundlage erster Informationen und deren Neueinschätzung (Abagyan 1986, Izrael 1990) dargestellt; es wird festgestellt, dass diese Freisetzungen erheblich unter denen von I-131 (1.760 PBq) liegen, nämlich für I-132 bei 1.040 PBq, für I-133 bei 910 PBq, für I-134 bei 25 PBq und für I-135 bei 250 PBq. Es wird angenommen, dass I-132 sich im radioaktiven Gleichgewicht mit Te-132 befindet.

In praktisch jedem Land der nördlichen Hemisphäre wurde ein gewisses Ausmaß an radioaktiver Kontamination des Bodens festgestellt. Auf der Grundlage lokaler Messungen veröffentlichte die Europäische Kommission einen Atlas der Kontamination in Europa (De Cort 1998, Izrael 1998).

2.2 Ausbreitung und Ablagerung innerhalb der ehemaligen Sowjetunion

Während der ersten zehn Tage nach dem Unfall, als es zu wesentlichen Aktivitätsfreisetzungen kam, änderten sich die Wetterbedingungen häufig, was zu signifikanten Schwankungen in der Freisetzungsrichtung und den Ausbreitungsparametern führte. Die Ablagerungsmuster radioaktiver Partikel hingen in hohem Maße von der Partikelgröße und dem Auftreten von Niederschlägen ab. Die wesentlichen chemisch-physikalischen Formen der Radionuklidablagerungen bestanden aus fein dispergierten Brennstoffteilchen, aus durch Kondensation gebildeten Partikeln und Mischpartikeln. Die Ausbreitung in der nächstgelegenen kontaminierten Zone (< 100 km) spiegelte die Radionuklidzusammensetzung des Brennstoffs wider und unterschied sich von der der Fernzone (> 100 km bis 2.000 km). In der Nahzone abgelagerte große Partikel enthielten Brennstoff (U, Pu), hitzebeständige Elemente (Zr, Mo, Ce and Np) und Zwischenprodukte (Ru, Ba, Sr). Die flüchtigen Elemente (I, Te und Cs) in Form von durch Kondensation gebildeten Partikeln waren in der Fernzone über eine größere Fläche verteilt. Die größten Partikel, bei denen es sich hauptsächlich um Brennstoffteilchen handelte, lagerten sich im Wesentlichen durch Sedimentation innerhalb einer Entfernung von 100 km vom Reaktor ab. Kleine Partikel wurden vom Wind über große Entfernungen transportiert und in erster Linie durch Niederschläge abgelagert. In einigen Gebieten der Fernzone traten hohe Kontaminationen mit Cs-137 auf, was hauptsächlich auf Regenfälle zum Zeitpunkt des Durchzugs der radioaktiven Wolke zurückzuführen ist. Das lokale Kontaminationsmuster war mosaikähnlich. Auch während des Unfalls variierte die Radionuklidzusammensetzung der freigesetzten Partikel und der anschließenden Ablagerungen auf dem Boden z.B. aufgrund von Schwankungen der Temperatur während des Freisetzungprozesses erheblich. Cs-137 wurde zur Darstellung des Umfangs der Bodenablagerungen ausgewählt, weil es (1) leicht messbar ist und (2) den größten Beitrag zur Strahlenbelastung der Bevölkerung lieferte, sobald das

kurzlebige I-131 zerfallen war. Alle in der ehemaligen Sowjetunion erstellten Karten zur Jodablagerung beruhten in erster Linie auf der begrenzten Zahl von I-131-Messungen und benutzten Cs-137-Messungen als Maßstab. Diese Karten sind mit Vorsicht zu behandeln, da das Verhältnis der Dichte von I-131-Ablagerungen zur Dichte von Cs-137-Ablagerungen (in Bq/m²) nachgewiesenermaßen in Belarus stark (Faktoren 5 bis 10) schwankt. Mit diesem Verhältnis hat man sich in vielen Ländern nicht ernsthaft befasst.

Eine Analyse der relevanten Wetterbedingungen ermöglichte den Nachweis, dass die Radionuklidkontamination im Polesse-Gebiet auf ukrainischer und belarussischer Seite (westliche Ausbreitungsrichtung) primär durch die Freisetzungen am 26. und 27. April verursacht worden waren. Bodenablagerungen von Cs-137 von mehr als 40 Kilobecquerel pro Quadratmeter [kBq/m²] bedeckten große Flächen des nördlichen Teils der Ukraine und des südlichen Belarus. Der am stärksten kontaminierte Bereich war die 30-km-Zone um den Reaktor, wo Cs-137-Bodenablagerungen im Allgemeinen 1.500 kBq/m² (= 40 Ci/km²) (Balonov 1993) überschritten.

Der 170 km von Tschernobyl entfernt gelegene Hot Spot bei Gomel ist auf Regenfälle während der Ausbreitung in nordöstlicher Richtung am 28./29. April zurückzuführen. Die Bodenablagerungen von Cs-137 in den am stärksten kontaminierten Bereichen in diesem Hot Spot waren mit dem Kontaminationsgrad des zentralen Hot Spots vergleichbar und erreichten in manchen Dörfern 5.000 kBq/m² (Balonov 1993).

Der Hot Spot im Gebiet Bryansk-Kaluga-Tula-Orel in Russland ungefähr 400 bis 500 km nordöstlich des Reaktors wurde von derselben radioaktiven Wolke verursacht. Die Menge der Cs-137-Ablagerung war allerdings geringer.

Der Transport von Luftmassen in den Süden, der am 30. April begann, war für die Kontaminierung des Hauptteils der Ukraine verantwortlich.

Der radioaktive Fallout in der Russischen Föderation und in Belarus enthielt einen höheren Anteil flüchtiger Nuklide wie Ru-103/106, I-131 und Cs-137. Die Kontamination des Gebietes in der Ukraine südlich von Tschernobyl enthielt auch nichtflüchtige Elemente.

Außerhalb der drei primär kontaminierten Gebiete gab es im größeren Teil des europäischen Gebiets der ehemaligen Sowjetunion zudem viele radioaktiv kontaminierte Gegenden mit Cs-137-Werten im Bereich von 40 bis 200 kBq/m².

Die von erheblicher Kontamination (über 555 kBq/m² = 15 Ci/km²) betroffene Ge-

samtfläche beträgt in Belarus 7.000 km², in Russland 2.700 km² und in der Ukraine 1.300 km² (de Cort 1998).

2.3 Ausbreitung und Ablagerung außerhalb der ehemaligen Sowjetunion

In Westeuropa wurde die auf Tschernobyl zurückzuführende Radioaktivität zuerst durch die Routineüberwachung bei einem schwedischen Kernkraftwerk gemessen. Zunächst wehte der Wind in nordwestlicher Richtung und diese Phase war somit für einen hohen Anteil der Ablagerungen in Nordeuropa verantwortlich. Später bewegte sich die Fahne mehr nach Südwesten, und abhängig von der Höhe der Fahne, der Windrichtung und -geschwindigkeit, dem Bodenrelief und dem Ausmaß der Niederschläge während des Durchzugs der Fahne kam es in einem großen Teil Mitteleuropas sowie im nördlichen Mittelmeer und auf dem Balkan zu Ablagerungen. Als Folge starker örtlicher Schauertätigkeit konnte die Kontamination in manchen lokal stark begrenzten Gebieten in den westlichen Ländern (z.B. in Bayern) ebenso hoch sein wie in den weniger belasteten Gebieten der Nachfolgestaaten der Sowjetunion. Die außerhalb des Gebiets der Sowjetunion nachgewiesenen radiologisch wichtigsten Radionuklide waren I-131, Te-132/I-132, Cs-137 und Cs-134.

In Österreich, der Ost- und Südschweiz, Teilen Süddeutschlands und Skandinaviens, wo es während des Durchzugs der Fahne zu starken Regenfällen gekommen war, waren die Ablagerungen aus der Freisetzung von Tschernobyl örtlich hoch (bis und sogar höher als 37 kBq/m²). Im Durchschnitt blieben sie jedoch 5 - 10 mal schwächer. Speziell erwähnenswert ist ein „Hot Spot“ von 2 - 4 km² in der schwedischen Gemeinde Gävle (über 185 kBq/m²) (Edvarson 1991). Weiter westlich, in Spanien und Portugal waren die Ablagerungen praktisch Null (0,02 kBq/m²) (UNSCEAR 1988). In Frankreich wiesen die Ablagerungen ein starkes Gefälle von Ost nach West auf; in Ostfrankreich war die Lage wie in der Schweiz und in Westfrankreich wie in Spanien. In Deutschland verlief das Gefälle von Süd („Hot Spots“ in Südbayern) nach Nord.

In der nördlichen Hemisphäre war die Ausbreitungsfahne zwar in so weit entfernten Gebieten wie Japan und Nordamerika nachweisbar, doch kam es in Ländern außerhalb Europas nur zu sehr geringen unfallbedingten Radionuklidablagerungen, 0.13 kBq/m² in Japan und 0.08 kBq/m² in den USA. In der südlichen Hemisphäre (z. B. Australien) stellten die Überwachungsnetze für Umweltstrahlung keinerlei Ablagerungen fest (UNSCEAR 1988).

Zusammenfassung

Die direkte Folge des Reaktorunfalls von Tschernobyl war eine enorme Freisetzung radioaktiver Materialien in die Umwelt, die vor allem auf einem Gebiet von ungefähr 4.000 km² zu einer sehr starken Kontamination des Bodens führte. Dieses Gebiet ist immer noch eine Sperrzone. Mittlerweile liegen recht genaue Schätzungen der Gesamtmenge des freigesetzten radioaktiven Materials vor. Der Freisetzungsprozess dauerte über eine Woche. Unmittelbar nach der Explosion wurden vor allem gasförmige, flüchtige (I, Cs) und feste Stoffe – insbesondere Brennstoff – mit vergleichsweise großen Partikelgrößen freigesetzt. Die großen Partikel wurden in Entfernungen < 100 km, hauptsächlich im Umkreis von 30 km abgelagert. Die zweite Phase bestand aus der Freisetzung aus dem geschmolzenen Kern bei gleichzeitigem Brand des Graphitmoderators und erreichte ihren Höhepunkt nach ca. 8 Tagen. Dabei wurden Aerosole und Feststoffe geringer Partikelgröße freigesetzt, die infolge des Brandes in große Höhen aufstiegen und über große Entfernungen transportiert wurden. Infolge der Freisetzungseigenschaften wurden weiter entfernte Gebiete (> ca. 100 km) hauptsächlich durch I, Cs, Te belastet, während in der Nahzone auch Brennstoff (U, Pu), sowie hitzebeständige Elemente (Zr, Mo, Ce, Np) und Zwischenprodukte (Ru, Ba, Sr) niedergingen. Während dieses Prozesses änderten sich Zusammensetzung und Eigenschaften des radioaktiven Materials aufgrund von Zerfall, chemischen Umwandlungen, Veränderungen der Partikelgröße und nassen oder trockenen Ablagerungen. Das Ablagerungsmuster war sehr uneinheitlich. Zu signifikanten Radionuklidablagerungen kam es dort, wo der Durchzug der radioaktiven Fahne zeitlich mit Regenfällen zusammentraf. Obgleich die gesamte nördliche Hemisphäre betroffen war, trat nur im Bereich der früheren Sowjetunion und in kleinen Teilen des sonstigen Europa eine signifikante Kontamination auf.

3 Expositionspfade

Im ersten Jahr nach dem Unfall gab es zwei Strahlenquellen, die für die externe Exposition der Bevölkerungen verantwortlich waren: die radioaktive Wolke in den ersten Tagen und der radioaktive Fallout auf Boden, Bewuchs und Gebäude. Die höchstbelasteten Gruppen waren in Land- und Forstwirtschaft arbeitende Personen. Die direkte Strahlung aus der Wolke (Immersion) trug zu einem geringen Anteil, nämlich 3 %, zur Gesamtdosis bei. Die interne Dosis wurde hauptsächlich durch die Inkorporation (Inhalation und Ingestion) von I-131, I-133, Cs-134, Cs-137 und Sr-90 und in den Gebieten in der Nähe des Reaktors auch durch die Inhalation von Pu-239 und Am-241 mit Staubpartikeln verursacht.

Eine Analyse der von der Bevölkerung erhaltenen effektiven Dosen (siehe Kap. 6) zeigt, dass drei verschiedene Phasen definiert werden können.

- Im ersten Jahr, der Zeitspanne mit der stärksten Belastung, beliefen sich die erhaltenen Dosen auf ca. 30 % der akkumulierten Gesamtdosen
- In der zweiten Phase, die sich von 1987 bis 1991 erstreckte, ist die Strahlung nur auf die Ingestion von Cs-134 und Cs-137 zurückzuführen. Durch die Regelung des Verzehrs sowie Aktivitäten und Gegenmaßnahmen hauptsächlich im landwirtschaftlichen Bereich bleiben die Strahlendosen unter Kontrolle und begrenzt.
- In der dritten Phase nach 1991 war die Situation ähnlich, aber der Schutz geringer wegen nachlassender Sorgfalt. Der Cs-137-Gehalt im menschlichen Körper folgt heute der natürlichen Abnahme-Rate in der Umwelt.

Aufgrund der Schutzmaßnahmen bei Tierprodukten wurde nur eine geringe Menge Milch mit einem Cs-137-Gehalt oberhalb der zulässigen Werte produziert. Allerdings können für zu den Selbstversorgern zählende Familien, die von ihrer selbst produzierten Milch leben, die Dosen erheblich über dem Durchschnitt liegen.

Waldpilze und -beeren sind ein wichtiger Bestandteil der Ernährung von Einwohnern ländlicher Gebiete. Der Radionuklidgehalt dieser Produkte ging außerordentlich langsam zurück. Die Kontamination beträgt jetzt noch halb so viel wie zu Anfang. Dies ist dem radioaktiven Zerfall von Cs-137 gegenüberzustellen (Halbwertszeit 30 Jahre), was deutlich zeigt, dass die zusätzliche Verringerung, z.B. durch Verwitterung, fast null ist. Auch heute noch werden in Belarus, der Ukraine und Russland sowie in manchen Gebieten in den skandinavischen Ländern hohe Werte bei Pilzen (1.000 Bq/kg) und beim Fleisch wildlebender Waldtiere (300 - 500 Bq/kg) gemessen.

Die Resuspension der an Bodenpartikeln haftenden Radioaktivität in die Atemluft hängt von den lokalen Klimabedingungen ab. Sie war in den ersten Monaten nach dem Unfall nur lokal, besonders in den Wäldern der Sperrzone, von Bedeutung. Mit Ausnahme einiger Gebiete der Sperrzone ist die Luft in den kontaminierten Gebieten nicht mehr kontaminiert. Selbst bei landwirtschaftlichen Tätigkeiten, die zu Staubeentwicklung führen, bleibt die Menge der freigesetzten radioaktiven Materialien sehr gering.

Im Falle der Schilddrüsenedosis war I-131 das Nuklid, das hauptsächlich zur Strahlenbelastung der Bevölkerung beigetragen hat. Diese Belastung der Schilddrüse ergibt sich in erster Linie aus dem Verzehr kontaminierter Kuhmilch, der für 90 % der Dosis verantwortlich ist. Die interne Strahlenbelastung aufgrund

der Aufnahme von kurzlebigen I-132 und I-133 in die Schilddrüse durch Inhalation während des Durchzugs der radioaktiven Wolke machte nur einen kleinen Teil der Schilddrüsenbelastung aus. Die stärkste Belastung stellte man bei Kindern fest. Die durchschnittliche Schilddrüsendosis betrug 3 Gy bei Kindern in den am stärksten kontaminierten ländlichen Gebieten und 10 Gy oder mehr bei aus einigen Ortschaften in Belarus evakuierten Kindern.

In Flüssen, Seen und Teichen in den kontaminierten Gebieten reicherten sich Radionuklide in den Sedimenten an. Trotz großer Befürchtungen nach dem Unfall war der Beitrag von Sr-90 gering, da es rasch und schneller als Cäsium in tiefere Bodenschichten eindrang.

Zusammenfassung

Während der ersten beiden Wochen waren Inhalation, direkte Bestrahlung und der Verzehr von Milch und frischem Gemüse die Hauptbelastungspfade. Nach einigen Monaten dominierten dann der Genuss von Milch sowie der Verzehr von Fleisch und (Süßwasser-)Fischen. Auch zwanzig Jahre später gibt es in stark belasteten Gebieten, insbesondere in den kontaminierten Zonen der ehemaligen Sowjetunion, immer noch hohe Werte bei Milch, Pilzen und Waldbeeren sowie bei Wild- und Schaffleisch.

4 Schutzmaßnahmen

Man hatte Umfang und Schweregrad eines Unfalls wie den von Tschernobyl mit seiner flächendeckenden Kontamination nicht vorhergesehen. Die für Notfallbereitschaft zuständigen Behörden wurden von den Auswirkungen überrascht. Außerdem bestand die Informationspolitik der Behörden der ehemaligen Sowjetunion in der Anfangsphase vor allem in Hinhalten und Leugnen. Dieses Verhalten wurde gegenüber der eigenen Bevölkerung und auch gegenüber dem Ausland eingenommen. Die Interventionskriterien für einen Unfall waren unvollständig und boten unter den gegebenen Umständen wenig praktische Hilfe. Außerdem wurde von den Medien ein erheblicher politischer Druck auf die Entscheidungsträger ausgeübt, zum Teil aufgrund der öffentlichen Wahrnehmung der Strahlungsgefahr. Unter diesen Umständen wurde sofortiges vorsichtiges Handeln für erforderlich gehalten, dabei wurden Maßnahmen aus Vorsicht und nicht auf der Grundlage fundierter wissenschaftlicher Erkenntnisse und Expertenbeurteilungen ergriffen.

Die erste Phase ist durch ein von Moskau aus koordiniertes Katastrophenmanagement gekennzeichnet. Viele der zentral in Moskau getroffenen Entscheidungen

wurden inzwischen stark kritisiert. Dazu gehörten die späte Verteilung von stabilem Jod an die Menschen in den kontaminierten Gebieten und die verzögerte Räumung der Dörfer in der 30-km-Zone um den Reaktor. Ab 1989 wurde der Öffentlichkeit allmählich das Ausmaß des Unfalls bewusst, und ab 1991 wurde die Politik von den Nachfolgestaaten der Sowjetunion bestimmt, also von Belarus, Russland und der Ukraine. Das ganze Spektrum der angewandten Schutzmaßnahmen wurde in einer Vielzahl internationaler Berichte betrachtet (UNSCEAR 1988, IAEA 1990, IAC 1991, IAEA 1996a, UNSCEAR 2000, IAEA 2001).

4.1 Innerhalb der ehemaligen Sowjetunion

Spät am Abend des 26. April wurde beschlossen, die Stadt Pripjat zu räumen. Vorkehrungen für Transport (1.200 Busse) und Unterbringung der Evakuierten wurden getroffen. Der Evakuierungsbeschluss wurde am folgenden Vormittag um 11.00 Uhr bekannt gegeben, und Pripjat wurde innerhalb von zweieinhalb Stunden geräumt. Die noch in der 30-km-Zone verbleibenden Menschen wurden nach und nach evakuiert, so dass die Gesamtzahl der Evakuierten der ersten Phase schließlich 116.000 betrug. Andere Quellen nennen 135.000.

Weitere Maßnahmen, die insbesondere in der Sperrzone zur Senkung der Dosisbelastung ergriffen wurden, wurden flächendeckend durchgeführt (Komarov 1990), u.a. wurden Gebäude abgewaschen, Wohngebiete und Straßen gereinigt, kontaminierte Erde abgetragen und die Wasserversorgung dekontaminiert. Besonderes Augenmerk galt Schulen, Krankenhäusern und anderen von einer großen Anzahl Menschen genutzten Gebäuden. Man versuchte, die Schilddrüsenbelastung durch Verabreichung von stabilem Jod zur Blockierung der Radioaktivitätsaufnahme durch die Schilddrüse zu senken (Mettler 1992). Doch der Erfolg war zweifelhaft, da diese Maßnahme zu spät kam.

Die Strahlenschutzkommission der früheren Sowjetunion schlug 1987 eine Lebenszeitdosis von 350 mSv als Interventionsgrenze und Umsiedlungskriterium vor (Ilyn 1987). Dieser Wert lag um den Faktor 2 bis 3 unter dem von der Internationalen Strahlenschutzkommission (ICRP) für den gleichen Zweck empfohlenen Wert. Dennoch wurde dieser von der sowjetischen Strahlenschutzkommission vorgeschlagene Wert von internationalen Experten als viel zu hoch kritisiert. Heute ist man jedoch überzeugt, dass zu viele Menschen umgesiedelt wurden und dass diese tief greifende Maßnahme mehr Nachteile als Nutzen brachte. Die Situation wurde durch die zum damaligen Zeitpunkt in der Sowjetunion herrschenden politischen und sozialen Spannungen weiter kompliziert. Selbst 1991 wurden Umsiedlungskriterien immer noch diskutiert und angewendet (z.B. 555 oder 1.480 kBq/m²

bzw. 5 mSv pro Jahr¹). Dies führte zu neuen Umsiedlungen und auch der Rückkehr in die früheren Siedlungen. Man spricht von insgesamt 350.000 Personen, die irgendwann vorübergehend oder definitiv umgesiedelt wurden. Mit der Zeit kehrten freiwillig relativ viele Leute in ihre früheren Häuser zurück, auch wenn diese in einer Sperrzone lagen und dies wurde von den Behörden toleriert. Leben in einer stärker kontaminierten Zone gibt jetzt noch Anrecht auf höhere Subventionen.

Heute werden Gebiete, in denen die Bevölkerung einer unfallbedingten Dosis von unter 1 mSv pro Jahr ausgesetzt ist, zu Gebieten erklärt, die ein normales Leben erlauben. Für Gebiete mit einer Belastung oberhalb 1 mSv pro Jahr gewähren die Behörden weiterhin soziale Vergünstigungen je nach Dosis- oder Kontaminationsgrad². Personen, die weiterhin in stark kontaminierten Gebieten leben, erhalten von der Regierung auch eine Entschädigung und das Angebot jährlicher medizinischer Untersuchungen. Der Konsum von am Ort produzierter Milch sowie von Pilzen ist in manchen dieser Gebiete immer noch eingeschränkt.

Wie im Abschnitt über psychische Auswirkungen in Kapitel 8 ausgeführt, sahen die sowjetischen Behörden nicht voraus, dass ihre Versuche zur Entschädigung der vom Unfall betroffenen Menschen von diesen falsch interpretiert und ihre psychische Belastung verstärken würden. Der Begriff „Radiophobie“, mit dem diese Phänomene von den Behörden beschrieben wurden, war nicht nur inkorrekt, sondern verstärkte sogar die Entfremdung zwischen ihnen und der Öffentlichkeit. Einige dieser Maßnahmen wurden als ungeeignet oder sogar kontraproduktiv erkannt, und die Behörden versuchen jetzt, ihr Verhalten gegenüber der strahlenexponierten Bevölkerung zu korrigieren.

4.2 Außerhalb der ehemaligen Sowjetunion

Die fortschreitende Ausbreitung der Kontamination über große Entfernungen vom Unfallort führte in den europäischen Ländern zu erheblicher Sorge. Die nationalen Behörden reagierten in außerordentlich unterschiedlicher Weise auf diese Situation. Sie befanden sich in einer wenig beneidenswerten Lage. Sie mussten schnell und vorsichtig handeln, um Maßnahmen zum Schutz der „Reinheit“ der öffentlichen Nahrungsmittelversorgung einzuführen, und noch mehr, sie mussten dabei den Eindruck der Effektivität vermitteln. Dies führte zwangsläufig zu einigen Entscheidungen, die selbst schon zum damaligen Zeitpunkt Überreaktionen und wissenschaftlich nicht begründbar zu sein schienen. Zudem behinderten unter-

¹ Diese eigenartigen Werte sind auf die Umrechnung der früher gebräuchlichen Einheit Curie (Ci) in die neue Einheit Becquerel (Bq) zurückzuführen. $555 \text{ kBq/m}^2 = 15 \text{ Ci/km}^2$, $37 \text{ kBq/m}^2 = 1 \text{ Ci/km}^2$

² Zum Vergleich: Der natürliche Untergrund in Europa beträgt ca. 2,4 mSv pro Jahr. Dazu kommt noch im Mittel 1 mSv pro Jahr durch medizinische Anwendungen.

schiedliche Expertenmeinungen rechtzeitige und klare Schutzmaßnahmen der Entscheidungsträger.

Die am weitesten verbreiteten Gegenmaßnahmen waren im Allgemeinen nicht obligatorisch. Dazu gehörte der Rat, frisches Obst und Gemüse vor dem Verzehr zu waschen und Regenwasser nicht als Trinkwasser oder zum Kochen zu verwenden. Tatsächlich hat die Erfahrung gezeigt, dass sogar diese Art Maßnahmen manchmal erhebliche negative psychologische Auswirkungen hatten.

Die Schutzmaßnahmen, die eine stärkere Wirkung auf Ernährungsgewohnheiten hatten und eine relativ bedeutende wirtschaftliche und behördliche Belastung darstellten, umfassten Restriktionen oder das Verbot, Milch, Molkereiprodukte, frisches Blattgemüse und einige Fleischarten in Verkehr zu bringen und zu verzehren, sowie die Kontrolle der Weidehaltung von Milchvieh. In manchen Ländern wurden Reisen in vom Unfall betroffene Gegenden und der Import von Nahrungsmitteln aus der Sowjetunion und osteuropäischen Ländern untersagt.

Die Vielfalt dieser Reaktionen lässt sich in erster Linie dadurch erklären, dass sich die örtlichen Kontaminationsgrade sowie nationale Verwaltungs- und Gesundheitssysteme sehr stark voneinander unterschieden. Einer der Hauptgründe für die unterschiedlichen Situationen in den EU-Mitgliedstaaten ergibt sich jedoch aus den jeweiligen Kriterien für die Wahl und Anwendung von Interventionswerten bei der Umsetzung von Schutzmaßnahmen. Während die Strahlenschutzgrundsätze, die den von den meisten Mitgliedsländern nach dem Unfall ergriffenen Maßnahmen zu Grunde lagen, einander sehr ähnelten, ergaben sich Diskrepanzen bei der Beurteilung der Situation und der Festlegung und Anwendung operativer Schutzkriterien. Diese Diskrepanzen wurden noch durch die überwältigende Rolle verstärkt, die in vielen Fällen nichtradiologische Gesichtspunkte wie sozioökonomische, politische und psychologische Faktoren bei der Festlegung von Gegenmaßnahmen spielten.

Diese Situation verstärkte die in der Öffentlichkeit vorhandene Besorgnis und Verwirrung, führte zu Bestürzung bei den Fachleuten und Schwierigkeiten für die nationalen Behörden, insbesondere im Hinblick auf ihre Glaubwürdigkeit in der Öffentlichkeit. Infolgedessen erkannte man, dass dies ein Bereich war, in dem internationale Harmonisierung erforderlich war.

1986 erließ die EG ein Importverbot für Nahrungsmittel mit mehr als 370 Bq/kg Radiocäsium in Milchprodukten oder mehr als 600 Bq/kg in allen anderen Nahrungsmitteln, dies ungeachtet der bei durchschnittlicher europäischer Ernährung verzehrten Mengen (EC 1986). Dementsprechend wurden Nahrungsmittel mit äußerst

geringem Verzehr, z.B. Gewürze, ebenso behandelt wie Nahrungsmittel mit hohem Verzehr wie Gemüse. Diese Situation wurde aber korrigiert. In einigen Sonderfällen mussten Entscheidungen im Lichte der jeweiligen lokalen Situation getroffen werden. Beispielsweise wurden in manchen nordeuropäischen Gemeinden besondere Gegenmaßnahmen eingeführt wie die Anordnung, Rentiere in Gebieten mit geringerer Ablagerung zu weiden, um die Kontamination des Fleisches zu verringern.

Die Unterschiedlichkeit der Lösungen machte einen internationalen Konsens über abgeleitete Interventionswerte (Derived Intervention Levels) bei Nahrungsmitteln außerordentlich schwierig; erst bei der Codex Alimentarius-Konferenz der WHO/FAO 1989 in Genf konnte eine Einigung über Richtwerte für Radioaktivität in international in Verkehr gebrachten Nahrungsmitteln erzielt werden (CODEX 1989). Man sollte sich vor Augen halten, dass diese Richtwerte erarbeitet wurden, um den internationalen Handel mit Nahrungsmitteln zu erleichtern, und dass sie als Werte „unterhalb der aufsichtlichen Verantwortung“ zu sehen sind. Höhere Werte stellen nicht unbedingt ein Gesundheitsrisiko dar.

Oft konnten die nationalen Behörden die Reaktion der Öffentlichkeit auf ihre Ratschläge und Anordnungen nicht vorhersehen. Beispielsweise wurde der Bevölkerung in manchen westeuropäischen Ländern kurz nach dem Unfall geraten, Blattgemüse sorgfältig zu waschen. Die nationale Behörde war der Ansicht, dies sei ein harmloser Rat, da die meisten Leute ihr Gemüse ohnehin waschen. Sie war völlig unvorbereitet auf die Reaktion der Bevölkerung, diese Gemüsearten erst gar nicht mehr zu kaufen. Für die örtlichen Produzenten führte dies zu erheblichen wirtschaftlichen Verlusten, die eventuelle gesundheitliche Vorteile bei weitem überwogen. In manchen Ländern wurde der Bevölkerung erklärt, die Risiken seien sehr gering, aber gleichzeitig wurden Hinweise gegeben, wie man diese geringen Risiken weiter senken solle. Es war ausgesprochen schwierig, diese anscheinend widersprüchlichen Empfehlungen zu erklären, was den jeweiligen nationalen Behörden die Kritik der Medien einbrachte.

Die NEA veröffentlichte 1987 einen umfassenden Bericht über die Schutzmaßnahmen, die von den Mitgliedsstaaten ergriffen worden waren (NEA 1987). Alle Mitgliedsstaaten hatten die Umweltüberwachung verstärkt, die Öffentlichkeit informiert sowie verschiedene Vorgehensweisen im Hinblick auf Aktivitäten im Freien, Trinkwasser, Milch und Milchprodukte, Gemüse und Fleisch entwickelt.

Zusammenfassung

Der Unfall von Tschernobyl überraschte die Behörden hinsichtlich seines Ausmaßes und seiner Dauer sowie der Kontamination über große Entfernungen. Da für einen solchen Unfall keine Richtlinien vorlagen, es nur wenige Entschei-

dungshilfen gab und großer Druck von Politik und Öffentlichkeit ausgeübt wurde, etwas zu unternehmen, wurden sowohl innerhalb als auch außerhalb der Sowjetunion häufig übervorsichtige Entscheidungen getroffen. Die psychologischen Auswirkungen einiger offizieller Entscheidungen auf die Öffentlichkeit waren nicht vorhersehbar. Unterschiedliche Auslegungen oder gar Fehlinterpretationen von ICRP-Empfehlungen, insbesondere hinsichtlich der Interventionswerte bei Lebensmitteln, führten zu widersprüchlichen Maßnahmen und Ratschlägen. Dies verstärkte die Verwirrung der Öffentlichkeit und führte zu Misstrauen und unnötigen wirtschaftlichen Verlusten. Sehr bald begannen jedoch internationale Bemühungen, die Kriterien und Verfahren der Notfallbeherrschung zu harmonisieren.

5 Auswirkungen auf Umwelt und Landwirtschaft

5.1 Auswirkungen auf die Landwirtschaft

Die Aufnahme von Radionukliden über die Nahrung ist einer der Pfade, die zu interner Kontamination führen und so zur Strahlenbelastung bei Menschen beitragen. Eine extrem starke Kontamination landwirtschaftlicher Flächen hätte zu einer untragbar hohen Radionuklidbelastung der Nahrungsmittel führen können, und Schutzmaßnahmen mussten sofort ergriffen werden, idealerweise sogar noch bevor die Kontaminationswerte gemessen worden und bekannt waren.

5.1.1 Innerhalb der ehemaligen Sowjetunion

Das Sperrgebiet (4.300 km²) umfasst Teile von Belarus, der Ukraine und Russland und schließt eine Kreisfläche mit einem Radius von 30 km ein. Offiziell ist diese Zone unbewohnt, sie wird nicht kultiviert und gilt als verlorenes Land. Zu den kritischen Nukliden dort zählen Cs-137, Sr-90 und auch Pu-239. Die Aufnahme von Plutonium aus dem Erdreich durch Pflanzen stellt jedoch nur ein geringes Gesundheitsrisiko für die Bevölkerung dar, da die Transferraten vom Boden zur Pflanze und von der Pflanze zum Menschen sehr niedrig sind.

Außerhalb dieser Zone sind die kritischen Radionuklide lediglich Cs-137 und Sr-90. Ein Gebiet von ca. 7.000 km² wurde mit Cs-134/137-Werten von mehr als 555 kBq/m² und eine Fläche von etwa 30 km² mit Sr-90-Werten von über 10 kBq/m² kontaminiert.

Die Aufnahme über die Nahrungskette machte etwa 50 % der Gesamtbelastung der Bevölkerung in den betroffenen Gebieten aus und sogar bis zu 70 % in Gegenden mit schlechten Böden. Dies unterstreicht die Bedeutung einer gut ange-

passten Landwirtschaft. Bevor Produkte aus kontaminierten Gebieten auf den Markt kommen, unterliegen sie einer radiologischen Überwachung. Der Verkauf der Produkte gestaltet sich nach wie vor schwierig, auch wenn ihre Kontaminationswerte unter dem offiziellen Grenzwert liegen. Von diesem Problem sind viele Bauern betroffen, die sich häufig von ihren eigenen Produkten ernähren.

Im Rahmen einer deutsch-französischen Vereinbarung und unter Mitarbeit belarussischer, ukrainischer und russischer Fachleute wurde eine Bewertung der getroffenen Gegenmaßnahmen durchgeführt (Deville-Cavelin 2004). Die Umstellung der Agrarbewirtschaftung und die Anwendung von Düngemitteln erwiesen sich als sehr wirkungsvolle landwirtschaftliche Maßnahmen. Zunächst waren Einschränkungen beim Verbrauch die effektivste Gegenmaßnahme, später gewannen die Kartierung der Kontamination und Leitlinien für die Weidehaltung des Viehs, die Herstellung von Silofutter aus Mais anstelle von Heu und die Verarbeitung der Milch usw. an Bedeutung. Die Kontamination der landwirtschaftlichen Produkte wurde so je nach Bodenzusammensetzung und Auswahl der Kulturpflanzen um den Faktor 3 bis 9 verringert. Durch Bodenansäuerung von Grünlandflächen wurde die Cs-137-Kontamination von Gras um den Faktor 4 gesenkt. Vor dem Schlachten wurde nicht kontaminiertes Futter an die Tiere verfüttert. Weideland wurde rationeller genutzt. Das Nettoergebnis dieser Maßnahmen war eine Verringerung der Kontamination von Lebensmitteln um den Faktor 2 bis 15.

Durch Verarbeitung landwirtschaftlicher Nahrungsmittel, z.B. die Verarbeitung von Milch zu Käse, kann die Aktivität von Cs-137 und Sr-90 um den Faktor 50 gesenkt werden. Der Großteil der Aktivität bleibt in der Molke.

Später reduzierte die Bodenbearbeitung die Aufnahme des Radiocäsiums. Die Maßnahmen können Tiefpflügen (Verdünnung im Boden) sowie den Einsatz von Stickstoff- und Kaliumdüngern und von Kalk (Verdünnung des Cs in der Pflanze) einschließen.

Die Cs-137-Aktivität in landwirtschaftlich genutzten Böden sinkt langsam, aber stetig. Zwanzig Jahre nach dem Unfall ist die Strahlenbelastung der Bevölkerung hauptsächlich auf den Verzehr von mit Cs-137 kontaminierten landwirtschaftlichen Lebensmitteln zurückzuführen. Seit Juli 1986 ist in einigen Gebieten die Dosisleistung der externen Bestrahlung um den Faktor 40 gesunken und beträgt an manchen Orten weniger als 1 Prozent ihres ursprünglichen Werts. Dennoch ist das Erdreich immer noch stark mit Cs-137 und Sr-90 kontaminiert. In den meisten stärker kontaminierten Gebieten von Belarus, der Ukraine und Russland unterliegt die Landnutzung immer noch Einschränkungen, deren Aufhebung in naher Zukunft unwahrscheinlich ist. Es ist unklar, ob eine Rückkehr in die 30-km-Zone jemals wieder möglich sein wird und

ob das Land für andere Zwecke wie Hydrokultur-Bewirtschaftung oder als Weideland für Zuchttiere genutzt werden kann. Es sind jedoch einige wenige, meist ältere Anwohner mit inoffizieller Duldung der Behörden in dieses Gebiet zurückgekehrt.

Heute dürfte die Kontamination von Nahrungsmitteln auf einen Wert gesunken sein, bei dem die durchschnittliche Individualdosis 1 mSv pro Jahr nicht überschreitet. Bei der Produktion dieser Nahrungsmittel entstehen vermutlich keine höheren wirtschaftlichen oder sozialen Kosten. Die Menge der landwirtschaftlichen Produkte, die die von der Ukraine, Russland und Belarus festgelegten Grenzwerte für den Handel überschreiten, ist äußerst gering. Das bedeutet, dass 20 Jahre nach dem Unfall Nahrungsmittel ohne große Einschränkungen produziert werden können und das Leben in den Gebieten, in denen die Jahresdosis unter 1 mSv liegt, als „normal“ gilt.

Übersteigt die Jahresdosis 1 mSv, erhalten die Betroffenen, wie bereits gesagt, immer noch soziale Entschädigungen. Anfang 2001 unterlagen in der Ukraine immer noch 2.217 Städte oder Dörfer einer radiologischen Kontrolle. Eigentlich ist eine permanente Kontrolle nur in 1.316 Städten oder Dörfern erforderlich, aber die Einwohner der übrigen 901 Ortschaften lehnen eine Freigabe ihrer Gebiete ab, weil dies das Ende der finanziellen und sozialen Entschädigungen bedeuten könnte (UNDP 2002).

In der Ukraine werden immer noch 84.000 km² Ackerland als mit Cs-137 kontaminiert (über 37 kBq/m²) betrachtet und hauptsächlich mit geeigneten Düngemitteln behandelt. In den meisten Gegenden der kontaminierten Gebiete werden landwirtschaftliche Nahrungsmittel unter Einhaltung der seit 1997 für Milchprodukte, Fleisch, Kartoffeln und Brot geltenden Grenzen produziert. Dennoch bestehen große Unterschiede, und manche Privatbauern produzieren weiterhin Milch, die die vorgeschriebenen Kontaminationswerte überschreitet (Mays 1998).

5.1.2 Andere europäische Länder

In Westeuropa führte Schweden Eingriffswerte für I-131- und Cs-137-Konzentrationen in importierten und heimischen Lebensmitteln ein. Vieh wurde in einigen Gebieten nicht auf die Weide gelassen und es wurde geraten, frisches Blattgemüse nicht zu essen. In Norwegen wurden die Feldfrüchte nach der Ernte gemessen. In Deutschland wurde Milch in Teilen Bayerns zu Milchpulver verarbeitet. In Großbritannien wurde geraten, den Verzehr des schottischen Moorhuhns zu regulieren. Der Transport und das Schlachten von Hochlandschafen aus einigen stärker kontaminierten Gebieten Großbritanniens wurden beschränkt. In Österreich wurde empfohlen, während eines kurzen Zeitraums im Mai 1986 die Kühe nicht mit frischem Gras zu füttern. In einigen Gebieten Großbritanniens bestehen trotz Verbesserungen immer noch Probleme mit Schafen. In einigen skandinavischen Ländern sind wei-

terhin Beschränkungen hinsichtlich des Schlachtens und Verzehrs von Schafen und Rentieren in Kraft.

Die regionalen Durchschnittswerte für Cs-137 in der Ernährung von EU-Bürgern, welche nach der ersten Phase des Unfalls eine Belastungsquelle darstellte, sanken, so dass sie sich Ende 1990 den Werten vor dem Unfall näherten (EC 1994).

Ein Vergleich mit den Cs-137-Ablagerungen aus dem Atombombenfallout ist interessant: Die mittleren nördlichen Breiten, d.h. 40° bis 50° zählten zu den am stärksten belasteten (1,5 bis 5 kBq/m²). Hier war die Verteilung homogener als nach Tschernobyl. In Deutschland, der Schweiz, Österreich und im Norden Italiens lagen die Tschernobyl-Ablagerungen zwischen weniger als 1 bis über 40 kBq/m² mit lokalen Maxima bis zu 70 kBq/m².

5.2 Auswirkungen auf Waldgebiete

Wälder sind sehr vielfältige Ökosysteme. Sie können nicht nur ein Ort für Freizeitaktivitäten, sondern zugleich auch Arbeitsplatz und Nahrungsquelle sein. Wild, Beeren und Pilze dienen vielen Einwohnern der kontaminierten Gebiete in der ehemaligen Sowjetunion als zusätzliche Nahrungsquelle. Holz und Holzprodukte sind eine rentable wirtschaftliche Ressource. Seit dem Reaktorunfall haben viele Familien diese Einkommensquelle verloren.

Der Transfer von Radionukliden auf Wild könnte zu einer unzulässigen Belastung für einige Menschen führen, die in hohem Maße auf Wild als Nahrungsquelle angewiesen sind. Dies wurde in Skandinavien deutlich, wo Elchfleisch kontrolliert werden musste. In anderen Gebieten waren und sind Pilze immer noch stark mit Radiocäsium kontaminiert (≥ 1.000 Bq/kg).

1990 hatten Waldarbeiter in Russland schätzungsweise eine Dosis erhalten, die bis zu dreimal höher war als die anderer in derselben Gegend lebender Personen (IAEO 1994). Außerdem stellte sich heraus, dass manche Holz verarbeitenden Industrien wie die Zellstoffindustrie, die häufig Produkte des Prozesses rezyklieren, ein potentiell strahlenschutzproblem darstellen, weil sich Radionuklide in Laugen, Schlämmen und Asche anreichern. Allerdings könnte Forstnutzung für die Zellstoffproduktion eine tragfähige Strategie für die Dekontaminierung der Wälder darstellen (Holm 1995).

Seit dem Unfall ist deutlich geworden, dass die natürliche Dekontaminierung der Wälder extrem langsam verläuft. Ohne künstliche Eingriffe wird überwiegend die physikalische Zerfallsrate von Cs-137 bestimmen, wie lange noch die Wälder vom Unfall in Tschernobyl betroffen sein werden.

Die wirksamste Schutzmaßnahme in Bezug auf die Waldgebiete der stark kontaminierten Gegenden bestand in der Kontrolle des Zugangs zu Waldarbeit, aber auch in der Einschränkung der Nutzung von Waldprodukten (Holz, Pilze, Beeren, Jagdwild usw.). Maßnahmen, die die Einschränkung öffentlicher Aktivitäten nach sich ziehen, führen zwangsläufig zu einer Störung der normalen gesellschaftlichen Verhaltensmuster.

5.3 Strahlungsbedingte Auswirkungen auf die Umwelt

Eine Umweltreaktion auf den Unfall von Tschernobyl wurde bei Tieren und Pflanzen in der Sperrzone beobachtet: eine erhöhte Mortalität bei Koniferen, Bodenwirbellosen und -säugetieren, chronisches Strahlensyndrom bei Säugetieren und Vögeln. Es wurden keine akuten strahlungsinduzierten Auswirkungen auf Tiere und Pflanzen außerhalb der Sperrzone gemeldet, die während des ersten Monats nach dem Unfall einer Gesamtdosis von weniger als 0,3 Gy ausgesetzt waren.

Weiterhin werden verschiedene auf Strahlung zurückzuführende zytogenetische Anomalien sowohl innerhalb als auch außerhalb der Sperrzone gemeldet, deren biologische Signifikanz jedoch unbekannt ist.

Die Erholung der betroffenen Flora und Fauna in der Sperrzone wurde durch den dominierenden Effekt der Abwesenheit menschlicher Aktivitäten beeinflusst. Viele Tier- und Pflanzenpopulationen haben sich vermehrt, so dass sich die gegenwärtigen Umweltbedingungen positiv auf die Flora und Fauna in der Sperrzone auswirken.

Zusammenfassung

Die Menge der aufgrund des Unfalls in der Umwelt abgelagerten Radionuklide ist mittlerweile gut bekannt. Die Höhe der Bodenkontamination und die entsprechende Bedeutung der Strahlendosen nahm mit zunehmender Entfernung ab, obwohl beispielsweise in den skandinavischen Ländern, in Österreich und in Bayern einige „Hot Spots“ (mit im Vergleich zur näheren Umgebung der Anlage deutlich niedrigerer Kontamination) gemessen wurden, die auf Auswaschung durch starke Regenfälle zurückzuführen sind. Eine Gesamtfläche von 11.000 km² wurde mit Cs-134/137-Werten von mehr als 555 kBq/m² ¹ kontaminiert. In der Ukraine ist hauptsächlich der Wald betroffen. Die im landwirtschaftlichen Bereich ergriffenen Gegenmaßnahmen waren wirkungsvoll. Am wirksamsten waren die Verarbeitung landwirtschaftlicher Nahrungsmittel sowie die Aufarbeitung des Bodens und die Änderung seiner Bewirtschaftung. Heute weist die überwältigende Mehrheit der

¹ Zum Vergleich: Die auf den Atombombenfallout zurückzuführende Kontamination betrug in den mittleren nördlichen Breiten zwischen 1,5 und 5 kBq/m².

landwirtschaftlichen Produkte Kontaminationswerte auf, bei denen die durchschnittliche Individualdosis 1 mSv pro Jahr nicht überschreitet. Auswirkungen auf die Umwelt wurden bei Tieren und Pflanzen in der Sperrzone beobachtet

In den betroffenen Gebieten finden sich zwanzig Jahre nach dem Unfall immer noch Radionuklide in den obersten Bodenschichten, die weiterhin in Pflanzen, insbesondere Pilze, Beeren und forstwirtschaftliche Produkte, übergehen. Die Belastung der Böden nimmt nur langsam ab z.B. durch Transfer in Pflanzen. Die Verringerung der Belastung in den nächsten Jahren wird fast ausschließlich auf die physikalische Halbwertszeit von Cs-137 (30 a) zurückzuführen sein. Die Erholung der betroffenen Flora und Fauna in der Sperrzone wurde durch die Abwesenheit menschlicher Aktivitäten positiv beeinflusst.

6 Schätzung der Strahlenbelastung

Definition der effektiven Dosis auf der Grundlage der Organdosis und typische Dosiswerte

Die Belastung mit ionisierender Strahlung wird in absorbierter Energie pro Masseinheit als absorbierte Dosis gemessen. Die Einheit der **absorbierten Dosis** ist das **Gray** (Gy), d.h. Joule pro Kilogramm (J/kg). Eine vom menschlichen Körper absorbierte Dosis von wenigen Gray kann ein akutes Strahlensyndrom hervorrufen.

Werden viele Organe und Gewebe bestrahlt, ist es üblich, einen zusätzlichen Begriff, nämlich den der **effektiven Dosis**, zu verwenden, der das durch jegliche Kombination von Strahlungsbelastungen hervorgerufene Gesamtgesundheitsrisiko beschreibt. Die effektive Dosis beschreibt die absorbierte Energie, die Art der Strahlung und die Anfälligkeit unterschiedlicher Organe und Gewebe für strahlungsbedingten Krebs oder strahlungsbedingte genetische Schäden. Sie ist außerdem auf externe und interne sowie auf homogene und inhomogene Bestrahlung anwendbar. Die Einheit der effektiven Dosis ist das **Sievert** (Sv). Normale Expositionen werden gewöhnlich in Millisievert (mSv) angegeben. Im Fall einer gleichmäßigen Gamma-Ganzkörperbestrahlung entspricht 1 Sv 1 Gy.

Laut UNSCEAR-Schätzungen beträgt die mittlere jährliche Strahlenexposition aufgrund natürlicher Hintergrundstrahlung, der Menschen weltweit ausgesetzt sind, 2,4 mSv mit einer üblichen Schwankungsbreite zwischen 1 und 10 mSv. Eine Lebenszeitdosis aufgrund natürlicher Strahlung betrage demnach etwa 100-700 mSv. Der Dosisgrenzwert für beruflich strahlenexponierte Personen unter kontrollierten Bedingungen beträgt normal 20 mSv pro Jahr. Die Strahlenexposition von

Menschen kann als gering bezeichnet werden, wenn sie mit der natürlichen Hintergrundstrahlung oder berufsbedingten Strahlendosen vergleichbar ist.

Im Folgenden sind einige Beispiele für typische Dosiswerte zum Vergleich aufgeführt:

mittlere natürliche Strahlenexposition	≈ 2,4 mSv/a
Computertomogramm des Rumpfes	≈ 20 mSv
Röntgenaufnahme der Lendenwirbelsäule	≈ 2 mSv
Szintigramm der Schilddrüse	≈ 1 mSv
Flug Frankfurt – New York – Frankfurt	≈ 0,1 mSv

6.1 Feuerwehrleute und Liquidatoren

Mehr als 100 Betriebsfeuerwehrleute und aus Pripjat herbeigerufene Feuerwehrmannschaften bildeten die Gruppe, die der stärksten Strahlung ausgesetzt war und die meisten Todesfälle erlitt. Die konventionellen Brände auf dem Gelände stellten zwar keine besonderen Brandbekämpfungsprobleme dar, doch waren die Feuerwehrleute sehr hohen Strahlendosen ausgesetzt. Zunächst wurde bei 237 Personen ein akutes Strahlensyndrom diagnostiziert. Später wurde die Diagnose eines akuten Strahlensyndroms unterschiedlicher Schwere bei 134 dieser Patienten bestätigt. Alle diese Personen unterliegen einer medizinischen Langzeitüberwachung, die von spezialisierten Krankenhäusern durchgeführt wird. 28 dieser Patienten starben 1986 an akutem Strahlensyndrom, 11 später an verschiedenen Ursachen (Smith and Beresford 2005).

Die Gammastrahlenexposition war extern und relativ homogen, die Betastrahlung eher lokalisiert. Die Dosen wurden a posteriori geschätzt und reichten von ein paar hundert mSv bis zu mehr als 10 Sv. Die Dosisabschätzung der Liquidatoren ist mit großen Unsicherheiten behaftet, weil teilweise nicht genügend Dosimeter zur Verfügung standen oder weil der Messbereich der Dosimeter überschritten wurde.

Als Liquidatoren wird eine Gruppe von etwa 200.000 bis 600.000 Personen bezeichnet, die in den ersten Jahren nach dem Unfall am Unfallort arbeiteten. Es gibt verschiedene Angaben zur Zahl der Liquidatoren, diese Unterschiede wurden bislang nie vollständig geklärt. Diese Verwirrung ist teilweise auf die Bürokratie in den verschiedenen Republiken der ehemaligen Sowjetunion zurückzuführen. Viele Liquidatoren wurden möglicherweise zweimal gezählt und vielen Personen gelang es, wegen der Ausgleichszahlungen den Status eines Liquidators zu erreichen.

Obgleich zahlreiche Veröffentlichungen vorliegen, bleiben die dosimetrischen Ergebnisse der Aufräumarbeiten unklar. Das System zur Registrierung der

Individualdosen von Soldaten war fest etabliert, und die Gesamtdosen wurden täglich aufgezeichnet. Unglücklicherweise wurde eine erhebliche Anzahl derartiger Aufzeichnungsbücher mit der Begründung „wegen starker radioaktiver Kontamination der Dokumente“ zerstört. Das Zivilpersonal wurde individuell dosimetrisch überwacht. Nachdem Gesamtdosen von 50, 100, 150 und 200 mSv erreicht worden waren, wurden die Personendosimeter durch neue ersetzt. Nachdem ein Arbeiter eine Dosis von 200 mSv erhalten hatte, wurde er aus der Zone abgezogen. Seit dem Unfall sammelte die Ukraine biologische Proben für dosimetrische Zwecke, insbesondere Zähne für eine Elektronenspinresonanz-Dosimetrie des Zahnschmelzes. Daran beteiligen sich 167 regionale medizinische Einrichtungen einschließlich 134 Zahnärzte. Die Untersuchungen werden an 3.875 Liquidatoren durchgeführt (Chumak 2004).

Laut UNSCEAR betrug die durchschnittliche Dosis in den Jahren 1986 bis 1987 etwa 0,1 Sv, wobei zahlreiche Liquidatoren eine Dosis von ungefähr 0,5 Sv erhielten. Aufgrund von externer Kontamination konnte die Hautdosis mehrere hundert mGy erreichen. Die internen Schilddrüsensdosen, die diese Liquidatoren erhalten hatten, wurden nicht gut ausgewertet, sind jedoch geringer als die der externen Exposition.

6.2 Evakuierte Personen

In den ersten Tagen nach dem Unfall wurden etwa 116.000 Personen aus der 30-km-Zone evakuiert. Vor ihrer Evakuierung waren diese Personen externer und interner Bestrahlung ausgesetzt.

Die evakuierten Bevölkerungsgruppen erhielten Gesamtdosen von schätzungsweise etwa 20 mSv, wobei allerdings laut UNSCEAR bei manchen Personen Spitzenwerte bis zu 380 mSv registriert wurden. Die Unsicherheiten waren groß, weil sich der Einfluss von Isotopen mit kurzer Halbwertszeit nur schwer bestimmen ließ (UNSCEAR 2000).

Die interne Exposition dieser Bevölkerungsgruppen wurde auf etwa 10 mSv geschätzt, wobei die Schilddrüse am meisten betroffen war. Bei mehr als 5.000 Einwohnern Pripjats, einer für die Rekonstruktion der Dosis ausreichenden Stichprobengröße, wurde die Jodaktivität in der Schilddrüse gemessen. Die durchschnittlichen Dosiswerte für die Schilddrüse lagen je nach Alter zwischen 0,07 und 1,4 Gy. Je jünger die betroffene Person, umso höher die Dosis. Die maximale Schilddrüsensdosis konnte 50 Gy bei Kindern und Jugendlichen erreichen. Eine Woche nach dem Unfall wurde zur Prophylaxe stabiles Jod verteilt. Diese Gegenmaßnahme kam spät, war aber noch wirksam gegen die fortlaufende Aufnahme von Jod. Die dadurch vermiedene Dosis, die sich andernfalls aus dem Verzehr von Milch ergeben hätte, betrug etwa 30 % (Balonov 2003, Likhtharev 2003).

6.3 In den kontaminierten Gebieten lebende Bevölkerung der ehemaligen Sowjetunion

Bei zwei Dritteln der ländlichen Bevölkerung in den kontaminierten Gebieten der Ukraine liegen die durch Ingestion von mit Cs-134 und Cs-137 kontaminierten Produkten bedingten effektiven Jahresdosen nun unter 1 mSv und beim restlichen Drittel zwischen 1 und 10 mSv. Schätzungsweise erhielten weniger als 1 % der Bevölkerung effektive Gesamtdosen von bis zu 100 mSv. Eine andere Studie führt im selben Gebiet eine Durchschnittsdosis von etwa 0,2 mSv auf Sr-90 zurück, wobei der Höchstwert bei 1,5 mSv liegt. Der größte Teil der erhaltenen Dosen konnte auf den Verzehr kontaminierter Milch zurückgeführt werden (UNSCEAR 2000).

Im Gebiet von Brjansk in Russland betrug die jährliche interne Durchschnittsdosis in den letzten Jahren bei Kindern in den kontaminierten Gebieten etwa 0,2 mSv. Bei 2 % der 26.000 untersuchten Kinder überschreitet sie 1 mSv. Im Gebiet von Gomel in Belarus lagen die in den ersten zehn Jahren angesammelten internen Dosiswerte der Bevölkerung zwischen 20 und 70 mSv, die externen Dosiswerte zwischen 5 und 25 mSv.

Zusammenfassend ist zu sagen, dass Personen, die in den am stärksten kontaminierten Zonen dieser drei Länder lebten, einer Strahlenbelastung ausgesetzt waren, die im Durchschnitt zwei bis drei Mal so hoch war wie die natürliche Hintergrundstrahlung, doch konnten individuelle Spitzenwerte ein bis zwei Größenordnungen höher liegen (z. B. für zu den Selbstversorgern zählende Familien, die in einem „Hot Spot“ leben und sich von ihren eigenen Produkten ernähren). Diese durchschnittlichen effektiven Dosiswerte waren erstaunlich niedrig, die Schilddrüsensdosis lag jedoch viel höher. Der Grund liegt darin, dass die Schilddrüsensdosis nur zu 5 % zur effektiven Dosis beiträgt.

6.4 Bevölkerung in Westeuropa und Übersee

Nach dem Unfall wurden die freigesetzten radioaktiven Stoffe in der Atmosphäre weiter verteilt, und in den meisten Ländern der nördlichen Hemisphäre wurden die wichtigsten flüchtigen Radionuklide, I-131 und Cs-137, nachgewiesen. Häufig war jedoch die Belastung der Bevölkerung viel geringer als in den kontaminierten Gebieten der früheren Sowjetunion; sie entsprach den Ablagerungswerten von Cs-137 und war in den Gebieten höher, in denen es während des Durchzugs der radioaktiven Wolke zu Regenfällen kam.

Während der ersten Wochen trug I-131 über den Verzehr von Milch am meisten zur Strahlenbelastung bei. Schilddrüsensdosiswerte bei Kleinkindern schwankten zwi-

schen 1 und 20 mGy in Europa, zwischen 0,1 und 5 mGy in Asien und lagen in Nordamerika etwa bei 0,1 mGy. Die Schilddrüsensosiswerte bei Erwachsenen lagen etwa um den Faktor fünf niedriger (UNSCEAR 1988).

Im weiteren Verlauf waren dann in erster Linie Cs-134 und Cs-137 durch externe und interne Bestrahlung für die Belastung verantwortlich. In Südosteuropa liegt die berechnete effektive Gesamtdosis bei 1,2 mSv, in Nord- und Mitteleuropa etwas unter 1 mSv und in Westeuropa bei 0,15 mSv.

Die gesamte Ganzkörperdosis, die von Personen während ihrer Lebenszeit voraussichtlich akkumuliert wird, wird auf den dreifachen Wert der im ersten Jahr erhaltenen Dosis geschätzt (UNSCEAR 1988).

Zusammenfassung

Die Strahlendosis der Feuerwehrleute und Liquidatoren, die der ersten Phase ausgesetzt waren, reichte von wenigen hundert mSv bis zu mehr als 10 Sv für einige Feuerwehrleute. Es bleibt unsicher, welche Dosis die an den späteren Aufräumarbeiten beteiligten 200.000 bis 600.000 Liquidatoren erhalten haben, aber die Dosis lag überwiegend zwischen 100 und 500 mSv; ein großer Teil dieser Personengruppe erhielt eine viel niedrigere Dosis. Hinsichtlich ihrer Schilddrüsensosis gibt es nur ungenaue Angaben. Die evakuierten Personen waren schätzungsweise einer durchschnittlichen Dosis von etwa 20 mSv ausgesetzt. Dies ist vergleichbar mit der Dosis, die man bei einer Computertomographie des Rumpfes erhält. Für Bewohner der strikten Kontrollzonen (270.000 Personen, die weiterhin in Gebieten mit einer Cs-137-Ablagerung von über 555 kBq/m² leben) liegt die durchschnittliche Dosis bei 50 mSv. Zwei Drittel der Populationen in den kontaminierten Gebieten (6.400.000 Personen, die in Gebieten mit einer Cs-137-Kontamination über 37 kBq/m² leben) empfangen eine Jahresdosis von weniger als 1 mSv, beim restlichen Drittel lag die Dosis zwischen 1 und 10 mSv. Dies ist mit der natürlichen Hintergrundstrahlung vergleichbar, die weltweit bei einigen mSv pro Jahr liegt.

Für die Bevölkerungen im Westen betrug die berechnete Gesamtdosis 1 mSv in Nordeuropa und 0,15 mSv in Westeuropa. Für zu den Selbstversorgern zählende Familien, die in einem „Hot Spot“ außerhalb der Sowjetunion leben und sich von ihren eigenen Produkten ernähren, konnten die Strahlendosen 20- bis 50fach über dem Durchschnitt liegen. Vorsorgemaßnahmen, wie der Verzicht auf frische Milch für ungefähr zwei Monate, wurden für diese Gruppen empfohlen.

7 Gesundheitliche Auswirkungen

Zwanzig Jahre sind seit dem Reaktorunfall von Tschernobyl vergangen, doch bleibt es schwierig, sich einen Überblick über die gesundheitlichen Auswirkungen zu schaffen. In den betroffenen Regionen von Belarus, der Ukraine und Russland ist die sanitäre Situation prekär und der allgemeine Gesundheitszustand schlecht. Die Lebenserwartung beträgt nicht viel mehr als 60 Jahre. Hauptursachen sind die katastrophale Wirtschaftslage, der Alkoholismus und das Rauchen.

Viele epidemiologische Studien wurden unternommen, um Zusammenhänge zwischen Strahlendosis und diversen gesundheitlichen Auswirkungen zu suchen. Diese Studien lassen oft keine aussagekräftigen Schlussfolgerungen zu, da die Daten unvollständig oder schlecht sind oder Vergleichszahlen fehlen (IAEO 2005c).

7.1 Schilddrüsenerkrankungen

Krebserkrankungen

Es besteht kein Zweifel, dass zwischen der Belastung mit radioaktivem Jod und einem erhöhtem Schilddrüsenkrebsrisiko bei Kindern ein kausaler Zusammenhang besteht. Allerdings existieren Unterschiede zwischen der Ukraine und Belarus hinsichtlich der Altersabhängigkeit der Erkrankungen an Schilddrüsenkrebs. Die Gründe hierfür sind noch nicht voll geklärt (UNDP 2002, WHO 2005).

Experimentelle Studien deuten darauf hin, dass regionaler Jodmangel ein wichtiger Modifikator bei einer strahlungsbedingten Schilddrüsenkrebserkrankung sein kann, weil er nicht nur den Dosiswert, sondern auch die Schilddrüsenfunktion beeinflusst. In Belarus, der Ukraine und Russland wurden bis jetzt insgesamt ungefähr 3.000 Fälle von Schilddrüsenkrebs registriert und behandelt. Neun dieser Menschen starben.

Zurzeit liegen keine Daten aus Tschernobyl zum Schilddrüsenkrebsrisiko nach einer Exposition *in utero* vor.

Bei Erwachsenen bestehen noch erhebliche Unsicherheiten. Zwar wurde ein Anstieg bei Erkrankungen an Schilddrüsenkrebs gemeldet, doch war er nicht dosisabhängig und könnte mit der verstärkten Intensität der Reihenuntersuchungen erklärt werden. Durch Reihenuntersuchungsprogramme wird scheinbar die Inzidenz von Schilddrüsenkrebs erhöht, da der Zeitpunkt der Diagnose von Tumoren vorgezogen wird und so möglicherweise Tumore entdeckt werden, die sich sonst nie klinisch manifestiert hätten.

Außerhalb der ehemaligen Sowjetunion konnte das Auftreten von Schilddrüsenkrebs nicht mit dem Unfall in Tschernobyl in Verbindung gebracht werden.

Nichtkanzeröse Schilddrüsenerkrankungen

Nach einer Exposition durch radioaktives Jod wurde über strahlungsbedingte nichtkanzeröse Schilddrüsenerkrankungen einschließlich benignen Knoten und Hyperthyreose berichtet. Allerdings sind die verfügbaren Informationen widersprüchlich (WHO 2005).

7.2 Leukämie

Kinder

In mehreren epidemiologischen Studien wurde der Zusammenhang zwischen der Strahlenexposition von Kindern unter 15 Jahren und dem Auftreten von Leukämie untersucht. Obwohl die Zahl der Leukämiefälle zwei Jahre nach dem Unfall anstieg, gibt es keine Beweise dafür, dass dieser Anstieg in den am stärksten von dem Reaktorunfall betroffenen Gebieten ausgeprägter war. In der Ukraine, Belarus, Russland, Finnland, Schweden und Griechenland ist eine leicht steigende Tendenz kindlicher Leukämie zu beobachten. Allerdings bestand kein Zusammenhang zwischen dem Ausmaß der Kontamination und dem Anstieg der Fälle (WHO 2005).

Erwachsene

Studien über Leukämie bei Erwachsenen konzentrierten sich überwiegend auf die Liquidatoren. Bei dieser Personengruppe deuteten erste Studien auf eine leichte Zunahme der Leukämieerkrankungen hin; allerdings wurde eine Verdoppelung der Leukämieerkrankungen bei solchen russischen Arbeitern nachgewiesen, die eine Dosis von mehr als 150 mSv erhalten hatten. Ungefähr die Hälfte der 21 bei 70.000 Liquidatoren aufgetretenen Fälle kann statistisch der Strahlung zugeordnet werden.

Es gibt keinen glaubhaften Beweis für eine Zunahme der Leukämieerkrankungen bei erwachsenen Angehörigen der exponierten Populationen in Russland und der Ukraine.

7.3 Solide Karzinome

In neueren Veröffentlichungen kam man zu dem Schluss, dass ein Auftreten strahlungsbedingter solider Karzinome außer Schilddrüsenkrebs bei Arbeitern oder Bewohnern kontaminierter Gebiete bisher nicht zu beobachten war. Allerdings

kann bei Liquidatoren, insbesondere der Gruppe mit der höchsten Belastung, die Möglichkeit einer späteren Zunahme nicht ausgeschlossen werden (WHO 2005).

7.4 Voraussage der Krebsmortalität

Die Frage nach der Zahl der Krebstoten, die auf den Unfall von Tschernobyl zurückzuführen sind oder letztendlich auf ihn zurückgeführt werden können, war für Wissenschaftler, Politiker, die Bevölkerung und die Massenmedien von großem Interesse.

Die Ermittlung der Zahl der strahleninduzierten Krebstodesfälle wird durch die Tatsache erschwert, dass die Strahlung Krebsarten verursacht, die sich auch spontan entwickeln. Eine direkte epidemiologische Beobachtung ist deshalb nur möglich, wenn die Zahl der strahleninduzierten Fälle groß genug ist, um sie von den statistischen Schwankungen der spontan auftretenden Fälle unterscheiden zu können. Dies ist der Fall bei Krebsarten wie Schilddrüsenkrebs und möglicherweise Leukämie, die spontan selten auftreten, aber nicht bei den häufig vorkommenden Arten und daher nicht bei der Gesamtzahl der auf alle Krebsarten zurückzuführenden Todesfälle.

Beim Fehlen direkter Beobachtungen können Abschätzungen auf der Grundlage von absorbierter Dosis und Dosis-Risiko-Beziehungen erfolgen, die hauptsächlich aus der Untersuchung der Überlebenden von Hiroshima und Nagasaki abgeleitet wurden. Auf diese Weise wurde die Zahl der strahlungsbedingten Todesfälle bei russischen Notfall Helfern aufgrund solider Karzinome auf ca. 120 und aufgrund von Leukämie auf ca. 30 geschätzt. Bisher erfolgten die Schätzungen nur bis 1998. Für die allgemeine Bevölkerung gibt es Abschätzungen, die auf gängigen Strahlungsrisikomodellen und der sehr unrealistischen Annahme einer Lebenserwartung von 95 Jahren beruhen (Cardis 1996). Gemäß diesen Abschätzungen könnte eine strahlungsbedingte Zunahme der Gesamtkrebsmortalitäts(erkrankungs)- und -mortalitäts(sterbe)raten über die Spontanwerte hinaus 1 bis 1,5 % in schwach kontaminierten Gebieten und 4 bis 6 % in stark kontaminierten Gebieten betragen. Damit würde sich die Zahl der vorhergesagten strahlungsbedingten Todesfälle bei den Liquidatoren auf ca. 2.000, bei den Evakuierten aus den stark kontaminierten Gebieten auf 1.500 und bei Personen aus den übrigen kontaminierten Gebieten auf ca. 4.600 belaufen. Diese Abschätzung berücksichtigt Unsicherheiten bei der Dosis und bei Risikofaktoren nicht. Eine derartige Zunahme ließe sich nur sehr schwer epidemiologisch nachweisen.

Die angenommene Lebenserwartung spielt eine große Rolle. Es ist bekannt, dass spontane Krebserkrankungen hauptsächlich bei Personen über 60 Jahren auftreten. Aus den Erkenntnissen langfristiger epidemiologischer Studien wissen wir außer-

dem, dass strahlungsbedingte Krebserkrankungen einem multiplikativen Modell folgen, d.h. die Zahl der strahlungsbedingten Krebserkrankungen ist proportional zur Zahl der spontan auftretenden und weist damit denselben Krankheitsverlauf auf. Angesichts dieser beider Überlegungen wäre zu erwarten, dass die Mehrheit der vorhergesagten Krebserkrankungen in den kommenden Jahrzehnten auftritt und alte Leute betrifft. Da die Lebenserwartung bei Männern in den drei Republiken schätzungsweise bei 58,4 bis 66,7 Jahren liegt, werden viele der nach obiger Rechnung erwarteten Fälle in der Realität nicht auftreten.

WHO-Experten gehen in ihren Schätzungen unfallbedingter Todesfälle von einer Zahl von etwa 4.000 aus. Das sind etwa 3 % der in derselben Population vorhergesagten Gesamtzahl von Krebstodesfällen und etwa ein Drittel der durch Rauchen verursachten Todesfälle. Diese Zahl ist weit entfernt von früheren Behauptungen, in denen die Rede von Zehntausenden oder gar Hunderttausenden Toten war (WHO 2005).

7.5 Nichtkrebserkrankungen

Epidemiologische Studien an Überlebenden der Atombombeabwürfe in Japan haben auf dosisabhängige Mortalitätszunahmen bei anderen Erkrankungen als Krebs hingewiesen. Eine kardiovaskuläre Erkrankung ist eine solche Nichtkrebserkrankung. Der Nachweis nichtkanzeröser Auswirkungen von Dosen im Bereich von 0,5 Sv bei Überlebenden der Atombombenabwürfe in Japan sollte das Interesse auf deterministische Effekte und nichtkrebserbedingte Morbidität und Mortalität bei bestimmten Gruppen von Liquidatoren lenken.

Während der letzten zwanzig Jahre wurde eine große Zahl anderer gesundheitlicher Auswirkungen auf den Reaktorunfall von Tschernobyl zurückgeführt: Katarakte (grauer Star), Auswirkungen auf das Immunsystem, Erbschäden, Totgeburten und verschiedene Auswirkungen auf die Gesundheit von Kindern, Auswirkungen auf die mentale und psychische Gesundheit sowie auf das zentrale Nervensystem.

Für die meisten dieser Erkrankungen sind die Ergebnisse wissenschaftlich nicht so exakt wie im Falle der Leukämie- und Schilddrüsenstudien. Mit Ausnahme der Katarakterkrankungen war die Diagnose vieler dieser gesundheitlichen Auswirkungen oft nur ein klinischer Eindruck. Viele Studien verfügen nicht über genügend Kontrollgruppen. Die Originaldaten sind oft nicht verfügbar. Außerdem ist es nicht möglich, wesentliche konkurrierende Faktoren wie Rauchen und Alkoholkonsum auszuschließen. Ebenfalls kann nicht ausgeschlossen werden, dass Stress aufgrund der Strahlenbelastung zu verstärktem Rauchen und Alkoholkonsum führen kann, was wiederum mehr Krebs- und Herz-Kreislauf-Erkrankungen hervorruft (WHO 2005). Außerdem war zusätzlich zum Jodmangel die Ernährungslage

(Qualität der Lebensmittel, Vitamine etc.), die Gesundheit und die medizinische Versorgung (vor allem bei Kindern) in der ehemaligen Sowjetunion generell schlecht, dies könnte ein weiterer konkurrierender Faktor sein.

Augen

Die Studien zeigen deutlich, dass bei Kindern und Liquidatoren ein Zusammenhang zwischen Katarakten (grauer Star) und einer durch den Reaktorunfall verursachten Strahlenbelastung oberhalb eines Schwellenwertes von 250 mGy besteht. Weiterhin herrscht aber Unsicherheit hinsichtlich dieses Schwellenwertes, zumal wenn die hier beobachteten Ergebnisse mit neueren Studien an Astronauten und an Patienten nach CT-Scan verglichen werden.

Kardiovaskuläre Erkrankungen

Kardiovaskuläre Erkrankungen werden bei hohen Strahlendosen, wie sie z.B. bei der Strahlentherapie bei Morbus Hodgkin oder Brustkrebs eingesetzt werden, beobachtet.

Infolgedessen ist davon auszugehen, dass bei Liquidatoren ein höheres Risiko kardiovaskulärer Erkrankungen besteht. In Russland ergab eine groß angelegte Studie an Liquidatoren eine signifikante Zunahme von Todesfällen infolge von Herz-Kreislauf-Erkrankungen. Der Zusammenhang mit einer Strahlenbelastung ist jedoch unklar. Die Daten zu den Auswirkungen einer „chronischen“ (langanhaltenden) Strahlenbelastung bei niedrigen Dosisraten reichen für eine Bewertung dieser Art des Strahlenschadens nicht aus. Über normalerweise vergesellschaftete Herzerkrankungen wie Koronarinsuffizienz und Myokardinfarkt wird nicht berichtet (Mettler 2005). Ein geringer Effekt, der vielleicht durch statistische Schwankungen überdeckt wird, ist nicht auszuschließen; zur Bestätigung einer solchen möglichen Diagnose sind Tierversuche erforderlich. In der Ukraine und in Belarus gibt es keine großen epidemiologischen Studien über kardiovaskuläre Erkrankungen.

Auswirkungen auf Zellen

In einer Reihe von Studien wurde zwar über Auswirkungen auf Zellen berichtet, doch wird die Auswertung durch den möglichen Einfluss von konkurrierenden Faktoren wie Schwermetallen erschwert. Die Ergebnisse dieser Studien sind schwierig zu interpretieren, da bislang unbekannt ist, ob die beobachteten Veränderungen einer bestimmten Krankheit entsprechen (WHO 2005).

Chronisches Erschöpfungssyndrom

Bei einem erheblichen Teil der Liquidatoren - insbesondere bei den Personen, die in den 90er Jahren arbeiteten - entspricht das Krankheitsbild den Kriterien des chronischen Erschöpfungssyndroms. Daraufhin wurde eine nicht bestätigte Hypothese zur Entwicklung dieser Erkrankung unter dem Einfluss ionisierender Strahlung in Verbindung mit psychischem Stress aufgestellt.

7.6 KindergesundheitKleinkindersterblichkeit

Im Rahmen des Projekts „Deutsch-Französische Initiative für Tschernobyl“ wurde die Kleinkindersterblichkeit untersucht. Ziel der Studie war ein Vergleich von Veränderungen der Kleinkindersterblichkeit zwischen den kontaminierten Gebieten der Ukraine (mit Belastungen zwischen 6 und 30 mSv) und nicht kontaminierten Gebieten. Die Ergebnisse zeigen, dass in der Ukraine insgesamt die Kleinkindersterblichkeit vor dem Unfall höher war als danach, und dies gilt sowohl für kontaminierte als auch für nicht kontaminierte Gebiete. Nach dem Unfall wurde nur im am stärksten kontaminierten Gebiet ein statistisch nicht signifikanter Anstieg beobachtet. Es besteht aber kein eindeutiger zeitlicher Trend, der auf Strahlung als direkte Ursache der Kleinkindersterblichkeit hinweisen würde (Dzikovich 2004, WHO 2005).

Auswirkungen pränataler Strahlenexposition auf das Gehirn

Vor kurzem wurde eine Studie über eine Gruppe („Kohorte“) von 154 Kindern veröffentlicht, die zwischen dem 26. April 1986 und dem 26. Februar 1987 von Müttern geboren wurden, die von Pripjat nach Kiew evakuiert worden waren; diese Kinder wurden mit 143 Klassenkameraden aus Kiew verglichen, die als Kontrollgruppe dienten. Die vorgeburtlich bestrahlten Kinder weisen eine signifikant höhere Rate psychischer Störungen und Erkrankungen des Nervensystems auf. Emotionale Störungen und Verhaltensstörungen, d.h. Rückzug in sich selbst, somatische Beschwerden, Angstzustände/Depressionen, soziale Probleme und Konzentrationsstörungen, treten bei den bestrahlten Kindern häufiger auf. Allerdings besteht bei pränatal strahlenbelasteten Kindern kein allgemeiner Zusammenhang zwischen der Verschlechterung des IQ und den Störungen der geistigen Gesundheit und der Strahlendosis (Nyagu 2004, WHO 2005).

Angeborene Fehlbildungen

Die Möglichkeit, dass eine Belastung durch ionisierende Strahlung vor der Zeugung oder in utero das Ergebnis der Schwangerschaft beeinflusst, bleibt Gegenstand öffentlicher Besorgnis und wissenschaftlicher Debatten. In den in Europa durchgeführten epidemiologischen Studien konnten die Auswirkungen einer Strahlenbelastung aufgrund des Reaktorunfalls auf das Auftreten angeborener Fehlbildungen nicht eindeutig nachgewiesen werden.

Im Rahmen einer deutsch-französischen Vereinbarung wurde eine Studie angeborener Fehlbildungen in Belarus durchgeführt. Das belarussische nationale Register angeborener Fehlbildungen, ein vom dortigen Institut für Erbkrankheiten 1979 ins Leben gerufenes populationsbasiertes Überwachungssystem, ist das einzige Register angeborener Fehlbildungen, das es in den drei Republiken schon vor dem Reaktorunfall gab. Neun Erscheinungsbilder angeborener Fehlbildungen einschließlich des Down-Syndroms wurden hinsichtlich ihres Auftretens vor und nach dem Reaktorunfall verglichen. Im Zeitraum von 1983 bis 1999 wurden 12.167 angeborene Fehlbildungen bei Neugeborenen und Fehlgeburten registriert (etwa 30 pro 10.000 Neugeborene, das sind 3 ‰). Die Ergebnisse des Projekts schließen eine Zunahme angeborener Fehlbildungen nicht aus, zumindest nicht in der ersten Zeit nach dem Unfall. Die Zunahme wurde sowohl in wenig als auch in stark kontaminierten Gebieten berichtet. Statistisch gesehen traten in den stark kontaminierten Gebieten weniger angeborene Fehlbildungen auf als in den Gebieten mit geringer Kontamination (Lazjuk 2004).

Bei Kindern, die während der Phase starker Strahlenexposition in Belarus gezeugt wurden, wurde ein Anstieg von Down-Syndromen berichtet. Im Januar 1987 ist ein eindeutiger Höchstwert zu erkennen. Die gleiche Beobachtung wurde allerdings im Mai 1990 nach einem (statistischen) Tiefpunkt einige Monate zuvor gemacht. Unter Berücksichtigung aller Einträge in das belarussische Register seit 1981 wurde allgemein kein Trend beobachtet, der auf einen Anstieg vor oder nach dem Unfall hindeutete. Die beiden beobachteten Höchstwerte sind wahrscheinlich statistische Cluster.

Über angeborene Fehlbildungen und Fehlgeburten gibt es vor allem von außerhalb der ehemaligen Sowjetunion viele Berichte von zweifelhafter Glaubwürdigkeit, deren Bestätigung nur möglich ist, wenn die Originaldaten überprüft werden können. So wie die Dinge liegen, sind viele dieser Behauptungen nicht nachweisbar.

7.7 Gesundheitliche Strahlenschäden in Deutschland

Die durch das Reaktorunglück von Tschernobyl in Deutschland verursachten Strahlendosen waren auch in den am höchsten belasteten Gebieten (v.a. in Bayern) vergleichsweise niedrig und bewegten sich innerhalb der Schwankungsbreite der natürlichen Strahlenexposition. Dennoch gab es in den Jahren nach Tschernobyl mehrere Publikationen, in denen eine Beziehung zwischen auffälligen Untersuchungsergebnissen in Deutschland und der durch Tschernobyl hervorgerufenen ionisierenden Strahlung behauptet oder doch zumindest vermutet worden war. Dies betraf insbesondere Down-Syndrom (Trisomie 21, „Mongolismus“), Säuglingssterblichkeit, Leukämien, Neuroblastome und Lippen-Kiefer-Gaumen-Spalten.

Gegen einen ursächlichen Zusammenhang zwischen der durch Tschernobyl verursachten ionisierenden Strahlung und den genannten Beobachtungen sprechen vor allem negative Befunde aus anderen europäischen Gebieten mit zum Teil deutlich höheren Strahlendosen und die Tatsache, dass bisher keine biologischen Mechanismen gefunden worden sind, die einen solchen ursächlichen Zusammenhang in dem in den Publikationen beschriebenen Ausmaß verständlich machen könnten. Zudem muss man berücksichtigen, dass die wissenschaftliche Qualität einiger Berichte sehr zu wünschen übrig lässt. Auch die Tatsache, dass es keine Hinweise gibt, dass der Strahleneffekt mit der höchsten Wahrscheinlichkeit des Auftretens, kindliche Schilddrüsentumor-Fälle, in Deutschland durch Tschernobyl eine Erhöhung erfahren hat, spricht gegen den vermuteten ursächlichen Zusammenhang.

Zusammenfassung

Viele Studien wurden unternommen, um Zusammenhänge zwischen Strahlendosis und diversen gesundheitlichen Auswirkungen zu suchen. Die möglicherweise schwerwiegenden gesundheitlichen Probleme, die mit diesem Unfall in Zusammenhang gebracht werden können, betreffen sowohl die Bevölkerung, die in oder in der Nähe der Sperrzone lebten oder evakuiert und umgesiedelt wurden als auch viele Arbeiter und Soldaten (Liquidatoren), die bei Notfallmaßnahmen und beim Bau des Sarkophags eingesetzt wurden. Offensichtliche akute Effekte wurden zuerst bei Feuerwehrleuten und bestimmten stark bestrahlten Liquidatoren beobachtet. 134 Patienten wurden behandelt; 28 von ihnen starben 1986, 11 Personen später. Die zweite Gruppe von Personen mit strahlenbedingten gesundheitlichen Auswirkungen ist die Gruppe von ungefähr 3.000 Kindern und Jugendlichen mit Schilddrüsenkrebs; neun dieser Menschen starben. Bei Leukämieerkrankungen sprechen jüngste Studien von einer Verdoppelung der aufgetretenen Fälle zwischen 1986 und 1996 bei russischen Hilfsmannschaften

(11 Fälle), die einer Strahlendosis von mehr als 150 mSv ausgesetzt waren (externe Dosis). Bei Dosen über 250 mSv kann der Unfall von Tschernobyl zu Katarakten (grauer Star) geführt haben. Andere mögliche gesundheitliche Auswirkungen auf die Bevölkerung wie Leukämie oder angeborene Fehlbildungen konnten statistisch nicht mit der Strahlendosis korreliert werden. Eine Studie zu vorgeburtlich strahlenbelasteten Kindern zeigt psychische Störungen und Erkrankungen des Nervensystems auf, die auf die Strahlung oder auf die Stressbelastung der Mütter zurückgeführt werden könnten, die zu der Gruppe der evakuierten und umgesiedelten Personen gehörten.

Allgemein kann gesagt werden, dass die beobachteten gesundheitlichen körperlichen Auswirkungen, die wissenschaftlich mit der Strahlenexposition korreliert werden können, auf die Personen beschränkt sind, die relativ hohen Strahlendosen ausgesetzt waren (Feuerwehrleute, Liquidatoren, Evakuierte und Kinder aus kontaminierten Gebieten).

Die Zahl der Todesfälle, die auf den Unfall von Tschernobyl zurückzuführen sind und sein werden, war für die Öffentlichkeit, die Wissenschaftler, die Massenmedien und die Politiker von großem Interesse. Diese Zahl wurde kürzlich auf ungefähr 4.000 geschätzt. Darin sind die Todesfälle aufgrund von akutem Strahlensyndrom, Schilddrüsenkrebserkrankungen bei Kindern und Krebserkrankungen in der Bevölkerung eingeschlossen.

8 Psychische und gesellschaftliche Auswirkungen

Die Menschen, die in den vom Unfall betroffenen Gebieten leben, leiden unter einer Vielzahl von medizinischen, psychischen und sozialen Problemen. Während dies zweifellos festgestellt werden kann, ist es schwierig zu unterscheiden, zu welchem Teil verschiedene Gründe wie die Strahlung, die Umstände des Unfalls (Evakuierung etc.), der Zusammenbruch der Sowjetunion, die allgemein schlechten Lebensbedingungen in der Region etc. dazu beigetragen haben. Die wichtigsten Probleme sind die Störungen der geistigen Gesundheit.

8.1 Feuerwehrleute und Liquidatoren

Neuropsychiatrische und neuro-psycho-physiologische Nachbeobachtungsstudien bestätigen, dass Patienten mit akuter Strahlenkrankheit, die den Unfall von Tschernobyl überlebten, eine fortschreitende strukturell-funktionelle Hirnschädigung aufweisen. Die apathische Art der organischen Persönlichkeitsstörung ist charakteristisch für die akute Strahlenkrankheit und ihr Schweregrad korreliert mit der

Dosis. Bis jetzt wurde dies bei 62 % der Patienten mit nachgewiesener akuter Strahlenkrankheit beobachtet. Die beobachtete langfristige organische Hirnschädigung bei diesen Patienten wurde mittels verschiedener klinischer Methoden nachgewiesen.

Obwohl Liquidatoren besonders durch den Unfall von Tschernobyl belastet wurden, liegen nach wie vor nur spärliche epidemiologische Daten über psychische Störungen bei ihnen vor. Eine Studie wurde im Rahmen der Deutsch-Französischen Initiative durchgeführt, um bereits erhobene Daten über psychische und psychiatrische Störungen bei ukrainischen Liquidatoren zu validieren und eine Datenbank zu diesem Thema zu aktualisieren. Erste Ergebnisse zeigen eine Verdopplung der Prävalenz aller psychischen Störungen (36 %) bei Liquidatoren im Vergleich zur ukrainischen Allgemeinbevölkerung (20,5 %) sowie einen dramatischen Anstieg der Prävalenz von Depressionen (24,5 %) bei Liquidatoren im Vergleich zur ukrainischen Allgemeinbevölkerung (9,1 %). Angstzustände (Panikstörungen) wurden ebenfalls vermehrt bei den Liquidatoren nachgewiesen (12,6 % im Vergleich zu 7,1 %). Gleichzeitig wurde jedoch kein dramatischer Anstieg in der Alkoholabhängigkeit bei Liquidatoren festgestellt (8,6 % im Vergleich zu 6,4 %) (Romanenko 2004). Allerdings stellte eine Studie mit 103 Liquidatoren in Belarus keine vermehrten psychischen Beschwerden oder psychiatrischen Erkrankungen fest.

Während der letzten zwanzig Jahre treten im Arbeits- und Alltagsleben in der Sperrzone von Tschernobyl Zeichen für eine Verschlechterung der geistigen Gesundheit der dort wohnenden Arbeiter auf. Diese Verschlechterung liegt um den Faktor 3,4 bis 6,2 höher als in der Allgemeinbevölkerung und um den Faktor 2 bis 3,9 höher als bei den Überlebenden militärischer Konflikte und von Naturkatastrophen. Seit 1990 beweist der Anstieg von Schizophrenie bei den Arbeitern im Vergleich zur Allgemeinbevölkerung, dass die Menschen in der Sperrzone von Tschernobyl ein um den Faktor 2,4 bis 3,4 höheres Schizophrenierisiko aufweisen. Diese erhöhten Erkrankungsraten stützen die Hypothese, dass ionisierende Strahlung eine Prädisposition zur Schizophrenie aktivieren oder tatsächlich schizophrenieartige Störungen verursachen kann.

8.2 Bewohner der kontaminierten Gebiete

Eine in der Region Gomel (Belarus) durchgeführte epidemiologische Studie zeigt, dass 64,8 % der Populationsstichprobe überdurchschnittlich stark an psychischen Beschwerden leiden. Bei 35,8 % wurde eine psychiatrische Störung beobachtet, wobei die Raten von affektiven Störungen und Angststörungen besonders hoch waren. Bei Menschen, die aus der Sperrzone von Tschernobyl evakuiert worden

waren, und bei Müttern mit Kindern unter 18 Jahren wurde eine höhere Prävalenz psychischer Gesundheitsprobleme festgestellt.

Es bestand kein Unterschied in den verbalen Fähigkeiten bei zwei Gruppen von Müttern – der Strahlung ausgesetzten Müttern und nicht belasteten Müttern (Kontrollgruppe). Es wurde jedoch gezeigt, dass strahlenexponierte Mütter einen höheren Stresspegel und eine höhere Zahl von Depressionen, somatischen Störungen, Angstzuständen /Schlaflosigkeit und sozialer Dysfunktion aufwiesen als die Kontrollgruppe aus Kiew. Es bestehen statistisch signifikante Beziehungen zwischen der geistigen Gesundheit der Mütter und den neuropsychiatrischen Störungen ihrer Kinder.

Stress nach dem Unfall hat das Verhältnis der Bevölkerung zur eigenen Gesundheit wesentlich verändert. Bei der geringsten Unpässlichkeit geht man zum Arzt. Die Ärzte sind wichtige Multiplikatoren: je mehr Gewicht der Arzt dem Unfall und dem Strahlenrisiko beimisst, umso ängstlicher sind seine Patienten (Havenaar 1996). Ein Aufklärungsprogramm für Ärzte über das Strahlungsrisiko und Psychologie wäre sehr hilfreich.

Studien haben gezeigt, dass mit dem Reaktorunfall in Tschernobyl in Zusammenhang stehende psychische Probleme sich im Laufe der Zeit nicht verringern (Rumyantseva 1996, UNDP 2002, Romanenko 2004, Havenaar 2003).

8.3 Auswirkungen der Reaktionen der Behörden in der ehemaligen Sowjetunion

Einer der Faktoren, der zu den psychischen Auswirkungen beigetragen hat, waren ungeeignete Aktionen der Behörden. Der Mangel an Information in den ersten Jahren hat das Vertrauen der betroffenen Menschen in hohem Maße geschwächt und ihre Ängste geschürt.

Die Wahrnehmung der Menschen bestand in dem Gefühl, von einer unsichtbaren Gefahr umgeben zu sein. Sie waren unsicher, welche Folgen der Unfall für ihre Gesundheit und die ihrer Kinder haben würde. Dazu trug bei, dass die Bevölkerung oft über lange Zeit keine Informationen speziell über die örtliche Situation erhielt und dass die Erklärungen der Wissenschaftler manchmal widersprüchlich waren. Die Leute entwickelten eine eigene Risikowahrnehmung und ein Misstrauen gegenüber öffentlichen Verlautbarungen. Die Ankunft ausländischer Experten verbesserte die Situation nicht, weil die Bevölkerung sie nur zu oft mit den dortigen Behörden assoziierte, denn die ausländischen Fachleute wurden von behördlichen Experten begleitet.

Eine andere ungeeignete Maßnahme der Behörden war die Gewährung von Entschädigungen oder „Privilegien“ für Strahlenopfer, um so zu versuchen, die

sozialen Auswirkungen des Unfalls zu mildern. In Belarus wurden 1991 im Rahmen eines Gesetzes 2,1 Millionen Einwohnern der kontaminierten Gebiete ähnliche soziale Vergünstigungen gewährt wie den Liquidatoren. In der Ukraine genießen 3,1 Millionen Menschen ähnliche Rechte, und heute gibt es in der Ukraine „Ausweise“ für Liquidatoren, die ihnen das Recht auf Sonderbehandlung in Krankenhäusern und staatlichen Organisationen sichern. Diese gut gemeinten Maßnahmen verzerrten unglücklicherweise die Wahrnehmung des Risikos und führten zu Sekundärreaktionen im psychischen Bereich.

Diese Subventionen und Privilegien (7 Millionen Menschen sind anspruchsberechtigt) unterstützen das Gefühl „Ich bin ein Opfer“ und behindern die Entwicklung von Eigeninitiative. Eine Kultur der Abhängigkeit hat sich entwickelt. Experten der UNDP zufolge sind viele dieser Menschen apathisch und fatalistisch geworden, was ihre Fähigkeit, ihre Zukunft selbst in die Hand zu nehmen, behindert. Eine derartige Situation ist eine soziale und wirtschaftliche Katastrophe; und sie dauert weiter an (UNDP 2002). Allerdings scheint es offensichtlich zu sein, dass es nicht möglich ist, die beobachteten Stresssituationen, die zu psychologischen Auswirkungen führen, nur auf eine Ursache zurückzuführen.

Die Ermittlung der Gesamtzahl der Liquidatoren hat sich als sehr schwierig erwiesen. Viele kamen aus verschiedenen Republiken der ehemaligen Sowjetunion und kehrten dorthin zurück. Später erklärten sich einige zu Liquidatoren, um Ausgleichszahlungen zu bekommen. Andere allerdings wollten wegen der Auswirkungen auf ihr unmittelbares soziales Umfeld nicht als Liquidatoren identifiziert werden.

8.4 Verbesserungen

Ein unter der Schirmherrschaft der Europäischen Gemeinschaft (ETHOS-Projekt) durchgeführter Versuch sollte als Beispiel für die positiven Maßnahmen zur Senkung des Stresspegels erwähnt werden (Lochard 1999). Hierbei ging es um die nachhaltige Wiederherstellung der Lebensbedingungen für Einwohner kontaminierter Gebiete. Französische Experten führten einen ständigen Dialog mit Dorfbewohnern und örtlichen Behörden über den Umgang mit kontaminierten Nahrungsmitteln und darüber, wie man diese Kontamination durch einfache Maßnahmen verringern kann. Sie beteiligten sich nicht aktiv an den Maßnahmen der Dorfbewohner, sondern spielten nur eine beratende Rolle und boten ihren Rat an, wo es nötig war. Dieser Versuch zeigte, dass der Stresspegel abgebaut und das Vertrauen erhöht wird, indem man das Wissen über das Strahlenrisiko vertieft und die betroffenen Menschen im Umgang damit berät, ohne dabei die nationalen Behörden zu übergehen. Entsprechend wurde der Stresspegel auch durch das Ausmaß gesenkt, in dem Menschen die Möglichkeit sahen, die erhaltene Dosis

steuern zu können. Diese Erfahrung zeigt klar, dass das Gefühl geringen Vertrauens in die eigene Fähigkeit, ihre Situation zu verbessern, umgekehrt werden kann, vorausgesetzt, es werden die richtigen Maßnahmen durchgeführt. Das Projekt trägt so auch dazu bei, das Vertrauen in Fachleute und Behörden wiederherzustellen.

Ebenso zu erwähnen sind die von den westlichen Ländern geförderten Schüleraustauschprogramme zwischen belarussischen und westeuropäischen Schulen als Maßnahmen, die nennenswert zur Verbesserung des Alltagslebens beigetragen haben. Allerdings reicht die Zahl dieser Programme nicht aus; es sollten noch mehr durchgeführt werden. Das Paradoxe an derartigen Programmen ist, dass sie nicht nur das Leben in den betroffenen Ländern, verbessern, sondern auch das Verständnis der wahren mit den Auswirkungen dieses Unfalls verbundenen Risiken auf Seiten westlicher Eltern vertiefen (Avrault 2005).

Zusammenfassung

Nach 20 Jahren ist das Trauma des Unfalls von Tschernobyl bei einer Bevölkerung von 7 Millionen Menschen, die in der Nähe der Sperrzone leben, immer noch greifbar. Die Angst vor möglichen Spätfolgen der Strahlung wirkt paralyisierend und verursacht Stress. Vorliegende Studien haben gezeigt, dass mit dem Reaktorunfall in Tschernobyl in Zusammenhang stehende psychische Probleme sich im Laufe der Zeit nicht verringerten. Bei einem erheblichen Teil der Liquidatoren wurde ein chronisches Erschöpfungssyndrom beobachtet, das durch Strahlendosen in Verbindung mit psychologischer Belastung bedingt sein könnte. Unter den Bewohnern der stark kontaminierten Gebiete gibt es eine signifikante Zunahme verschiedener psychiatrischer Störungen. Durch die psychische Belastung nach dem Unfall veränderte sich die Einstellung der Bevölkerung zur eigenen Gesundheit ganz erheblich. Die Ärzte sind wichtige Multiplikatoren; die Wahrnehmung des Strahlenrisikos durch die Ärzte ist von Bedeutung, da sie ihre Beziehungen zu den Patienten beeinflusst. Ein Aufklärungsprogramm für Ärzte wäre sehr hilfreich. Auch hat das System der staatlichen Ausgleichszahlungen und Privilegien, das immer noch in Kraft ist, vielen nicht betroffenen Menschen die Botschaft vermittelt, dass sie Opfer sind und einen Zustand von Apathie verursacht. Das Gesamtergebnis ist ein generelles Misstrauen. Gegenwärtig ist Tschernobyl immer noch eine psychologische, soziale und ökonomische Katastrophe. Allerdings wurde die psychische Belastung einiger Bevölkerungsgruppen durch positive Maßnahmen gemildert. Zu diesen Maßnahmen gehörten das ETHOS-Programm für nachhaltige Wiederbelebung und auch ein Schüleraustausch.

9 Potentiell verbleibende Risiken

9.1 Sarkophag

1986 ordneten die russischen Behörden an, innerhalb weniger Monate einen Sarkophag zu bauen, um so die Ausbreitung radioaktiver Materialien zu verringern, das Eindringen von Regenwasser zu verhindern und Block 3 nutzen zu können, der allerdings inzwischen definitiv stillgelegt wurde. Der Sarkophag wurde auf nicht vollständig zerstörten Teilen des Blocks 4 errichtet; die Wandstärke beträgt bis zu 20 m, so z.B. im untersten Bereich der nördlichen Seite. Das Dach besteht aus Rohren und Stahlplatten. Es enthält offene Stellen, seine Standsicherheit ist zweifelhaft.

Der größte Teil der 190 Tonnen Reaktorabfall befindet sich immer noch im Sarkophag. Die Lavoberfläche hat inzwischen Umgebungstemperatur erreicht. Der untere Bereich, in dem sich eingedrungenes Regenwasser befindet, wird in regelmäßigen Abständen ausgepumpt.

Zurzeit gibt es hauptsächlich zwei Risiken: das erste ist das Risiko der Kritikalität, das nicht völlig ausgeschlossen werden kann, jedoch höchst unwahrscheinlich ist; das zweite Risiko betrifft die Freisetzung radioaktiver Stäube in die Atmosphäre als Folge der Zersetzung der Lava.

Die Ukrainer schätzen die Gesamtmasse des radioaktiven Staubs im Sarkophag auf etwa dreißig Tonnen. 50 % der Radioaktivität stammen derzeit von Sr-90, die anderen 50 % von Cs-137. Es ist plausibel anzunehmen, dass durch den Einsturz des Sarkophags ein Teil dieser Staubmasse fein verteilt würde. Tatsächlich ist das Wetter in diesem Gebiet von starken Regenfällen und heftigen Stürmen geprägt, die das Bauwerk schwächen können. Selbst wenn das Risiko nicht sehr hoch ist, muss es dennoch für die immer noch vor Ort tätigen Mannschaften in Betracht gezogen werden. Laut den von der Europäischen Kommission und von der EBRD finanzierten Studien schätzt man, dass im Falle eines Einsturzes 5 bis 10 Tonnen des ein Prozent Kernbrennstoff (50 bis 100 kg) enthaltenden Staubs in der Luft zu Schwebstaub würden. Dadurch würden 50 bis 100 TBq Cs-137 und 40 bis 80 TBq Sr-90 freigesetzt. In diesem fein verteilten Staub wären auch 0,65 bis 1,3 TBq Plutonium und 0,5 bis 1 TBq Am-241 enthalten (Nemchinov 2004, Borovoy 2004a, Borovoy 2004b).

Diese Studie zeigt, dass die Staubwolke bis zu 100 m in die Luft steigen und eine erneute Kontamination verursachen würde. Das radiologische Risiko ist jedoch nur für die Menschen eine Bedrohung, die sich innerhalb eines Bereichs von 200 bis 300 m um den Sarkophag und bis zu 2 km in Windrichtung aufhalten. Sie könnten effektiven Dosen von schätzungsweise 20 - 50 mSv ausgesetzt sein. Außerhalb der 30-km-Zone würde die Dosis 1 mSv nicht überschreiten.

Letztlich kommen die verschiedenen von Deutschen, Russen, Ukrainern und Weißrussen durchgeführten Studien alle zu dem Schluss, dass das Risiko eines Sarkophageinsturzes nicht sehr hoch ist und das zusätzliche Strahlenrisiko außerhalb der Sperrzone sehr niedrig bleiben würde. Sie alle schlagen jedoch vor, dass Maßnahmen zur Konsolidierung des Sarkophags fortgesetzt werden sollten und empfehlen die Beibehaltung der 30 km-Sperrzone.

Die Ukraine stimmte 1997 einem "Shelter Implementation Plan" (SIP) zu, einem von westlichen und ukrainischen Experten entwickelten Programm, Block 4 und den Sarkophag in einen im Hinblick auf die Umwelt stabilen Zustand zu überführen. Der „Chernobyl Shelter“-Fonds, der von der EBRD verwaltet wird, wurde gegründet, um die Umsetzung des SIP zu finanzieren. Die internationale Gemeinschaft (G7, EU, Ukraine und andere) hat bislang 650 Mio. € beigetragen, Zusagen und Zinsen belaufen sich auf weitere 200 Mio. €. Die wichtigeren Projekte im Rahmen des SIP, wie Stabilisierungsmaßnahmen, um das Einsturzrisiko des Sarkophags zu verringern, ein integriertes System zur Überwachung der Standsicherheit, der Strahlenwerte und der seismischen Aktivität etc. und auch notwendige Infrastrukturprojekte sind weit fortgeschritten oder bereits abgeschlossen. Das Ausschreibungsverfahren für das Hauptprojekt, die Planung und den Bau eines neuen sicheren Einschusses für den bestehenden Sarkophag, steht kurz vor dem Abschluss. Der neue sichere Einschuss, der den Zutritt von Wasser verhindert, Staub einschließt und für künftige Rückbauarbeiten die erforderlichen Einrichtungen und eine sichere Arbeitsumgebung zu Verfügung stellen soll, ist auf eine Lebensdauer von 100 Jahren ausgelegt. Das Programm beinhaltet außerdem Unterstützung beim Projektmanagement, die von einem Konsortium aus drei westlichen Firmen (Bechtel, Edf, Batelle) sichergestellt wird, sowie die Unterstützung der Behörde bei der Genehmigung (Riskaudit, Sciencetech). Die Kosten des ganzen Programms, das bis 2010 abgeschlossen werden soll, werden derzeit auf 1,1 Milliarden \$ geschätzt.

9.2 Grundwasser

Der Oberflächenabfluss von verseuchtem Boden nach Regen- oder Schneefällen ist einer der wesentlichen für die Kontamination von Gewässern verantwortlichen Prozesse. Die nach dem Reaktorunfall in Tschernobyl kontaminierte große Landfläche ist eine ständige Quelle der Radionuklidverseuchung von natürlichen Gewässern und aquatischen Ökosystemen (NEA 2002, IAEA 2005).

In der Ukraine ist eine Kontamination durch Flusswasser immer noch ein erhebliches Problem, insbesondere bei Überflutungen, da die meisten Flüsse nach Süden fließen. Die Städte Kiew, Kremenschug und Kachowka werden zum Teil vom Dnepr versorgt. Wenige Wochen nach dem Unfall waren Cs-137 und Sr-90 die einzigen Radionuklide

mit einem signifikanten Wert im Wasser. Seit 1998 ist Sr-90 das Radioelement mit dem höchsten Messwert. Die durchschnittliche Jahresaktivität von Cs-137 im Wasser des Flusses Pripjat und des Sees, der als Wasserreservoir für die oben genannten Städte dient, hat sich bei etwa 0,1 bis 0,2 Bq/l stabilisiert und ist nur zehnmal so hoch wie die Messwerte vor dem Unfall (IAEO 2005b).

Das Verhalten abgelagerter Radionuklide in der Umwelt hängt von ihren physikalischen und chemischen Eigenschaften und der Art des Fallouts - trocken oder nass - der Form und Größe der Partikel und der Umwelt selbst ab. So haben Partikel, die durch Umwandlung von Gas in Partikel infolge von chemischen Reaktionen, Kernbildung und Kondensation sowie durch Koagulation (Ausflockung) gebildet wurden, eine große spezifische Oberfläche und sind im Allgemeinen löslicher als durch Explosionen gebildete Partikel wie etwa große Brennstoffteilchen, die infolge mechanischer Vorgänge wie Brennstoffexplosionen gebildet wurden.

Cs-137, das in einer schwer löslichen Form vorliegt, wird von Oberflächengewässern überwiegend nicht aus dem Erdreich ausgewaschen. Der größte Teil - 90 bis 95 % - des durch Oberflächengewässer dem Fluss Pripjat zugeführten Cs-137 stammt aus der 30-km-Zone. Aufgrund der Absorbierbarkeit von Cs-137 erreichen jedoch nur 1 bis 5 % der ursprünglichen Aktivität das Schwarze Meer. Der Rest reichert sich in den Sedimenten der verschiedenen Stauseen des Dnepr an, wobei über die Hälfte im Stausee von Kiew verbleibt.

Hydrogeologische Untersuchungen der Kontamination von Grundwasser in der Sperrzone zeigen, dass Sr-90 hier das kritischste Radionuklid ist, das während der nächsten 100 Jahre das Trinkwasser über die gegenwärtig akzeptablen Grenzwerte hinaus kontaminieren könnte, da es schneller als Cäsium in tiefere Bodenschichten eingedrungen ist. In einer europäischen Studie wird vorgeschlagen, in den kommenden Jahren die Migration von Sr-90 in Wasser zu untersuchen. Dazu wurde in jedem der drei Länder ein Gewässer ausgewählt, und zwar das Dnepr-Staubecken in der Ukraine, der Svyatskoye-See in Belarus und der Khozanovskoye-See in Russland.

Schließlich fürchten die Experten auch eine Kontamination des Grundwassers in der 30-km-Zone durch Am-241, ein Zerfallsprodukt von Plutonium. Da dieses Radionuklid schneller als Plutonium in tiefere Erdschichten vordringt (Smith and Beresford, 2005), ist dieses Problem sehr langfristig zu überwachen. Im Verlauf von Sanierungsarbeiten fielen große Mengen radioaktiven Abfalls an, die in vorläufigen oberflächennahen Lagern und improvisierten Entsorgungseinrichtungen eingelagert wurden. In der Sperrzone wurden zwischen 1986 und 1988 Gräben und Deponien in 0,5 bis 15 km Entfernung vom Reaktor angelegt. Diese Einrichtungen (ungefähr 800) wurden ohne die erforderliche Auslegung und ohne eingebaute Barrieren errichtet (IAEO 1997). Da sie nicht dokumentiert wurden, gehen die Infor-

mationen über ihre Lage verloren. Sie tragen auch zur Kontamination des Grundwassers bei.

Zusammenfassung

Eines der verbliebenen Risiken ist der mögliche Einsturz des Sarkophags. Die Wahrscheinlichkeit dafür ist nicht sehr hoch, auch seine radiologischen Auswirkungen außerhalb der Sperrzone würden gering bleiben. In einem internationalen Projekt wird der Bau einer neuen sicheren Umhüllung über dem zerstörten Reaktor von Tschernobyl geplant. Das zweite Risiko könnte die zukünftige Kontamination natürlicher Gewässer und aquatischer Ökosysteme sein durch die Austragung von Cs-137 und Sr-90 von den kontaminierten Böden und von den vielen improvisierten Abfalldeponien in der Sperrzone.

10 Lehren aus dem Unfall

Nur wenige Personen waren, wie bereits erwähnt, auf eine Situation solchen Ausmaßes vorbereitet. Die ersten westlichen Experten, die die Situation begutachteten, haben inzwischen erkannt, dass das sowjetische technische Management trotz einiger Fehler nicht so schlecht war, wahrscheinlich wegen der Erfahrung, die bei einem ähnlichen Unfall (in Kischtim) gewonnen wurde, der sich 1957 ereignete und geheim gehalten wurde.

In Westeuropa waren die Reaktionen sehr unterschiedlich und unkoordiniert, was zur Verwirrung der Öffentlichkeit führte. Ein Vergleich von Fernsehsendungen in der Schweiz, in Frankreich, Deutschland oder Italien zum Beispiel veranschaulichte die Vielfalt der offiziellen Reaktionen. Schnelle Abstimmung war unbedingt erforderlich. Schon bald zeigte sich eine der eindrucksvolleren Lehren aus dem Unfall: eine Änderung der Haltung der Regierungen gegenüber technischen Katastrophen. Dies schloss die Empfehlung gemeinsamen Handelns im internationalen Rahmen, die Annahme der Möglichkeit eines schwerwiegenden Unfalls und den Beginn von grenzüberschreitenden Notfallübungen ein. Die Notwendigkeit, ein schnelles grenzüberschreitendes Kommunikationssystem zu entwickeln, war offensichtlich.

Angesichts des grenzüberschreitenden Charakters der Kontamination sahen sich die internationalen Organisationen veranlasst, internationale Zusammenarbeit und Kommunikation zur Abstimmung von Maßnahmen zu fördern (Boeri 1988, ICRP 1991, ICRP 1992, NEA 1993, NEA 1989, NEA 1990, WHO 1987, WHO 1988, IAA 1987, IAEA 1989, IAEA 1991, IAEA 1992, IAEA 1994, EC 1989a, EC 1989b). Ferner wurden internationale Notfallübungen wie die der OECD/NEA im Rahmen ihres INEX-Programms (NEA 1995) entwickelt.

Eine wesentliche Leistung der internationalen Gemeinschaft bestand in den Übereinkommen über frühzeitige Benachrichtigung im Falle eines radiologischen Unfalls und über Hilfe bei radiologischen Notstandssituationen (EC 1987, IAEA 1986c, IAEA 1986d). Auf der Grundlage dieser beiden Übereinkommen führte die Internationale Atomenergie-Organisation (IAEO) ein System zur Benachrichtigung und zum Informationsaustausch im Falle einer nuklearen oder radiologischen Notstandssituation sowie ein Netzwerk zur Hilfeleistung ein, das betroffenen Ländern bei Bedarf zur Verfügung steht. In der Entscheidung des Rates 87/600/EURATOM vom 14. Dezember 1987 wurden Gemeinschaftsvereinbarungen für den beschleunigten Informationsaustausch im Fall einer radiologischen Notstandssituation festgelegt. Auf der Grundlage dieser Ratsentscheidung führte die Europäische Kommission das System der Europäischen Gemeinschaft für den beschleunigten Informationsaustausch bei einer radiologischen Notstandssituation (European Community Urgent Radiological Information System - ECURIE) ein, in dessen Rahmen die EU-Mitgliedstaaten gehalten sind, die Kommission über radiologische Notstandssituationen in Kenntnis zu setzen und umgehend die verfügbaren einschlägigen Informationen zu liefern, um die voraussichtlichen radiologischen Folgen möglichst gering zu halten. Bei diesem System geht es um Kommunikation, Information und Datenaustausch im Falle einer nuklearen oder radiologischen Notstandssituation.

Um die Information der Öffentlichkeit über den Schweregrad nuklearer Unfälle zu vereinfachen, haben IAEA und NEA die Internationale Bewertungsskala für bedeutende Ereignisse in kerntechnischen Einrichtungen (International Nuclear Event Scale – INES) entwickelt, die gegenwärtig von zahlreichen Ländern angewandt wird.

Die Abschätzung der internen Dosen bereitete ebenfalls Probleme. 1986 verwendete die ICRP nur Dosiskoeffizienten (interne Dosis pro Aufnahmeeinheit, z.B. ausgedrückt in mSv/kBq), die für erwachsene Arbeiter gültig sind. Glücklicherweise hatten einige Strahlenschutzorganisationen das Problem schon vorausgesehen und altersbezogene Dosiskoeffizienten vorgeschlagen. Allerdings hatten nur Spezialisten Zugriff auf die einschlägigen Informationen. Die internationalen Empfehlungen mussten verbessert und klarer formuliert werden, und im August 1986 veröffentlichte die ICRP eine Reihe von Berechnungen altersbezogener Dosiskoeffizienten für Populationen. Die in der ICRP-Veröffentlichung 40 festgelegten Empfehlungen für das Eingreifen bei einem Unfall waren zunächst, als sie angewendet werden sollten, nicht klar verständlich und wurden daher von der Kommission in der Veröffentlichung 63 überarbeitet.

Eine weitere Lehre aus dem Reaktorunfall schlug sich in einer tief greifenden Änderung der öffentlichen Meinung zum Risikomanagement in der Industrie nieder. Zu dieser Änderung war es nach dem Unfall in Bhopal nicht gekommen. Erst nach dem

Reaktorunfall in Tschernobyl begriff man, dass die Öffentlichkeit in Entscheidungen mit einbezogen werden wollte (Beteiligung von Interessenträgern und Betroffenen); diese Entwicklung ist seither fest etabliert.

Um zum ersten Mal in internationalem Rahmen die grenzüberschreitenden Aspekte nuklearer Unfälle zu untersuchen, leitete die NEA die Vorbereitung und Durchführung der ersten internationalen nuklearen Notfallübung INEX 1 ein, die 1993 stattfand. Bei dieser Sandkastenübung konnte die internationale Gemeinschaft zum ersten Mal die bestehenden Verfahren und Mechanismen zur Beherrschung einer nuklearen oder radiologischen Notstandssituation testen, was zu einer Fülle von Erkenntnissen und zu einer Verbesserung der nuklearen Notfallmaßnahmen führte. Bei entsprechenden Workshops konnten Erfahrungen mit der Umsetzung kurzfristiger Gegenmaßnahmen nach einem Nuklearunfall, mit den landwirtschaftlichen Aspekten nuklearer und/oder radiologischer Notstandssituationen einschließlich der Verteilung von Jodtabletten als prophylaktischer Maßnahme sowie mit der Datenverwaltung bei einem nuklearen Notfall ausgetauscht werden. Dieser ersten Serie von Übungen folgten zwei weitere.

Letztendlich hatte sich niemand vorstellen können, dass eine Industriekatastrophe derartigen Ausmaßes die Bevölkerung in der Umgebung destabilisieren könnte. Über die direkte Wirkung der Strahlung und die ergriffenen Gegenmaßnahmen hinaus ist die übertriebene Angst vor der Strahlungswirkung ein wesentlicher Beitrag zur sozialen Destabilisierung in den betroffenen Gebieten der ehemaligen Sowjetunion. Auch wenn im sonstigen Europa keine tatsächliche Gefahr bestand, gab es auch hier große Besorgnis.

Der Unfall hatte auch bedeutende Folgen auf dem Gebiet der Reaktorsicherheit. An den RBMK-Reaktoren wurde eine Zahl von Verbesserungen vorgenommen. Die außerordentlich großen Auswirkungen des Unfalls in Tschernobyl sind auf die damalige Auslegung des RBMK-Reaktors zurückzuführen. Später wurden auch andere Reaktoren sowjetischer Bauart nachgerüstet. Die Bedeutung von Einstellungen für die Sicherheit wurde unterstrichen und als Folge wurde das Konzept der Sicherheitskultur entwickelt. Außerdem wurde die Beschäftigung mit Maßnahmen zur Beherrschung von auslegungsüberschreitenden Ereignissen verstärkt. Dies führte zur Einführung von Notfallschutzmaßnahmen in vielen Ländern, darunter auch in Deutschland. Die internationale Zusammenarbeit bei Sicherheitsfragen wurde ausgeweitet und zum ersten Mal auch die Länder der ehemaligen Sowjetunion in vollem Umfang mit einbezogen. Auf der Ebene der Regierungen wurde das Übereinkommen über nukleare Sicherheit (IAEO 1994b) unterzeichnet und auf Betrieberebene wurde die internationale Betreibervereinigung WANO (World Association of Nuclear Operators) gegründet.

Zusammenfassung

Der Unfall von Tschernobyl führte zu einer Vielzahl von Maßnahmen im Hinblick auf die Vermeidung weiterer Unfälle bei RBMK-Reaktoren. Darüber hinaus wurden Untersuchungen an anderen Reaktortypen durchgeführt und im wesentlichen Accident management-Maßnahmen eingeleitet. Als wichtige Aktivität ist auch die verstärkte internationale Zusammenarbeit auf dem Gebiet der Sicherheit zu nennen. Gute internationale Zusammenarbeit ist auch unerlässlich für eine Verbesserung der Fähigkeit, Gegenmaßnahmen zu ergreifen. Dies schließt sowohl eine Harmonisierung von Kriterien auf der Grundlage akzeptierter Strahlenschutzprinzipien und abgestimmte Verfahren zur Zusammenarbeit als auch effektive nationale Überwachungs- und Notfallschutzsysteme ein.

**11 Literatur**

Abagyan A.A., Asmolov V.G., Gusikova A.K. et al. (1986), The information on the Chernobyl accident and its consequences, prepared for IAEA, At Energy; 3(5).

Ayrault D. Schneider T. (2005), Echange scolaire entre le lycée du Bois d'Amour de Poitiers et les écoles d'Olmany et de Terebejov du district de Stolyn en Biélorussie, in: Proceedings du Congrès National de Radioprotection, SFRP, Nantes.

Balonov M.I. (1993), Overview of doses to the soviet population from the Chernobyl accident and the protective actions applied, The Chernobyl papers, 1:23-45, S.E.Merwin and M.I.Balonov Editors, Research Enterprises, Richland, WA.

Balonov M., Kaidanovsky G., Zvonova I., Kovtun A., Bouville A., Luckyanov N., Voillequé P. (2003), Contributions of short-lived radioiodines to thyroid doses received by evacuees from the Chernobyl area using early in vivo activity measurements Radiat. Prot. Dosim., 105 N°1-4, S. 593-599.

Boeri G, Viktorsson C. (1988), Emergency planning practices and criteria in the OECD Countries after the Chernobyl accident: A critical review, OECD/NEA, Paris

Borovoy A., Gavrilov S., Sentorov V. (2004a), Nuclear Fuel, radioactive waste, radiological situation – part 1; In: International workshop on the French-German Initiative Results and their implication for man and environment, 5-6 October 2004, Kiev.

Borovoy A., Gavrilov S., Sentorov V. (2004b), Nuclear Fuel, radioactive waste, radiological situation – part 2; In: International workshop on the French-German Initiative Results and their implication for man and environment, 5-6 October 2004, Kiev.

Buzulukov Y.P., Dobrynin Y.L.(1993), Release of radionuclides during the Chernobyl accident, The Chernobyl papers, 1:3-21, S.E.Merwin and M.I.Balonov Editors, Research Enterprises, Richland, WA, 1993.

Cardis E., Anspaugh L., Ivanov V.K., Likhtarev I., Mabuchi K., Okeanov A.E., Prisyazhniuk A.E. (1996), Estimated long term healthy effects of the Chernobyl accident. In: One decade after Chernobyl. Summing up the consequences of the accident. Proceedings of an international conference, Vienna 1996. STI/PUB/1001. IAEA, Wien, S. 241-279.

Chumak V., Bakhanova E., Pasalskaya L., Skaletsky Yu., Sjolom S., Musijachenko N., Tsykalo A., Krjuchkov V. (2004), Dosimetry of Chernobyl clean-up workers, International workshop on the French-German Initiative, Results and their implication for man and environment, 5-6 October 2004, Kiev.

CODEX Alimentarius Commission (1989), Guideline levels for radionuclides in foods following accidental nuclear contamination for use in international trade (CAC/GL 5-1989)

De Cort M., Dubois G., Fridman S.D., et al. (1998), Atlas of caesium deposition on Europe after the Chernobyl accident, Rept. EUR 16733, European Commission, Luxembourg.

Deville-Cavelin G., Biesold H., Chabanyuk V., Brun-Yaba Ch., Rutschkowsky N., Friederichs H.G. (2004), Synthesis report of the radioecology project of the French-German Initiative for Chernobyl – FGI report 04-01.

Dreicer M., Aarkrog A., Alexakhin R., Anspaugh L., Arkhipov N.P., Johansson K.J. (1996), Consequences of the Chernobyl accident for the natural and human environments, In: One decade after Chernobyl: summing up the consequences of the accident, IAEA, Wien, S. 319-361

Dzikovich I., Maksioutov M., Omelyanets N., Pott-Born R., Infant mortality and morbidity, International workshop on the French-German Initiative, Results and their implication for man and environment, 5-6 October 2004, Kiev.

Edvarson K. (1991), Fallout over Sweden from the Chernobyl accident. Chernobyl fallout from programme on environmental radiology (L. Moberg, ed), Swedish Radiation Protection Institute.

European Commission (1986), Council regulation (EEC) N° 1707/86 OJ N° L 146 of 31.05.1986, S. 88-90

European Commission (1987), Council decision of 14 December 1987 on community arrangements for the early exchange of information in the event of a radiological emergency.

European Commission (1989a), Council regulation (Euratom) N° 3954/87 of 22 December 1987 laying down maximal permitted levels of radioactive contamination of foodstuffs and of feedingstuffs following a nuclear accident or any other case of radiological emergency.

European Commission (1989b), Commission regulation (Euratom) N° 944/89 of 12 April 1989 laying down maximum permitted levels of radioactive contamination in minor foodstuffs following a nuclear accident or any other case of radiological emergency.

European Commission (1994), Environmental radioactivity in the European Community 1987-1998-1989-1990, DGXI. EUR 15699, EC, Luxembourg.

GRS (1996), Der Unfall und die Sicherheit der RBMK-Anlagen, GRS-121, Köln, 1996.

Havenaar J.M., Savelkoul T.J.F., van den Bout J., Bootsma P.A., (1996), Psychological consequences of the Chernobyl disaster, In: The radiological consequences of the Chernobyl accident, Proceedings of the first international conference Minsk, Belarus, A.Karaoglou, G.Desmet, G.N.Kelly, H.G.Menzel Editors, EUR 16544 EN, S. 435-442.

Havenaar J.M., de Wilde E.J., van den Bout J., Drottz-Sjöberg B.M., van den Brink W. (2003), Perception of risk and subjective health among victims of the Chernobyl disaster. Soc Sci Med 56, S. 569-572.

Holm E. (1995), Fluxes and technological enhancement of radionuclides in the forest industry, Proc of NEA workshop on the agricultural issues associated with nuclear emergencies (June 1995) OECD/NEA, Paris.

IAC (1991), International Chernobyl Project, Technical Report, IAEA, Wien.

IAEO (1986a), Post-accident review meeting on the Chernobyl accident, IAEA, Wien, 1986.

IAEO (1986b), Summary report on the Post-accident review meeting on the Chernobyl accident, Safety series N° 75 INSAG-1, IAEA, Wien, 1986.

IAEO (1986c), IAEA Convention on early notification of a nuclear accident, IAEA, Wien.

IAEO (1986d), IAEA Convention on mutual assistance in the event of a nuclear accident or radiological emergency, IAEA, Wien.

IAEO (1987), Techniques and decision-making in the assessment of off-site consequences of an accident in a nuclear facility, Safety series N°86, IAEA, Wien.

IAEO (1989), Cleanup of large areas contaminated as a result of a nuclear accident. Technical Report Series N° 300, IAEA, Wien.

IAEO (1990), Recovery operations in the event of a nuclear accident or radiological emergency, IAEA-SM-316.

IAEO (1991), Planning for cleanup of large areas contaminated as a result of a nuclear accident, Technical Report Series N° 327, IAEA, Wien.

IAEO (1992), Disposal of waste from the cleanup of large areas contaminated as a result of a nuclear accident, Technical Report Series N° 330, IAEA, Wien.

IAEO (1992b), INSAG-7: The Chernobyl Accident, Updating of INSAG-1, Safety Series No. 75-INSAG 7, IAEA, Wien, 1992.

IAEO (1994), Guidelines for agricultural countermeasures following an accidental release of radionuclides, IAEA/FAO Technical report series N° 363, IAEA, Wien.

IAEO (1994b), IAEA Convention on Nuclear Safety, IAEA, Wien.

IAEO (1996), One decade after Chernobyl accident: Summing up the consequences of the accident, IAEA, Wien.

IAEO (1997), Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management, IAEA, Wien.

IAEO (2001), Present and future environmental impact of the Chernobyl accident, TEC-DOC-1240, IAEA, Wien.

IAEO (2005), Environmental consequences of the Chernobyl accident and their remediation: twenty years of experience. Report of the UN Chernobyl Forum Expert Group "Environment" (EGE) August 2005, Working material.

IAEO (2005b), Radiation conditions of the Dniepr River basin: Assessment by the IAEA project team and recommendations for strategic plan, IAEA, Wien.

IAEO (2005c), The Chernobyl Forum, Chernobyl's Legacy: Health, Environmental and Socio-economic Impacts and Recommendations to the Governments of Belarus, The Russian Federation and Ukraine, IAEA, Wien.

ICRP (1991), ICRP Publication 60: 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Pergamon Press, Oxford.

ICRP (1992), ICRP Publication 63, Principles of intervention for protection of the public in a radiological emergency. Pergamon Press, Oxford.

Ilyin L.A., Pavlovskij A.O. (1987), Conséquences radiologiques de l'accident de Tchernobyl en Union soviétique et mesures prises pour en atténuer l'impact, Bulletin de l'AIEA, N°4.

Izrael Yu.A., Vakulovsky S.M. Vetrov V.A. et al. (1990), Chernobyl: Radioactive contamination of the environment, Gidrometoizdat, Leningrad.

Izrael Yu.A. (Editor) (1998), Atlas of radioactive contamination of European Russia, Belarus and Ukraine, Federal Service for Geodesy and Cartography of Russia, Moscow, 143 S.

Khavkin O., Krivosheyev, Senatorov V. (2004), Building constructions, systems and equipments, In: International workshop on the French-German Initiative Results and their implication for man and environment, 5-6 October 2004, Kiev.

Komarov V.I. (1990), Radioactive contamination and decontamination in the 30 km zone surrounding the Chernobyl Nuclear power plant, IAEA-SM-306/124, 2:3-16.

Lazjuk G., Zatsepina I., Kravchuk Z., Gagnier B., Verger P., Robert E. (2004), Effects of preconceptional and in utero exposure to Chernobyl fallout on pregnancy outcome and congenital malformations in Belarus, International workshop on the French-German Initiative, Results and their implication for man and environment, 5-6 October 2004, Kiev.

Likhtarev I., Minenko V., Khrouch V., Bouville A. (2003), Uncertainties in thyroid dose reconstruction after Chernobyl, Radiat. Prot. Dosim., 105, N° 1-4, S. 601-608.

Lochard J.(1999), Stakeholder involvement in the rehabilitation of living conditions in the territories affected by the Chernobyl accident: the ETHOS project in Belarus, Restoration of environments with radioactive residues, Proceedings of an IAEA international symposium, Arlington, VA USA, IAEA-SM_395/5.2, S. 639-653.

Mays C., Avetova E., Murphy M., Allemn P. (1998), The weeping cow: impact of countermeasures on daily life in Chernobyl contaminated regions, In: 1998 Annual conference "Risk analysis: opening the process", Paris, October 11-14. S. 163-172; SRA Europe-IPSN.

Mettler F.A. (1992), Administration of stable iodine to the population around the Chernobyl Nuclear power plant, J.Radiol.Prot. 12(3):159-165.

Mettler F.A. (2005), Non-cancer health effects of the Chernobyl accident and special health care programmes, Overview of the WHO 2005 reports, International Conference Chernobyl: looking back to go forwards, 6 September 2005, Vienna, Austria.

NEA (1987), Les incidences radiologiques de l'accident de Tchernobyl dans les pays de l'OCDE, OECD/NEA, Paris.

NEA (1989), Nuclear accidents: intervention levels for protection of the public. OECD/NEA, Paris.

NEA (1990), Protection of the population in the event of a nuclear accident. OECD/NEA, Paris.

NEA (1995), INEX 1: An international nuclear emergency exercise, OECD/NEA, Paris.

NEA (2002), Chernobyl: assessment of radiological and health impacts, 2002 Update of Chernobyl: ten years on. NEA/OECD, Paris 2002.

Nyagu A., Pott-Born R., Loganovsky K., Nechayev S., Repin V., Antipchuk Y., Loganovskaya T., Bomko M., Yuryev K., Petrova I. (2004), International workshop on the French-German Initiative, Results and their implication for man and environment, 5-6 October 2004, Kiev.

Romanenko A., Nyagu A., Loganovsky K., Khmelko V., Paniotto V., Gagnière B., Tirmarche M. (2004), Database on psychological disorders in the Ukrainian liquidators of the Chernobyl accident, International workshop on the French-German Initiative Results and their implication for man and environment, 5-6 October 2004, Kiev.

Rumyantseva G.M., Drottz-Sjöberg B.M., Allen P.T., Arkhangelskaya H.V., Nyagu A.I., Ageeva A., Prilipko V. (1996), The influence of social and psychological factors in the management of contaminated territories, In: The radiological consequences of the Chernobyl accident, Proceedings of the first international conference Minsk, Belarus, A.Karaoglou, G.Desmet, G.N.Kelly, H.G.Menzel Editors. EUR 16544 EN, S. 443-452

Smith J., Beresford N.A. (2005), Chernobyl- Catastrophe and Consequences, Springer-Verlag, Berlin.

UNDP/UNICEF (2002), Human consequences of the Chernobyl nuclear accident. A strategy for recovery. A report commissioned by UNDP and UNICEF with the support of UN-OCHA and WHO.

UNSCEAR (1988), United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, *Report to the general Assembly*.

UNSCEAR (2000), United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, *UNSCEAR 2000 report to the general Assembly, with Scientific Annexes*. Volume II: Effects.

WHO (1987), Nuclear accidents: Harmonisation of the public health response, WHO, Geneva.

WHO (1988), Derived intervention levels for radionuclides in food, WHO, Geneva.

WHO (2005), Health effects of the Chernobyl accident and special health care programmes. Report of the UN Chernobyl forum Expert group "Health" (EGH), July 2005, in press.

1. **Prof. Dr. George Apostolakis, USA**
Professor für Kerntechnik und Techniksysteme am Massachusetts Institute of Technology (MIT) in Cambridge, USA
2. **Prof. Dr. phil., Dr.-Ing. E.h. Adolf Birkhofer, Deutschland**
Geschäftsführer der ISaR Institute for Safety and Reliability GmbH
Lehrstuhl für Reaktordynamik und Reaktorsicherheit der Technischen Universität München
3. **Annick Carnino, Frankreich**
Ehem. Direktorin des Bereichs Sicherheit kerntechnischer Einrichtungen bei der IAEA
4. **Jean-Claude Chevallon, Frankreich**
Ehem. Vizepräsident „Kerntechnische Stromerzeugung“ bei EDF, Frankreich
5. **Prof. Dr.-Ing. habil. Hans Dieter Fischer, Deutschland**
Inhaber des Lehrstuhls für Nachrichtentechnik der Ruhr-Universität Bochum
6. **Bo Gustafsson, Schweden**
Vorstandsvorsitzender der SKB International Consultants AB, Schweden
7. **Prof. Dr. rer. nat. habil. Winfried Hacker, Deutschland**
Professor für Psychologie an der Technischen Universität München
Ehem. Professor für Allgemeine Psychologie an der Technischen Universität Dresden
8. **Prof. Dr.-Ing. habil. Wolfgang Kröger, Schweiz**
Inhaber des Lehrstuhls für Sicherheitstechnik und Leiter des Laboratoriums für Sicherheitsanalytik an der ETH Zürich
9. **Dr.-Ing. Erwin Lindauer, Deutschland** (Vorsitzender der ILK)
Ehem. Geschäftsführer der GfS Gesellschaft für Simulatorschulung mbH
Ehem. Geschäftsführer der KSG Kraftwerks-Simulator-Gesellschaft mbH
10. **Dr. Serge Prêtre, Schweiz** (stellvertretender Vorsitzender der ILK)
Direktor (a.D.) der schweizerischen atomrechtlichen Aufsichtsbehörde HSK
Vorsitzender der ILK von Dezember 2000 bis Januar 2006
11. **Antero Tamminen, Finnland**
Ehem. langjähriger Technischer Direktor des KKW Loviisa, Finnland

(Liste in alphabetischer Reihenfolge)

- ILK-01** ILK-Stellungnahme zur Beförderung von abgebrannten Brennelementen und verglasten hochradioaktiven Abfällen (Juli 2000)
- ILK-02** ILK-Stellungnahme zur Endlagerung von radioaktiven Abfällen (Juli 2000)
- ILK-03** ILK-Stellungnahme zur Sicherheit der Kernenergienutzung in Deutschland (Juli 2000)
- ILK-04** ILK-Empfehlungen zur Nutzung von Probabilistischen Sicherheitsanalysen im atomrechtlichen Genehmigungs- und Aufsichtsverfahren (Mai 2001)
- ILK-05** ILK-Empfehlung zur Förderung der internationalen technisch-wissenschaftlichen Kontakte der deutschen Länderbehörden für nukleare Sicherheit (Oktober 2001)
- ILK-06** ILK-Stellungnahme zum Entwurf vom 5. Juli 2001 der Atomgesetzänderung (Oktober 2001)
- ILK-07** ILK-Stellungnahme zur Wiederaufarbeitung abgebrannter Brennelemente (November 2001)
- ILK-08** ILK-Stellungnahme zur möglichen Eignung des Standortes Gorleben als geologisches Endlager für radioaktive Abfälle (Januar 2002)
- ILK-09** ILK-Stellungnahme zu übergeordneten Schlussfolgerungen aus den Ereignissen in KKP 2 in Zusammenhang mit der Revision 2001 (Mai 2002)
- ILK-10** ILK-Stellungnahme zum Umgang mit dem Fragenkatalog der GRS zur „Praxis des Sicherheitsmanagements in den Kernkraftwerken in Deutschland“ (Juli 2002)
- ILK-11** ILK-Empfehlung zur Durchführung von internationalen Überprüfungen im Bereich der nuklearen Sicherheit in Deutschland (September 2002)
- ILK-12** Interner ILK-Bericht zum gezielten Absturz von Passagierflugzeugen auf Kernkraftwerke (März 2003)
- ILK-13** ILK-Stellungnahme zu den EU-Richtlinienvorschlägen zur kerntechnischen Sicherheit und zur Entsorgung radioaktiver Abfälle (Mai 2003)
- ILK-14** ILK-Stellungnahme zu den Empfehlungen des Arbeitskreises Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd) (September 2003)
- ILK-15** ILK-Empfehlung zur Vermeidung von gemeinsam verursachten Ausfällen bei digitalen Schutzsystemen (September 2003)
- ILK-16** ILK-Stellungnahme zur Bewertung der Nachhaltigkeit der Kernenergie und anderer Technologien zur Stromerzeugung (Januar 2004)

- ILK-17** ILK-Stellungnahme zum Kompetenzerhalt auf dem Gebiet der Kerntechnik in Deutschland (März 2004)
- ILK-18** ILK-Bericht: Zusammenfassung des 2. Internationalen ILK-Symposiums „Harmonisierung von nuklearen Sicherheitsanforderungen – Eine Chance für mehr Transparenz und Effektivität?“ (Mai 2004)
- ILK-19** ILK-Stellungnahme zum Umgang der Aufsichtsbehörde mit den von den Betreibern durchgeführten Selbstbewertungen der Sicherheitskultur (Januar 2005)
- ILK-20** ILK-Stellungnahme zu Anforderungen bei Betriebstransienten mit unterstelltem Ausfall der Schnellabschaltung (ATWS) (März 2005)
- ILK-21** ILK-Bericht: Zusammenfassung des Internationalen ILK-Workshops "Nachhaltigkeit" (Mai 2005)
- ILK-22** ILK-Empfehlungen zu Anforderungen an ein zeitgemäßes Allgemeines Kerntechnisches Regelwerk in Deutschland (Juli 2005)
- ILK-23** ILK-Stellungnahme zur Festlegung von Betriebszeiten für Kernkraftwerke in Deutschland (September 2005)
- ILK-24** ILK-Stellungnahme zur Nutzung der Kernenergie in Deutschland (November 2005)
- ILK-25** ILK-Empfehlung zur Revitalisierung der Endlagerprojekte Gorleben und Konrad (November 2005)
- ILK-26** ILK-Stellungnahme zu den Auswirkungen des Unfalls von Tschernobyl – Eine Bestandsaufnahme nach 20 Jahren (Januar 2006)
- CD mit Vorträgen des ILK-Symposiums „Chancen und Risiken der Kernenergie“ im April 2001
 - Tagungsband mit Vorträgen des 2. ILK-Symposiums „Harmonisierung von nuklearen Sicherheitsanforderungen – Eine Chance für mehr Transparenz und Effektivität?“ im Oktober 2003

Bitte besuchen Sie unsere Homepage <http://www.ilc-online.org>, um den neuesten Stand unserer Veröffentlichungen zu erfahren und die dort angegebenen Empfehlungen und Stellungnahmen herunterzuladen oder kostenfrei zu bestellen.

Für weiterführende Informationen zu den momentan von der ILK bearbeiteten Themen möchten wir Sie auf die Seiten „Beratungsplan“ und „Aktuelles“ unserer Homepage verweisen.