



# Der Reaktorunfall in Tschernobyl





# Der Reaktorunfall in Tschernobyl

Unfallursachen  
Unfallfolgen und deren Bewältigung  
Sicherung und Entsorgung des Kernkraftwerks Tschernobyl

Herausgeber:  
**DAtF**  
Deutsches Atomforum e.V.  
Robert-Koch-Platz 4  
10115 Berlin

info@  
www. kernenergie.de

April 2011  
Unveränderter Nachdruck April 2015

Alle Rechte vorbehalten.

# Inhalt

1. Der Unfall **7**
  - 1.1 Der Tschernobyl-Reaktor **8**
  - 1.2 Unfallablauf, Ursachen und Hintergründe **10**
  - 1.3 Zustand des Sarkophags und des Kraftwerksstandorts **16**
2. Strahlenexposition und gesundheitliche Auswirkungen **19**
  - 2.1 Aktivitätsfreisetzung und weiträumige Kontamination **20**
  - 2.2 Strahlenexposition betroffener Personengruppen **22**
  - 2.3 Gesundheitliche Folgen **26**
  - 2.4 Auswirkungen auf Deutschland **32**
3. Erkenntnisse und Lehren aus dem Unfall **35**
4. Sicherung und Entsorgung des stillgelegten Kernkraftwerks Tschernobyl **41**
5. Glossar **47**

|

|

Der Unfall 1

Der Unfall im Kernkraftwerk Tschernobyl am 26. April 1986 ist ein schwerwiegendes Ereignis in der über 50-jährigen Geschichte der friedlichen Nutzung der Kernenergie. Die beträchtliche Freisetzung von radioaktiven Spaltprodukten führte zu einer starken Belastung der Rettungsmannschaften und der Bevölkerung in der Nähe des Standorts. In vielen Ländern der Welt waren die Menschen in den Tagen nach dem Unfall besorgt über die ungewissen Folgen dieses Ereignisses, was durch die zögerliche Informationspolitik der sowjetischen Behörden noch verstärkt wurde. Ursachen, Hintergründe und Folgen des Unfalls sind seitdem von verschiedenen wissenschaftlichen Institutionen untersucht und bewertet worden. Mittlerweile ergibt sich ein weitgehend geschlossenes Bild.

## 1.1 Der Tschernobyl-Reaktor

### **Zusammenfassung**

Bei den RBMK-Reaktoren handelt es sich um eine sowjetische Reaktorlinie, die ursprünglich entwickelt wurde, um nicht nur Strom, sondern auch Plutonium für militärische Zwecke zu gewinnen. Im Vergleich zu deutschen Kernkraftwerken weist die Konzeption dieser Reaktoren einige schwerwiegende Nachteile auf, die auch für den Unfall in Tschernobyl wesentlich mitverantwortlich waren. Die RBMK-Reaktoren haben keine druckfeste und gasdichte Hülle (Containment), die das Reaktorgebäude umschließt und weisen erhebliche Defizite bei den Sicherheitseinrichtungen und Notkühlsystemen auf. Obwohl die technischen Mängel der RBMK-Reaktoren einzelnen sowjetischen Fachleuten bekannt waren, wurden sie weder beseitigt noch in Form entsprechender Betriebsbeschränkungen den Betriebsmannschaften bewusst gemacht.

**Abb. 01**

Das Kernkraftwerk Tschernobyl vor dem 26. April 1986





## Konzept der RBMK-Reaktoren

Anfang der 1950er-Jahre begann die UdSSR mit der Entwicklung eines Druckröhren-Reaktors mit Siedewasserkühlung und Graphitmoderator. Ende der 1960er-Jahre waren mehrere kleine Anlagen in Betrieb. Danach ging man sogleich auf Blockleistungen von 1.000 Megawatt (MW) über (Tab. 01). Da es sich um eine Reaktorlinie handelte, die auch zur Plutoniumgewinnung für militärische Zwecke genutzt werden konnte, wurden diese RBMK-Reaktoren nur auf dem Gebiet der damaligen Sowjetunion errichtet und nicht exportiert. Die RBMK-Anlagen werden im Allgemeinen in drei Generationen eingeteilt. Der technischen Entwicklung entsprechend sind die Übergänge zwischen den Generationen jedoch fließend. Planungen für Einheiten bis zu Blockgrößen von 2.400 MW wurden inzwischen eingestellt.

Bei dem Tschernobyl-Reaktortyp ist der Reaktorkern ein Graphitblock mit einer Spaltzone von 11,8 m Durchmesser und 7 m Höhe, der in einem Betonquader von 22 x 22 x 26 m Größe untergebracht ist. Der Graphitblock dient der Moderation, das heißt die für den gewünschten Betrieb zu schnellen Neutronen werden durch den Graphit gebremst. Der Moderatorblock besteht aus rund 2.450 Säulen, die aus quadratischen Blöcken (250 x 250 mm) aufgebaut sind. Er wird vertikal von rund 1.700 Druckröhren durchzogen, in denen sich je ein Brennelement befindet. Das Wasser dient bei den RBMK-Reaktoren nur als Kühlmittel und nicht – wie bei deutschen Reaktoren – gleichzeitig als Moderator. Während bei einem deutschen Reaktor durch Kühlwassermangel die Neutronenbremsung verringert und damit die Kettenreaktion automatisch gebremst oder gestoppt wird, sind bei den RBMK-Anlagen Kühlmittel und Neutronen-Bremsmittel nicht identisch. Dadurch entsteht unter den beim Tschernobyl-Reaktor gegebenen Umständen ein Effekt, der in der Fachsprache als „positiver Dampfblasenkoeffizient“ bezeichnet wird: Bei Leistungs- und Temperatursteigerung nimmt bei den RBMK-Reaktoren auch die Kettenreaktionsrate immer schneller zu. Dieser Effekt war unter anderem eine der physikalischen Ursachen für den Unfall (Abb. 05).

Aus sowjetischer Sicht bieten die RBMK-Reaktoren folgende Vorteile:

- Die Anlagen werden in Modulbauweise errichtet, das heißt es sind keine Großschmiedestücke, wie etwa Druckbehälter, herzustellen und zu transportieren. Folglich ist die Blockleistung nicht durch infrastrukturelle Gegebenheiten wie Transportwege etc. begrenzt. Die Gesamt-

leistung des Kraftwerkblocks lässt sich durch Hinzufügen baugleicher Konstruktionselemente, das heißt weiterer Druckröhren, relativ einfach erhöhen.

- Nach sowjetischen Angaben haben sich die Anlagen im praktischen Betrieb bewährt. Ihre Verfügbarkeit und Auslastung lag über dem Durchschnitt anderer sowjetischer Anlagen und erreichte international übliche Werte.

Diesen betrieblichen und volkswirtschaftlichen Vorteilen stehen aus Sicht westlicher Reaktorfachleute folgende gravierende Nachteile gegenüber:

- Die beschriebene reaktorphysikalische Auslegung kann bei bestimmten Störfallsituationen zu einem unkontrollierten Anstieg der nuklearen Leistung führen.
- Der druckfeste und gasdichte Sicherheitsbehälter (Containment), der bei deutschen Kernkraftwerken eine der wesentlichen Genehmigungsvoraussetzungen ist, fehlt bei den RBMK-Reaktoren, wie auch bei einem Teil der anderen russischen Anlagen.
- Im Vergleich zu deutschen Reaktoren sind einige Sicherheitseinrichtungen nicht vorhanden oder in zu geringer Redundanz (Mehrfachauslegung) ausgeführt.
- Die starke Verknüpfung der Systeme untereinander und insbesondere mit dem Notkühlsystem macht die Anlage störanfällig.

Die technischen Mängel blieben trotz Weiterentwicklung der RBMK-Anlagen über Jahrzehnte bestehen, obwohl sie einzelnen sowjetischen Fachleuten bekannt waren. Warum diese Kenntnisse nicht weitergegeben wurden, begründen westliche Fachleute mit organisatorischen Defiziten, die sich mit einem „Mangel an Sicherheitskultur“ in der früheren Sowjetunion umschreiben lassen. Der RBMK-Reaktortyp wäre weder in der Bundesrepublik Deutschland noch in anderen westlichen Ländern genehmigt worden. Westliche Reaktorfachleute hatten bis 1986 praktisch keine Kenntnisse über die Funktionsweise und Sicherheitseigenschaften der RBMK-Anlagen. Erst nach dem Unfall wurden allmählich erste technische Einzelheiten bekannt.

Land	Standort	Block	Generation	Baureihe/ Leistung	Beginn des Leistungsbe- triebs	Stilllegungsdatum		
						design.	(geplant)	
Litauen	Ignalina	1	2. <sup>1</sup>	1.500 <sup>2</sup>	1983	2013	2004	
		2	2. <sup>1</sup>	1.500 <sup>2</sup>	1987	2017	2009	
Russland	Leningrad	1	1.	1.000	1974	2003	(2019)	
		2	1.	1.000	1976	2005	(2022)	
		3	2.	1.000	1980	2010	(2025)	
		4	2.	1.000	1985	2011	(2026)	
	Kursk	1	1.	1.000	1977	2006	(2021)	
		2	1.	1.000	1979	2008	(2024)	
		3	2.	1.000	1984	2013	(2013)	
		4	2.	1.000	1985	2015	(2015)	
		5	3.	1.000+	im Bau seit 1985 – Fortschritt von Finan- zierungsschwierigkeiten geprägt			
	Smolensk	1	2.	1.000	1983	2012	(2028)	
		2	2.	1.000	1985	2015	(2025)	
		3	3.	1.000	1990	2020	(2030)	
	Ukraine	Tschernobyl	1	1.	1.000	1977	2007	1996
			2	1.	1.000	1978	2008	1991
3			2.	1.000	1981	2011	2000	
4			2.	1.000	1983	2013	Unfall 1986	

**Tab. 01**  
RBMK-Reaktoren in Osteuropa

**Quelle:**  
atw 2/2011, S. 81

1. Sonderbauform der 2. Generation  
2. Erlaubte Leistung 4.200 MW<sub>th</sub>, entsprechend ca. 1.300 MW<sub>el</sub>

## 1.2 Unfallablauf, Ursachen und Hintergründe

### Zusammenfassung

Der Unfall ereignete sich während eines Tests, bei dem geprüft werden sollte, ob bei einem Stromausfall die Rotationsenergie der Turbine noch übergangsweise zur Stromerzeugung genutzt werden kann, bis die Notstromaggregate hochgelaufen sind. Etwa eine Minute nach Testbeginn gab es im Reaktor einen jähen Leistungsanstieg. Augenzeugen außerhalb des Reaktors beobach-

teten zu diesem Zeitpunkt zwei Explosionen mit Materialauswurf. Die Anlage wurde stark beschädigt. Die Feuerwehrleute und die Hilfsmannschaften mussten mangels Erfahrung mit derartigen Unfällen improvisieren. Durch Wassereinspeisung, Abwurf verschiedener Materialien aus Militärhubschraubern und Einblasen von Stickstoff gelang es, die Freisetzung der radioaktiven Schadstoffe allmählich zu verringern. Aus

der Region um den havarierten Reaktor wurden in den ersten Tagen über 100.000 Menschen evakuiert. Nach ersten Untersuchungen ging man noch davon aus, dass menschliche Fehlhandlungen in Verbindung mit Systemschwächen der RBMK-Reaktorlinie den Unfall verursachten. Mittlerweile sieht man in den Systemschwächen die wesentlichen Ursachen.

### Unfallablauf

Das Kernkraftwerk Tschernobyl liegt im weißrussisch-ukrainischen Waldgebiet am Ufer des Flusses Pripjat, der in den Dnjepr mündet (Abb. 02). Der Geländeverlauf ist meist flach. Die Bevölkerungsdichte ist in dieser Region mit durchschnittlich rund 70 Einwohnern pro km<sup>2</sup> im Vergleich zu mitteleuropäischen Ländern relativ gering. Am Standort des Kernkraftwerks Tschernobyl waren 1986 vier RBMK-1000-Blöcke in Betrieb, zwei weitere im Bau. Die Blöcke 1 und 2 gingen 1978 und 1979 in Betrieb, die Blöcke 3 und 4 wurden 1982 und 1984 ans Netz geschaltet. Die Blöcke 5 und 6 befanden sich in fortgeschrittenem Bauzustand und sollten 1986 und 1988 in Betrieb gehen. Das Kernkraftwerk Tschernobyl galt in der UdSSR als Musteranlage.

Der Unfall ereignete sich in der Nacht vom 25. auf den 26. April 1986 in Block 4 während eines Tests mit einem der beiden Turbinen-Generator-Sätze. Ziel dieses Tests war es, zu prüfen, ob bei einem Stromausfall und der damit verbundenen Abschaltung des Reaktors die mechanische Energie des Rotors im Turbinen-Generator-Satz beim Auslaufen so lange für den Strom-Eigenbedarf von vier Hauptspeisepumpen ausreicht, bis die Notstromdieselaggregate hochgelaufen sind. Für das Hochlaufen bis zur vollen Leistung vergehen bei den in Tschernobyl installierten Aggregaten 40 bis 50 Sekunden. Bereits im Jahr 1985 hatte man am Standort Tschernobyl einen gleichen Test in Block 3 durchgeführt. Damals war jedoch die Spannung am Generator zu schnell abgefallen, sodass der Test mit einem verbesserten Spannungsregler in Block 4 wiederholt werden sollte. Um bei einem möglichen Scheitern des ersten Versuchs eine sofortige Wiederholung zu ermöglichen, wurde der Test diesmal durchgeführt, während der Reaktor noch in Betrieb war. Eine derartige Versuchsanordnung verstieß gegen die Betriebsvorschriften. Die Versuchsanordnung alleine hätte den Unfall nicht herbeiführen können, doch kamen ungünstige reaktorphysikalische und sicherheitstechnische Eigenschaften der RBMK-Reaktoren sowie Bedienungsfehler hinzu.

Während des Tests wurde zur Erfassung von elektrischen Größen des geplanten Versuchs eine beträchtliche Anzahl von Dokumentations-Kanälen verwendet, auf denen sonst Betriebswerte (wie

die Reaktorleistung) aufgezeichnet werden. Die dadurch fehlenden Werte erschwerten später die Ermittlung von Unfallablauf und -ursachen.



Abb. 02

Lage des Kernkraftwerks Tschernobyl im Grenzgebiet Ukraine-Weißrussland

### Der zeitliche Ablauf des Unfallgeschehens (Ortszeit)

#### Freitag, 25. April 1986

01.00 Uhr: Der Reaktor wird zur jährlichen Revision und für den geplanten Versuch von voller Leistung abgefahren, das heißt die Reaktorleistung wird systematisch reduziert.

13.05 Uhr: Etwa 50 % Reaktorleistung werden erreicht. Eine der beiden zugeordneten Turbinen wird abgeschaltet.

14.00 Uhr: Das Notkühlsystem wird isoliert. (Diese Maßnahme war in der Testprozedur vorgesehen. Man wollte vermeiden, dass bei Notkühlsignalen Wasser zur Kühlung eingespeist würde.) Zwischenzeitlich verlangt der Lastverteiler im ukrainischen Kiew den Weiterbetrieb mit einer Turbine, da im Elektrizitätsnetz entsprechender Bedarf besteht. Das Betriebspersonal vergisst, die Notkühlsysteme wieder zu aktivieren.

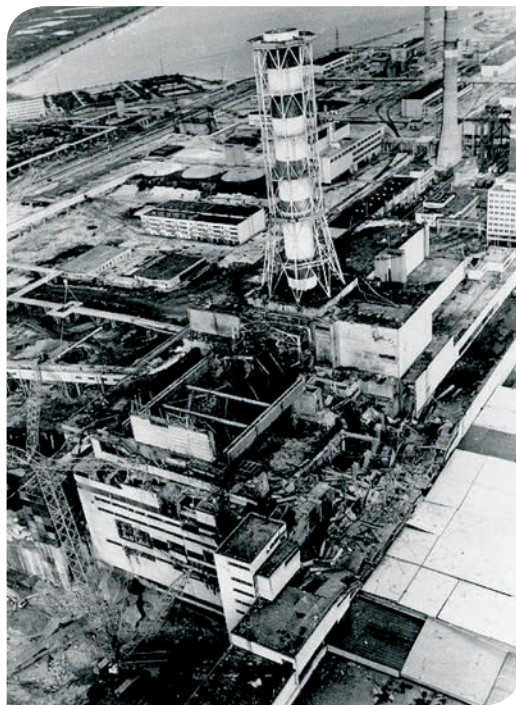
23.10 Uhr: Nachdem der Strombedarf gedeckt ist, wird mit dem weiteren Abfahren des Reaktors begonnen. Ziel ist es, eine Leistung von rund 25 % zu erreichen.

#### Samstag, 26. April 1986

00.28 Uhr: Beim Abfahren fällt aufgrund einer Störung im Regelsystem oder einer Fehlhandlung die Leistung des Reaktors aus bisher ungeklärten

Gründen auf unter 1 % der Nennleistung. Da ein Leistungsbetrieb unter 20 % nicht zulässig war, hätte der Reaktor abgeschaltet und der Versuch verschoben werden müssen. Stattdessen wurde die Leistung soweit wie möglich wieder angehoben, um den Versuch durchzuführen. Durch Ausfahren der Regelstäbe (im übertragenen Sinne der Bremsen des Reaktors) gelingt es, die Reaktorleistung auf etwa 7 % anzuheben.

00.43 Uhr: Etwa 40 Minuten vor Versuchsbeginn wird ein wichtiges Signal, welches bei Einleitung des Versuchs zu einer automatischen Notabschaltung des Reaktors geführt hätte, unwirksam gemacht, um den Versuch eventuell wiederholen zu können.



**Abb. 03**

*Der havarierte Block 4 des Kernkraftwerks Tschernobyl nach dem Unfall aus südwestlicher Sicht*

01.00 Uhr: Dem Operateur gelingt es, den Reaktor auf ca. 7 % der Nennleistung zu stabilisieren. (In diesem Leistungsbereich hätte der Reaktor nach heutiger Kenntnis nicht betrieben werden dürfen. Für den weiteren Ablauf ist von großer Bedeutung, dass der notwendige Spielraum zur Abschaltung des Reaktors wegen der vielen ausgefahrenen Regelstäbe nicht mehr vorhanden war [Reaktivitätsreserve].)

01.03 Uhr: Jedem Kühlkreislauf werden gemäß Versuchsablauf die vier zugehörigen Pumpen zugeschaltet. Dadurch werden zur Stabilisierung der Leistung die Regelstäbe noch mehr herausgefahren. Die Reaktivitätsreserve sinkt weiter. Druck und Wasserspiegel in den relevanten Reaktor-komponenten schwanken heftig, die Anlage befindet sich in einem äußerst instabilen Zustand.

01.19 Uhr: Der Operateur erhöht die Wasserzufuhr und überbrückt Warnsignale zum Stand von Wasserspiegel und Druck, die zu einer Abschaltung geführt hätten. (Diese Vorgehensweise war laut Betriebsanleitung nicht verboten.)

01.22 Uhr: Durch verschiedene Maßnahmen erreicht der Operateur, dass die Wasserzufuhr wieder auf zwei Drittel des notwendigen Wertes ansteigt. Die Regelung gestaltet sich sehr schwierig, da das Regelsystem nicht für derartige kleine Durchsätze ausgelegt ist. Kurze Zeit später stabilisiert sich die Wasserzufuhr. (Dennoch wäre zu diesem Zeitpunkt wegen der fehlenden Reaktivitätsreserve und der vielen ausgefahrenen Regelstäbe das sofortige Abschalten des Reaktors erforderlich gewesen.)

01.23 Uhr: Der vorgesehene Test beginnt mit dem Schließen der Turbinenschnellschlussventile. Durch den steigenden Druck wird eine Gruppe der automatischen Regelstäbe ausgefahren. Die Verringerung des Durchsatzes und die Erwärmung des Wassers verursachen eine positive Reaktivitätszufuhr, die man dadurch zu kompensieren versucht, dass man zwei (von insgesamt drei) Gruppen der automatischen Regelstäbe wieder einfährt. Etwa 30 Sekunden nach Testbeginn steigt die Leistung weiter an. Das automatische Regelsystem kann die Leistungssteigerung nicht verhindern. 36 Sekunden nach Testbeginn gibt der Schichtleiter den Auftrag, den Reaktor abzuschalten. Der Notschalter wird betätigt. Sekunden später erfolgen Alarmmeldungen über hohe Reaktorleistung und ein jäher Leistungsanstieg. Innerhalb von rund vier Sekunden schaukelt sich die Energieabgabe auf nahezu das 100-fache der Nennleistung des Reaktors auf. Das Schnellabschaltensystem der Steuerstäbe dagegen benötigt für das Wirksamwerden (Bremsen) 18 bis 20 Sekunden.

Außerhalb des Reaktorgebäudes werden zu diesem Zeitpunkt von Augenzeugen zwei Explosionen mit Materialauswurf beobachtet. Sie erfolgen im Abstand von 2 bis 3 Sekunden und führen zu starken Beschädigungen am Gebäude. Von diesem Zeitpunkt an begann die Freisetzung von radioaktiven Stoffen aus dem beschädigten Reaktor, die erst nach 10 Tagen eingedämmt werden konnte.

### **Unfallursachen**

Zur Erklärung des Unfallablaufs konnte man nicht auf Erfahrungen aus vergleichbaren Ereignissen oder auf eine ausführliche Dokumentation zurückgreifen. Man war auf die Augenzeugenberichte sowie auf nach dem Unfall durchgeführte Strahlenmessungen, nachgestellte Experimente und Analysen angewiesen. Alles zusammenge-



nommen ergibt sich heute folgendes Bild: Durch die starke Leistungssteigerung im Reaktor kam es zum Aufheizen des Brennstoffs. Die Aufheizung von eingeschlossenem Gas und wahrscheinlich auch die Verdampfung von Brennstoff führten zu einem Druckaufbau, durch den ein Teil des Brennstoffs in winzige Bruchstücke zerrissen (fragmentiert) wurde. Die heißen Bruchstücke kamen mit Wasser in Berührung. Dadurch entstand Dampf. Dieser gesamte Vorgang erfolgte in etwa einer Zehntel Sekunde. Berechnungen von sowjetischen Reaktorfachleuten ergaben, dass rund 30 % des Kernvolumens diese erste Leistungssteigerung verursachten.

Die Brennelementkanäle konnten dem Druck und den Temperaturbelastungen nicht standhalten. Der Druck im Reaktorraum stieg. Durch diesen Druckaufbau wurde die obere, ca. 3.000 Tonnen (t) schwere Reaktordeckplatte, angehoben und der obere Teil des 64 Meter hohen Reaktorgebäudes zerstört. Dabei rissen alle mit der Platte verbundenen Rohre ab. Gleichzeitig wurden die horizontalen Leitungen abgesichert und die Regelstäbe mit der Platte herausgezogen. Die Reaktorplatte befindet sich seitdem in einer nahezu vertikalen Position. Die Brennelementlade-maschine fiel auf den Reaktorkern und zerstörte weitere Kühlkanäle. Nach der Fragmentierung des Brennstoffs und der Wechselwirkung mit dem Wasser entstand Wasserstoff. Möglicherweise erfolgte etwas später im Rahmen der Wechselwirkung mit dem Material der Brennelementkanäle eine weitere Zirkon-Wasser-Reaktion. Die Ursachen der bereits angesprochenen zweiten Explosion sind nicht bekannt. Man nimmt an, dass durch das Abreißen aller Rohre und durch die Druckabsenkung im Primärsystem des Reaktors eine zweite Leistungsexkursion möglich war. Ca. 2 % der Graphitblöcke wurden durch die Explosionen ausgeworfen. Sowjetische Quellen sprechen von bis zu 13 t Kernmaterial, die auf dem Dach des daneben liegenden Blocks 3 und dem Zwischengebäude mit Kamin nach dem Unfall gefunden wurden. Dieses Material wurde bei den Dekontaminierungsarbeiten in den havarierten, offenen Block 4 des Kernkraftwerks abgeworfen. Aller Wahrscheinlichkeit nach wurde die Kettenreaktion während der Zerstörung des Reaktorkerns beendet.

Über den Unfallhergang und die Ursachen der aufgetretenen Explosionen werden in der Fachwelt verschiedene Hypothesen aufgestellt. Der wesentliche Unterschied liegt dabei in der Erklärung der nach Aussagen von Augenzeugen stärkeren zweiten Explosion, über die zwei Vermutungen bestehen: Zum einen die Hypothese, die von einer nicht-nuklearen Explosion in Form einer Dampfexplosion ausgeht, diese entweder

mit stark exothermen Reaktionen oder mit einer Wasserstoffexplosion. Zum anderen die Hypothese, die eine nukleare Explosion innerhalb oder außerhalb des Reaktorschachtes zu Grunde legt.



**Abb. 04**

*Hubschrauberansicht des zerstörten Reaktorschachts des 4. Blocks und das beschädigte Dach des Maschinenraums (September 1986)*

### **Systemschwächen der RBMK-Reaktorlinie**

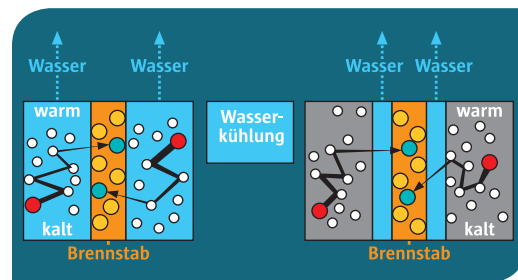
Erste Analysen sahen die wesentlichen Ursachen für diesen Unfall sowohl im menschlichen Versagen als auch in der Unkenntnis der speziellen Auslegung des Reaktors seitens der Operateure. Die Betriebsmannschaft stand im Vorfeld des Unfalls unter beträchtlichem Zeitdruck. Der Test sollte während der jährlichen Routinerevision, die im April anstand, tagsüber durchgeführt werden. Da der Reaktor zwischenzeitlich zur Stromerzeugung benötigt wurde, entstand ein Zeitverzug von neun Stunden, sodass der Test in der Nacht gefahren werden musste. Der Zeitdruck auf die Betriebsmannschaft wurde dadurch noch verstärkt. Nach den ersten Untersuchungen war man im Westen (aufgrund von sowjetischen Aussagen) noch der Auffassung, dass überwiegend menschliche Fehlhandlungen in Verbindung mit verschiedenen Systemschwächen den Unfall verursacht hatten. Diese Einschätzung wurde jedoch aufgrund neuerer Bewertungen von russischen Experten revidiert. Sie kannten die Sensibilität des Reaktors in diesem Leistungsbereich, die unzureichende Instrumentierung und die Leistungssteigerung durch das Einfahren vorher zu hoch ausgefahrener Regelstäbe. Der zuletzt genannte Effekt beeinflusste offensichtlich den Unfallbeginn.

Es gilt heute als sicher, dass die den Leistungszuwachs auslösende Reaktivitätszufuhr durch das Einfahren der Abschalt- und Regelstäbe hervorgerufen wurde. Denn die Regelstäbe des RBMK-Reaktortyps reduzieren aufgrund ihrer fehlerhaften Konzeption beim Einfahren aus dem völlig gezogenen Zustand die Reaktivität nicht, sondern erhöhen sie zunächst. Das heißt die Kettenreaktion wird nicht beendet, sondern für kurze Zeit beschleunigt. Auf diese Weise wurde der Unfall paradoxerweise durch die Aktivierung der Reaktorabschaltung durch den Operateur ausgelöst

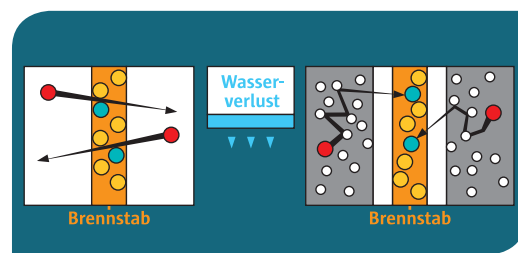
(im übertragenen Sinne: Der Operateur betätigte die Bremsen des Reaktors. Aufgrund ihrer falschen Konstruktion führte dies zu einem kurzzeitigen Gasgeben.). Diesen Effekt stellte man bereits 1983 bei der Inbetriebnahme der Anlage von Ignalina in Litauen fest, gab ihn aber nicht als Erfahrungswert an die Betriebsmannschaften anderer Anlagen weiter, was nach 1986 von sowjetischer Seite lange Zeit geleugnet wurde.

Die Konzeptmängel an den Steuerstäben und in der gesamten Kernauslegung (stark positive Reaktivitätseffekte infolge des Verdampfens des Reaktorkühlmittels und des Regelstabskühlwassers) sowie die möglichen Folgen für das Reaktorverhalten, insbesondere bei niedriger Leistung, waren dem Betriebspersonal weder bekannt noch in den Betriebs- und Störfallprozeduren eindeutig dargestellt. Trotzdem schob die sowjetische Seite die Schuld an dem Unfall weitgehend dem Bedienungspersonal zu. Der Schichtleiter, der sich nicht vorstellen konnte, dass durch eine Abschaltung ein Leistungsanstieg ausgelöst werden könnte, wurde mit Gefängnis bestraft.

**Abb. 05**  
**Unterschiede im Zusammenwirken von Moderation und Kühlung**  
**Betrieb:**  
links deutscher Reaktor  
rechts Tschernobyl-Reaktor



**Störfall:**  
links deutscher Reaktor  
rechts Tschernobyl-Reaktor



### Erste Schutzmaßnahmen

Da keine Katastrophen- und Notfallpläne existierten und auch keine Erfahrungen mit derartigen Unfällen vorlagen, mussten die Fachleute vor Ort über die Maßnahmen zur Verringerung der Strahlenbelastungen des Personals und der Umwelt entscheiden. Man konzentrierte sich auf vier Gefahrschwerpunkte:

- Verhinderung einer erneuten Kettenreaktion;
- Verhinderung eines weiteren Aufheizens der Brennelemente;
- ausreichende Abschirmung der Direktstrahlung;

- Minimierung der Freisetzung von radioaktiven Stoffen.

Die Umsetzung dieser Maßnahmen erfolgte schwerpunktmäßig in der Zeit vom 26. April bis 2. Mai 1986. Um die Freisetzung von radioaktiven Stoffen aus dem beschädigten Reaktor zu begrenzen, versuchte man zunächst, Kühlwasser in den zerstörten Reaktorkern zu pumpen. Angesichts des zerstörten Kühlwassersystems musste die Feuerwehr improvisieren. Sie schaffte es bereits kurz nach dem Unfall, Wasser in der Größenordnung von 200 bis 300 t pro Stunde mittels der Notpumpen einzuspeisen. Das Wasser wurde dem Vorratstank zur Kühlung des intakten Blocks entnommen. Nach 10 Stunden beendete man die Einspeisung, da die beabsichtigte Kühlung der Graphitblöcke nicht gelang. Zudem floss kontaminiertes Wasser aus der Anlage heraus.

### Abwurf von Schutzmaterialien aus Hubschraubern

Schnellstmöglich begann man mit über 30 Militärhubschraubern folgende Materialien in den Reaktor zu werfen, in dem zwischenzeitlich als Folge der hohen Temperatur ein Graphitbrand entstanden war:

- ca. 40 t Borkarbid, um eine erneute Kettenreaktion zu verhindern;
- ca. 800 t Dolomit, dessen Zersetzung die Wärmeentwicklung auffangen sollte; gleichzeitig sollte mit Hilfe des entstehenden Kohlendioxids der mehrere Tage andauernde Graphitbrand erstickt werden;
- ca. 2.400 t Blei, um durch den Schmelzvorgang die Hitze zu absorbieren und eine gewisse Abschirmung der Gammastrahlung zu erreichen;
- ca. 1.800 t Sand und Lehm als Filtermaterial für die aus dem Brennstoff freigesetzten radioaktiven Stoffe.

Am 4. oder 5. Mai wurde gasförmiger Stickstoff in den unteren Bereich der Anlage eingeblasen. Die aus der Luft abgeworfene Abdeckung erhöhte zunächst die Temperatur und somit die Freisetzung von radioaktiven Stoffen. Dieser Zustand änderte sich erst, als es am 6. Mai gelang, ein Stickstoffkühlssystem unterhalb der Reaktorgrube zu installieren. Dadurch stabilisierte sich die Temperatur, und die Freisetzung ging zurück. Weiterhin grub man einen Tunnel, der unterhalb des Reaktorkerns endete, um dort eine Betonplatte einzubauen. Diese Maßnahme sollte verhindern, dass geschmolzene Teile das Grundwasser kontaminieren.

Wie viel des radioaktiven Inventars in den Reaktorrümmern blieb, konnte durch Messungen und später durch Bohrungen näherungsweise ermittelt werden (ursprünglich bestand die Kernladung aus 1.659 Brennstoffkassetten, die insgesamt 190,2 t Kernbrennstoff enthielten). Verschiedene Untersuchungen, Messungen und Berechnungen ukrainischer und russischer Fachleute, auch unabhängiger westlicher Expertengruppen sowie internationaler Teams weisen aus, dass etwa 96 % des Kernbrennstoffs in verschiedenen Modifikationen und an verschiedenen Stellen im Sarkophag verblieben sind. Die gasförmigen radioaktiven Spaltprodukte (Edelgase wie Krypton und Xenon) wurden gänzlich und die leicht flüchtigen (wie Jod und Cäsium) wurden zu großen Teilen freigesetzt. Die Bilanz des Kernbrennstoffs wurde sowohl durch Messung der freigesetzten Radioaktivität und der Kontaminationen nach dem Unfall als auch durch Messungen innerhalb des Sarkophags ermittelt.

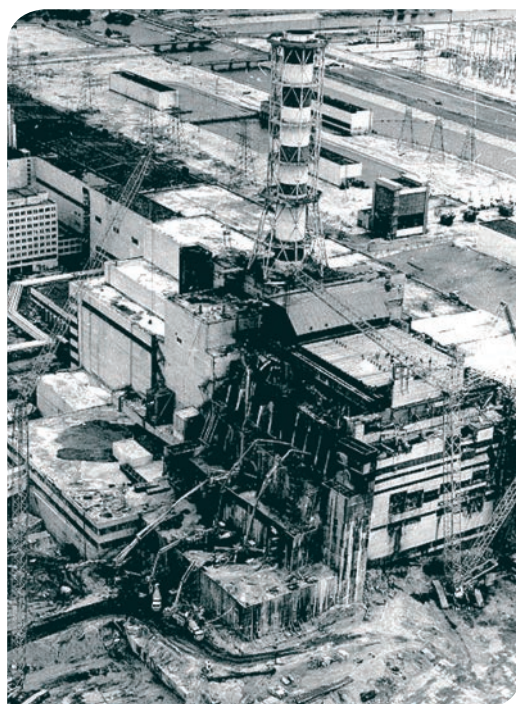
Während der aktiven Phase des Unfalls wurden einerseits die gasförmigen und luftgetragenen radioaktiven Freisetzungen gemessen und unter Berücksichtigung der meteorologischen Verhältnisse ausgewertet. Andererseits wurden die großflächig abgelagerten radioaktiven Kontaminationen mit internationaler Beteiligung bestimmt. Hieraus lässt sich mit Hilfe wissenschaftlich abgesicherter Modelle ableiten, dass insgesamt etwa 3 bis 4 % an radioaktivem Material freigesetzt wurde. Durch vielfältige Messungen und Berechnungen russischer, ukrainischer und weißrussischer Fachleute wurde zudem die im Sarkophag verbliebene Menge an abgebranntem Brennstoff abgeschätzt. Die in den letzten Jahren im Rahmen der „Deutsch-Französischen Initiative für Tschernobyl“ durchgeführten Überprüfungen dieser Informationen weisen aus, dass im Inneren des Sarkophags rund 150 t Kernbrennstoff nachgewiesen werden können. Weitere 30 t Kernbrennstoff werden dort vermutet. Ein Vordringen dorthin ist jedoch aufgrund von Verschüttungen und extrem hoher Strahlenpegel bisher nicht möglich.

#### **4 % des Kernbrennstoffs wurden freigesetzt**

Auch diese Abschätzung der im Sarkophag enthaltenen Kernbrennstoffmasse stützt die Aussage, dass etwa 96 % des abgebrannten Kernbrennstoffs dort verblieben sind. In dem im Jahr 2001 überarbeiteten Sicherheitsbericht des Sarkophags, der von der Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit (GRS) mbH begutachtet wurde (Peer Review), werden diese Freisetzungsteile erneut bestätigt.

Die Vorstellung, der Kernbrennstoff und die sonstigen radioaktiven Materialien ließen sich wieder zu einem Ganzen zusammenfügen, entspricht nicht den realen Bedingungen im Sarkophag. Während und nach der Explosion des Reaktors entstanden aus dem Kernbrennstoff aufgrund physikalischer und thermo-chemischer Prozesse verschiedene Modifikationen, vor allem Fragmente der Brennelemente, lavaartige Massen, die mit anderen Materialien verschmolzen oder vermischt sind, und Staub. Dadurch wurden ursprünglich nicht-radioaktive Materialien (Bautrümmer, Schutt) kontaminiert. Das Volumen an radioaktiven Materialien im Sarkophag hat sich dementsprechend drastisch vergrößert. Diese Materialien zählen zu den Stoffen, die entsprechend entsorgt werden müssen.

Die Aufschüttungen aus Sand, Kies und Beton, die nach der Explosion mit Hubschraubern in den offenen Reaktor abgeworfen wurden, konnten die vorhandenen Hohlräume nicht komplett ausfüllen. Daher muss bei der Abschätzung des Volumens der radioaktiven Materialien auch die Aktivitätskonzentration, das heißt die pro Kubikmeter ( $m^3$ ) enthaltene Radioaktivität, berücksichtigt werden, da dies Einfluss auf Art und Technologie einer möglichen späteren Bergung des radioaktiven Materials und dessen Entsorgung haben kann. Demzufolge ist eine Angabe des Volumens in  $m^3$  nahezu unmöglich. Das Volumen der radioaktiven Materialien, die entsorgt werden müssen, wird insgesamt auf mehrere 100.000  $m^3$  geschätzt.



**Abb. 06**

*Der havarierte Block 4 nach dem Unfall aus nordwestlicher Sicht*



## 1.3 Zustand des Sarkophags und des Kraftwerksstandorts

### **Zusammenfassung**

*Durch den großen Einsatz von Menschen und Material gelang es sowjetischen Spezialeinheiten innerhalb weniger Monate, einen Sarkophag um den beschädigten Block 4 zu errichten. Diese Gebäudehülle und umfangreiche Maßnahmen zur Dekontaminierung haben die Strahlung in der Umgebung erheblich reduziert. Über die Standsicherheit des Sarkophags liegen nur unvollständige Informationen vor. Derzeit werden umfangreiche Arbeiten zur Stabilisierung des Sarkophags, von denen die meisten mittlerweile abgeschlossen sind, und zur Errichtung eines zweiten Sarkophags im Rahmen des Shelter Implementation Plan (SIP) durchgeführt. Weiterhin sind komplexe Entsorgungsfragen zu lösen. Nach dem Unfall wurde radioaktives Material in zahlreichen provisorischen Zwischenlagern auf dem Kraftwerksgelände und in größeren Entfernungen deponiert. Von dem engeren Gebiet um den havarierten Reaktor herum werden noch für sehr lange Zeiträume Gefährdungen ausgehen. Die ukrainische Regierung hat ein Konzept für die Zukunft der Schutzzone erarbeitet. Am 15. Dezember 2000 wurde auch der zuletzt noch betriebene Block 3 abgeschaltet und das Kernkraftwerk Tschernobyl endgültig stillgelegt.*



**Abb. 07**

*Der Sarkophag um den Block 4 des Kernkraftwerks Tschernobyl nach der Fertigstellung*

Um die Freisetzung von Strahlung und radioaktiven Stoffen aus dem zerstörten Reaktor so schnell wie möglich zu reduzieren, wurde in wenigen Monaten eine Gebäudehülle (Sarkophag oder Shelter) um den zerstörten Block 4 unter Verwendung von Teilen des stark beschädigten Reaktorgebäudes und des Maschinenhauses errichtet. Die Wände haben eine Höhe von über 50 m. Aufgrund der Strahlungssituation und der Dringlichkeit war die erforderliche Zeit für die Bewertung der Standortbedingungen sowie für die bei solchen komplizierten Bauten übliche Projektierung der technischen Maßnahmen nicht vorhanden.

Beim Bau des Sarkophags wurden teilweise Reste des zerstörten Reaktorgebäudes genutzt, sofern diese nach dem Unfall noch brauchbar erschienen. Ein Teil der neu errichteten Baustrukturen stützt sich sogar auf Trümmern des zerstörten Blocks ab, über deren Zustand wenig bekannt ist. Viele Konstruktionsteile mussten fernbedient montiert werden, wobei die Bauteile nicht immer präzise in den vorgesehenen Positionen abgesetzt wurden. Auch konnten einige wesentliche Bauteile nicht verschraubt oder verschweißt, sondern nur aufgesetzt werden. Der jetzige Einschluss des Blocks 4 war ohnehin als Sofortmaßnahme für eine begrenzte Zeit von 20 bis 30 Jahren bis zur endgültigen Lösung konzipiert, wobei die Errichtung des Sarkophags angesichts des damals bestehenden Zeitdrucks eine große technische und logistische Leistung war.

Für die Bewältigung der Unfallfolgen sehen Fachleute es als günstig an, dass die Sowjetunion damals noch bestand. Wäre der Unfall nach dem politischen Zerfall geschehen, hätte es wohl an einer wirkungsvollen Organisation gemangelt, um die Probleme vergleichbar zu meistern. Am 30. November 1986, nach knapp sechs Monaten Bauzeit, stand der Sarkophag. Das sowohl für zivile als auch für militärische Aufgaben zuständige Ministerium für Mittleren Maschinenbau, das über eigene militärische Einheiten verfügte, hatte den Bau erstellt. Noch heute wird ständig am Sarkophag gearbeitet – vornehmlich zur Instandhaltung, Kontrolle und Verbesserung der Stabilität. Die Gebäudehülle und die Dekontaminationsmaßnahmen führten zu einer drastischen Reduzierung der Strahlung.

### **Unvollständige Informationen über den Bauzustand**

Fernbediente Montagevorgänge, der große Zeitdruck und neu auftretende Probleme sind die Ursachen dafür, dass heute die Informationen über die einzelnen Bauvorgänge lückenhaft sind. Es gibt viele unterschiedliche Informationen über den baulichen Zustand und davon möglicherweise ausgehende Gefährdungen, die zum Teil widersprüchlich sind. Unumstritten ist, dass die Standsicherheit des Sarkophags langfristig gefährdet ist. Naturereignisse wie Erdbeben, große Schneelasten oder Überflutungen könnten zu weiteren schädlichen Auswirkungen auf die Umgebung führen. Auch gegen Brände und Austritt radioaktiver Flüssigkeiten aus dem Sarkophag müssen Vorkehrungen getroffen werden. Derartige Ereignisse könnten lokal zu erheblichen zusätzlichen Strahlenexpositionen führen. Gravierende Auswirkungen wären aber selbst bei einem Einsturz des Sarkophags auf Entfernungen von weniger als 10 bis 20 km begrenzt.



Verschiedentlich wurden Befürchtungen geäußert, dass es zu einer erneuten Explosion des im Sarkophag verbliebenen Kernbrennstoffs kommen könnte. Die über viele Stellen im Sarkophag verteilten brennstoffhaltigen Materialien sind derzeit jedoch in einem deutlich unterkritischen Zustand. Das heißt, ein Wiederaufleben einer nuklearen Kettenreaktion ist auch unter ungünstigen Bedingungen sehr unwahrscheinlich. Zur Überwachung des unterkritischen Zustands wird die radioaktive Strahlung im Inneren, insbesondere die Neutronenstrahlung, gemessen. Mitte der 1990er-Jahre gab es aufgrund von Messanzeigen der im Inneren des Sarkophags installierten Neutronenüberwachungsdetektoren wiederholte Befürchtungen, dass durch eintretendes Regenwasser lokal möglicherweise ein kritischer Zustand erreicht werden könnte. Diese haben sich mittlerweile aufgrund der genauen Messergebnisse und Berechnungen als unbegründet erwiesen.



Allerdings können im Sarkophag verbliebene kernbrennstoffhaltige Aerosolpartikel, z. B. durch Öffnungen im Sarkophag und auch über den Abluftkamin des Lüftungssystems, in die Umgebung gelangen. Die gesamte freiwerdende Radioaktivität wird durch ein umfangreiches Messprogramm erfasst und dokumentiert. Danach unterschreiten die Emissionswerte für die luftgetragenen radioaktiven Ableitungen seit mehreren Jahren die für den Standort genehmigten Grenzwerte. Signifikante flüssige Ableitungen aus dem Sarkophag in die Umgebung, z. B. hervorgerufen durch Auswaschungen infolge eingedrungenen Regenwassers, konnten bisher nicht nachgewiesen werden. Die radioaktive Kontamination des Grundwassers am Standort infolge des ausgeworfenen radioaktiven Materials sanken in den letzten Jahren stark ab und befinden sich derzeit auf einem geringen Niveau.

#### Planungen für einen neuen Sarkophag

Bei den Planungen über die Zukunft des Sarkophags standen drei Varianten zur Debatte: Verfüllung mit Beton, Stabilisierung der bestehenden

Konstruktion sowie ein neues Schutzbauwerk. 1992 schrieb die Ukraine auf internationaler Ebene einen Konzeptwettbewerb zur Überführung des Blocks 4 in einen sichereren Zustand aus. Im Rahmen dieses Wettbewerbs, der von einer französischen Firma gewonnen wurde, favorisierte man die Variante eines neuen Schutzbauwerks. Die Europäische Kommission vergab 1994 eine Machbarkeitsstudie zur Ertüchtigung der Konstruktion und zur Errichtung eines neuen Schutzbauwerks an das Konsortium „Alliance“ unter Leitung dieser Firma. Im Ergebnis dieser Studie entstand ein Vorschlag, der vorsah, den zerstörten Block 4 sowie den unmittelbar angrenzenden und damals noch laufenden Block 3 einzuhüllen. Die Kosten für dieses Bauwerk „Sarkophag 2“ wurden auf 3 bis 4 Milliarden US-Dollar geschätzt. Voraussetzung für die Realisierung wäre die Stilllegung des Blocks 3 gewesen. Das Projekt wurde daher von der Ukraine abgelehnt und nicht weiter verfolgt. Stattdessen wurde von der Europäischen Kommission gemeinsam mit der Ukraine ein anderer Ansatz gewählt. In einer Studie, an der auch die GRS mitwirkte, definierte man die Anforderungen für die Kurzzeitsicherheit im Zeitraum der nächsten ca. 15 Jahre sowie für die Langzeitsicherheit im Zeitraum der nächsten ca. 100 Jahre. In einer weiteren Studie wurden parallel dazu praktische Maßnahmen untersucht und konzipiert, die diese Anforderungen erfüllen sollten.

Die zweite Studie führte durch Unterstützung der G7-Staaten zur Entwicklung des Shelter Implementation Plan (SIP) mit 22 Aufgaben, die in vier Aufgabenpakete unterteilt wurden. Die Realisierung erfolgt über den Chernobyl Shelter Fund (CSF), der von der European Bank for Reconstruction and Development (EBRD) verwaltet wird und durch zwei Geberkonferenzen auf ursprünglich 760 Millionen US-Dollar festgesetzt war. Anfang 2004 wurde die Summe auf 1,3 Milliarden US-Dollar erhöht und eine Verschiebung des Abschlusses von 2007 auf mindestens 2008 beschlossen. Derzeit geht man von einem weiteren Bedarf von mehreren Hundert Millionen US-Dollar und einer Fertigstellung nicht vor 2013 aus. Die Bergung und Entsorgung des im Inneren des Sarkophags verbliebenen Brennstoffs ist im SIP nicht vorgesehen. 2005 wurde das Konzept der Konstruktion des Sarkophags (New Safe Confinement – NSC) fertig gestellt. Weiterhin wurden seit 2005 Stabilisierungsmaßnahmen am Sarkophag durchgeführt, die im Wesentlichen 2008 abgeschlossen wurden, sowie vorbereitende Arbeiten für die Gründung des NSC im westlichen Baufeld (Erd-aushub usw.) aufgenommen. Im August 2007 erfolgte die Vergabe des Auftrags für den Bau des NSC an das Konsortium Novarka, das von französischen Bauunternehmen geleitet wird.

**Abb. 08**

*Brennstoffhaltige Materialien im Inneren des havarierten Blocks 4*

Ein weiteres Problem sind die kurz nach dem Unfall vergrabenen radioaktiven Auswürfe, die langfristig die Gefahr einer Grundwasserbelastung mit sich bringen. Das Risiko liegt in der Verschleppung kontaminierter Sedimente aus der Sperrzone bei Flusshochwasser. Insgesamt sind am Standort des Kernkraftwerks Tschernobyl komplexe Entsorgungsfragen zu lösen. Radioaktive Trümmer, verseuchter Boden und radioaktives Material wurden nach dem Unfall in mehreren stationären und rund 300 provisorischen Zwischenlagern auf dem Gelände des Kernkraftwerks und in größerer Entfernung deponiert. Zudem wird am Standort dringend neue Zwischenlagerkapazität benötigt, da die abgebrannten Brennelemente des Kernkraftwerks Tschernobyl von Russland nicht zurückgenommen werden und die vorhandenen Zwischenlager in der Ukraine praktisch voll sind.

Von dem Gebiet um Tschernobyl werden noch für sehr lange Zeiträume lokale Gefährdungen ausgehen. Im Auftrag der ukrainischen Regierung haben deshalb Fachleute des Tschernobyl-Ministeriums (mittlerweile Ministerium für außergewöhnliche Situationen, verantwortlich für die Untersuchung und Bewältigung der Unfallfolgen einschließlich der medizinischen und sozialen Fragen der betroffenen Bevölkerung und seit 2005 zuständig für sämtliche kerntechnischen Anlagen am Standort des Kernkraftwerks Tschernobyl) und der Akademie der Wissenschaften ein Konzept für die Zukunft der Schutzzone erarbeitet, das folgende Aufteilungen vorsieht:

- Eine Wirtschaftszone, in der die gesamte wirtschaftliche Tätigkeit einschließlich der erforderlichen Infrastruktur konzentriert wird. Dazu gehören unter anderem die Stilllegung aller Blöcke des Kernkraftwerks, die mittlerweile erfolgt ist. Denn der letzte noch laufende Block 3 wurde im Dezember 2000 abgeschaltet. Weiterhin die Maßnahmen zur Sicherung des ersten Sarkophags, zur Errichtung des Sarkophags 2 sowie die Entsorgung aller radioaktiven Abfälle vom Standort.
- Ein Gebiet, in dem jede Tätigkeit, die Einfluss auf das Ökosystem hat, verboten ist. In diesem Gebiet soll die eigenständige Regeneration der Natur verfolgt werden.
- Ein Gebiet der begrenzten Nutzung, in dem Arbeiten zur Wiederherstellung des Ökosystems, insbesondere forstwirtschaftliche Tätigkeiten, sowie wissenschaftliche Arbeiten zugelassen sind.
- Eine Pufferzone, in der die radioaktive Belastung gering ist. Die Planung sah vor, dass in dieser Zone nach entsprechender Regeneration

der Ökosysteme wieder eine wirtschaftliche Nutzung, insbesondere für Land- und Forstwirtschaft, zugelassen werden sollte.

In der Wirtschaftszone sollen leistungsfähige Kapazitäten vor allem für die Verarbeitung der radioaktiven Abfälle geschaffen werden. Dabei rechnet die Ukraine mit internationaler Unterstützung in Form von modernen Technologien und finanziellen Mitteln.

Durch umfangreiche Arbeiten zur Bewältigung der Folgen des Unfalls am Block 4, insbesondere durch intensive Dekontaminierungsarbeiten, waren 1986/1987 aus ukrainischer Sicht die Voraussetzungen für einen Weiterbetrieb der Blöcke 1, 2 und 3 geschaffen worden. Für das Personal des Kraftwerks wurde die neue Siedlung Slavutich außerhalb der 30-km-Sperrzone errichtet. Nachdem 1991 durch einen Brand im Maschinenhaus der Block 2 schwer beschädigt wurde, fasste das Ukrainische Parlament den Beschluss, die in Betrieb befindlichen Blöcke 1 und 3 nach 1993 abzuschalten und den Block 2 in Warteposition zu halten. Am 20. Oktober 1993 revidierte die Ukraine allerdings aufgrund der angespannten Energiesituation des Landes diesen Beschluss und führte den Betrieb des Blocks 1 für drei weitere Jahre, den des Blocks 3 für sieben weitere Jahre fort. Erst im September 2000 verfügte der Präsident der Ukraine durch einen Erlass, nicht zuletzt auch wegen des großen internationalen Drucks, die endgültige Schließung des Kernkraftwerks.

Ende 2010 hatten die Stilllegungsarbeiten an den vier Blöcken des Kernkraftwerks Tschernobyl folgenden Stand: Bei dem durch den Unfall völlig zerstörten Block 4 wird an der Schaffung eines ökologisch sicheren Einschlusses gearbeitet. Block 1 wurde im November 1996 endgültig stillgelegt. Ende 1998 wurde die Genehmigung für die Beendigung des Betriebs und die Entladung des Kernbrennstoffs erteilt, die Entladung ist inzwischen erfolgt. Es laufen Arbeiten zur Entsorgung der radioaktiven Abfälle. Block 2 ist seit dem Brand im Maschinenhaus im Oktober 1991 außer Betrieb. Im März 1999 fasste die Regierung der Ukraine den Beschluss zur Beendigung des Betriebs. Der Brennstoff wurde vollständig in die Abklingbecken entladen. Block 3 ist seit dem 6. Dezember 2000 durch Auslösung der Reaktorschnellabschaltung (Leck im Kontrollbereich) außer Betrieb. Am 15. Dezember 2000 erfolgte die offizielle Beendigung des Betriebs und damit der Gesamtanlage durch den Erlass. Die Entsorgung des Kernbrennstoffs aus den Abklingbecken der Blöcke 1, 2 und 3 in das Nasslager ISF1 am Standort des Kernkraftwerks soll nach ukrainischen Einschätzungen 2011 abgeschlossen sein. Bis dahin befinden sich die drei Blöcke in der Nachbetriebsphase.

Strahlenexposition und  
gesundheitliche Auswirkungen

2

## 2.1 Aktivitätsfreisetzung und weiträumige Kontamination

### Zusammenfassung

In den ersten zehn Tagen nach dem Tschernobyl-Unfall am 26. April 1986 wurden große Mengen radioaktiver Stoffe freigesetzt. Durch die Hitze des Graphitbrandes gelangten gasförmige und leichtflüchtige Radionuklide in eine Höhe bis etwa 1.500 Meter und verteilten sich in weiten Teilen Europas. Wenn Regen zeitlich mit der Kontamination der Luft zusammenfiel, kam es zu hohen, oft fleckenförmigen Ablagerungen radioaktiver Stoffe am Boden. Neben der direkten Umgebung des Reaktors waren vor allem westliche Gebiete Russlands, die nördliche Ukraine und Weißrussland betroffen.

In der ehemaligen Sowjetunion umfassten Gebiete mit größeren Ablagerungen von radioaktivem Cäsium-137 als  $37 \text{ kBq/m}^2$  insgesamt  $146.110 \text{ km}^2$ . In diesem Gebiet wohnten 6,1 Millionen Menschen. Auch in Skandinavien und in Südosteuropa bis nach Süddeutschland gab es Gebiete mit Kontaminationen, die  $37 \text{ kBq/m}^2$  überschritten.

Radionuklid	Halbwertszeit	Freigesetzte Aktivität (PBq) <sup>1</sup>
Edelgase		
Krypton-85	11 Jahre	33
Xenon-133	5 Tage	6.500
leichtflüchtige Elemente		
Tellur-132	3 Tage	1.000
Jod-131	8 Tage	1.800
Cäsium-134	2 Jahre	47
Cäsium-137	30 Jahre	85
mittelflüchtige Elemente		
Strontium-90	29 Jahre	10
nicht flüchtige Elemente inklusive Kernbrennstoffteilchen		
Plutonium-239	24.000 Jahre	0,013
Plutonium-240	6.500 Jahre	0,018

1. Eine Aktivität von einem Petabecquerel (1 PBq) bedeutet, dass pro Sekunde  $10^{15}$  (1 Billionen) Atome des betreffenden Radionuklids zerfallen. Die Aktivität nimmt exponentiell mit der für die einzelnen Radionuklide angegebenen Halbwertszeit ab.

Tab. 02

Durch den Tschernobyl-Unfall in die Atmosphäre freigesetzte Aktivität für einige relevante Radionuklide

#### Quelle:

UNSCEAR 2008 Report  
„Sources and effects of ionizing radiation“

### Aktivitätsfreisetzung

Bedingt durch die schwere Beschädigung am Reaktor und die sich anschließenden Maßnah-

men zur Bekämpfung des Brandes und zum Abschluss des Unfallgebäudes lassen sich vier Phasen der Aktivitätsfreisetzung unterscheiden:

1. Durch die Explosion am 26. April 1986 wurden Spaltprodukte und Brennstoffanteile aus dem Reaktorgebäude geschleudert. Wegen des starken thermischen Auftriebs gelangten sie zum Teil in große Höhen.
2. Die zweite Phase der Freisetzung dauerte vom 27. April bis zum 1. Mai. Durch die ersten Schutzmaßnahmen ging die Freisetzung zunächst zurück. Die aus Hubschraubern abgeworfenen Abdeckungsmaterialien reduzierten auch den thermischen Auftrieb.
3. In der Zeit vom 2. bis 5. Mai erhöhte sich durch die Abdeckung die Temperatur im zerstörten Reaktor. Dies führte zu einem erneuten Anstieg der Schadstofffreisetzung.
4. Mit der Inbetriebnahme eines Stickstoffkühlsystems unter der Reaktorgrube sank die Freisetzung ab dem 5. Mai erheblich und nahm in der Folge kontinuierlich weiter ab.

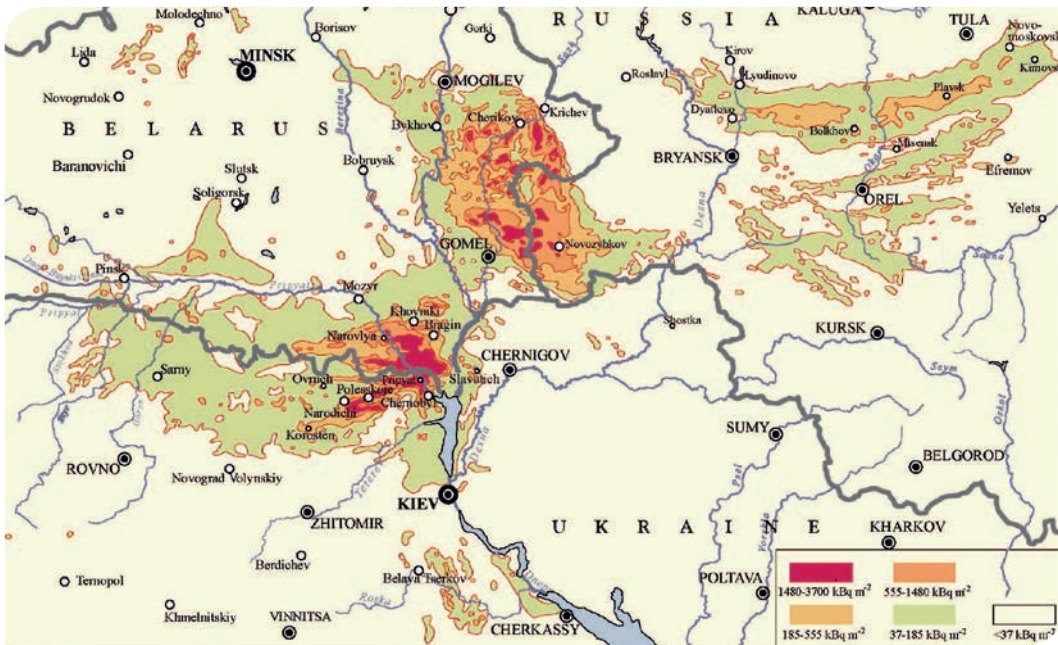
Die radioaktiven Edelgase, die sich zum Zeitpunkt des Unfalls im Reaktorgebäude befanden, wurden im Wesentlichen während der Explosion freigesetzt. Xenon-133 trug mit 6.500 PBq den größten Teil zur freigesetzten Aktivität bei (Tab. 02). Trotz dieser hohen Aktivität bewirkten die Edelgase nur relative geringe Strahlenexpositionen der Bevölkerung, da sie sich weder auf Pflanzen noch nach Einatmen in der Lunge ablagern.

Die leichtflüchtigen Spaltprodukte Jod-131 und Cäsium-137 trugen wesentlich zur Strahlenexposition der Bevölkerung bei. Ihre freigesetzten Aktivitäten, 1.800 PBq Jod-131 und 85 PBq Cäsium-137, waren nach Angaben von UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation) allerdings deutlich geringer als die global bei Atomwaffentests freigesetzten Aktivitäten (675.000 PBq Jod-131 und 948 PBq Cäsium-137).

Die schwerer löslichen Elemente Strontium und Plutonium wurden im Wesentlichen in der näheren Umgebung des Unfallreaktors abgelagert und hatten keine größere radiologische Relevanz.

### Weiträumige Ausbreitung der Radionuklide

Durch die Hitze des Graphitbrandes wurden vor allem gasförmige und leichtflüchtige radioaktive Stoffe in Höhen von mehr als 1.500 Metern getragen. Die am Unfalltag freigesetzten Schadstoffe gelangten durch den vorherrschenden Südost-



**Abb. 09**  
 Nach dem Tschernobyl-Unfall  
 in Gebieten Russlands,  
 Weißrusslands und der Ukraine  
 abgelagerte Cs-137-Aktivität

Quelle:  
 UNSCEAR 2008 Report

wind und dann Südwind über Weißrussland in den skandinavischen Raum und erreichten am 28. April das Baltikum, Schweden und Finnland. Die Emissionen des 27. April zogen zunächst über Polen nach Osten. Dann wurden sie nach Deutschland, insbesondere Süddeutschland, umgelenkt. Im weiteren Verlauf überquerte diese Wolke Nordfrankreich und Großbritannien. Durch wechselnde Windrichtungen wurde in den folgenden Tagen wesentliche Teile der Aktivität über Europa verteilt. Davon waren insbesondere Gebiete in Skandinavien und in Südosteuropa bis nach Süddeutschland betroffen. Am 3. Mai wurden die Radionuklide in Japan, ab dem 5. Mai in Kanada und in den USA gemessen. In den Folge Monaten sanken die Aktivitätskonzentrationen in der Luft kontinuierlich ab. Zum Jahresende 1986 war in Deutschland bei Messungen der Luftaktivität ein Niveau wie vor dem Unfall erreicht.

Wesentliche Anteile der Radionuklide in der Atmosphäre können durch Regenereignisse auf die Vegetation abgelagert werden. Vom 26. April bis zum 30. Mai fiel in der Unfallregion selbst kein starker Niederschlag. Regenwolken, die sich in diese Richtung bewegten, wurden vorzeitig künstlich abgeregnet. In anderen Gebieten führ-

ten Regenereignisse zu einer sehr inhomogenen Verteilung der Kontamination (Abb. 09, Abb. 12). Die betroffenen Gebiete der ehemaligen Sowjetunion wurden anhand der Bodenablagerung von Cäsium-137 in Zonen mit 37 bis 185 kBq/m<sup>2</sup>, 185 bis 555 kBq/m<sup>2</sup>, 555 bis 1.480 kBq/m<sup>2</sup> und über 1.480 kBq/m<sup>2</sup> eingeteilt. Die insgesamt fast 150.000 km<sup>2</sup> kontaminierter Flächen verteilen sich nahezu gleichmäßig auf Russland, die Ukraine und Weißrussland (Tab. 03). Die höher kontaminierten Gebiete liegen allerdings überwiegend in Weißrussland, insbesondere in den Oblasts (vergleichbar mit Regierungsbezirken in Deutschland) Gomel und Mogilev.

In den Gebieten Russlands, der Ukraine und Weißrusslands mit einer Cäsium-137-Ablagerung von über 37 kBq/m<sup>2</sup> lebten nach Angaben von UNSCEAR etwa 6,1 Millionen Menschen. In den höher kontaminierten Gebieten (> 185 kBq/m<sup>2</sup>) lebten 840 Tausend Menschen, davon 330 Tausend in Weißrussland und 335 Tausend in Russland. Demgegenüber waren von der Jod-131-Kontamination im Wesentlichen der Norden und Nordwesten der Ukraine und der Süden und Südosten Weißrusslands betroffen.

Land	Abgelagerte Cäsium-137 Aktivität (kBq/m <sup>2</sup> )				Gesamt
	37 – 185	185 – 555	555 – 1.480	> 1.480	
Russland	49.760	5.450	2.130	310	57.650
Ukraine	37.200	3.200	900	600	41.900
Weißrussland	29.900	10.200	4.200	2.200	46.500
Andere	60				60
<b>Gesamt</b>	<b>116.920</b>	<b>18.850</b>	<b>7.230</b>	<b>3.110</b>	<b>146.110</b>

**Tab. 03**  
 Nach dem Tschernobyl-Unfall  
 kontaminierte Flächen (km<sup>2</sup>) in den  
 europäischen Gebieten der ehemaligen  
 Sowjetunion mit unterschiedlichen  
 Cäsium-137-Aktivitätsablagerungen

Quelle:  
 UNSCEAR 2000 Report



## 2.2 Strahlenexposition betroffener Personengruppen

### Zusammenfassung

Neben Mitarbeitern des Kernkraftwerks und Notfall-Freiwilligen wie den Feuerwehrleuten kamen im Laufe der Jahre eine große Anzahl von Personen auf dem Reaktorgelände und in der 30-km-Zone bei Aufräumarbeiten zum Einsatz. Für 247 Tausend dieser Personen liegen Schätzungen der effektiven Dosen durch externe Exposition mit Gamma- und Röntgenstrahlung vor. Davon hatten 762 effektive Dosen, die größer als 500 mSv waren. Ansonsten sind die effektiven Dosen relativ gleichmäßig über fünf Dosisgruppen unterhalb von 500 mSv verteilt.

Wegen der hohen Strahlenexposition wurden etwa 135.000 Einwohner aus einer Zone mit einem Radius von 30 km um den zerstörten Reaktor innerhalb der ersten 10 Tage nach dem Unfall umgesiedelt. Durch den Verzehr kontaminierter Milch wurden teilweise sehr hohe Aktivitätsmengen von Jod-131 inkorporiert: Fast 5 % der evakuierten Vorschulkinder erhielten Schilddrüsendosen, die höher als 5.000 mGy waren.

Von 1,6 Millionen Kindern und Jugendlichen in Orten und Städten, in denen jeweils mehr als 10 Messungen der Jod-131-Aktivität in der Schilddrüse gemessen wurden, erhielten ca. Hunderttausend Schilddrüsendosen, die größer als 300 mGy waren. Ein Großteil der Schilddrüsenexpositionen der Bewohner kontaminierter Gebiete hätte durch rechtzeitige Information, Verzehrsbeschränkungen und zur Verfügung stellen weniger belasteter Nahrungsmittel aus anderen Landesteilen vermieden werden können.

### Infobox 01

Organ-spezifische Energiedosen und effektive Dosis

In den sehr hoch kontaminierten Gebieten Russlands und Weißrusslands mit einer Cäsium-137-Aktivität größer als 1.480 kBq/m<sup>2</sup> lag die effektive Dosis durch andere Radionuklide als radioaktives Jod im Jahr 1986 bei ca. 50 mSv. Die für die ersten 20 Jahre abgeschätzten Dosen unterscheiden sich sehr entsprechend der Gegenmaßnahmen, die in den einzelnen Ländern durchgeführt wurden. Der Wert liegt bei 90 mSv für Weißrussland, wo viel in Gegenmaßnahmen investiert wurde. Für die Ukraine wurde eine mittlere effektive Dosis in Höhe von ca. 250 mSv abgeschätzt.

### Betriebsmannschaft, Feuerwehrleute und Aufräumarbeiter

Neben Mitarbeitern des Kernkraftwerks und Notfall-Freiwilligen wie den Feuerwehrleuten kamen im Laufe der Jahre eine große Anzahl von Personen, insbesondere auch von Armeeingehörigen, auf dem Reaktorgelände und in der 30-km-Zone bei Aufräumarbeiten zum Einsatz. Diese gesamte Personengruppe wird im Folgenden kurz unter dem Begriff Aufräumarbeiter zusammengefasst.

Dazu gehören neben den hoch exponierten Arbeitern der ersten Tage auch Personen mit geringen Expositionen wie medizinisches und versorgendes Personal.

Die Energiedosis in einem Organ ist die je Masseneinheit durch ionisierende Strahlung deponierte Energie. Sie hat die Einheit J/kg (Joule pro Kilogramm) mit dem speziellen Namen Gray (Gy).

Im Strahlenschutz wird die effektive Dosis benutzt, um die mögliche Gefährdung durch verschiedenartige Expositionen mit ionisierender Strahlung zu vergleichen. Die effektive Dosis ist ein gewichteter Mittelwert von Energiedosen in den einzelnen Organen und Geweben des menschlichen Körpers. Bei der Berechnung wird die biologische Wirksamkeit der unterschiedlichen Strahlenarten berücksichtigt. Die effektive Dosis hat die Einheit Sievert (Sv).

Wird nur ein Organ des Körpers exponiert, so ist die effektive Dosis gleich dem Produkt aus der Energiedosis des Organs und dem betreffenden Umrechnungsfaktor. Nach einer Inkorporation von Jod-131 wird im Wesentlichen nur die Schilddrüse exponiert. Der Umrechnungsfaktor beträgt 0,04 Sv/Gy. Nach Inkorporation von Jod-131 entspricht demzufolge eine Energiedosis der Schilddrüse von 250 mGy einer effektiven Dosis von 10 mSv.

Die jährliche effektive Dosis durch die natürliche Strahlenexposition beträgt in Deutschland im Mittel 2,1 mSv. Je nach Wohnort, Ernährungs- und Lebensgewohnheiten liegen individuelle jährliche Dosen typischerweise im Bereich von 1 bis zu 10 mSv. Die Exposition der Lungen durch das Einatmen von Radon und seinen Tochternukliden trägt den größten Anteil zur natürlichen Strahlendosis bei.

Effektive Dosen durch medizinische und technische Anwendungen liegen im Mittel über die bundesdeutsche Bevölkerung bei 2 mSv. Der Hauptbeitrag kommt hier von medizinisch diagnostischen Anwendungen.

In den in mehreren Nachfolgestaaten der ehemaligen Sowjetunion für Aufräumarbeiter geführten Register sind nach Angaben von UNSCEAR etwa 526 Tausend Personen erfasst, davon 229 Tausend in der Ukraine und 188 Tausend in Russland. Für viele Aufräumarbeiter ist die Höhe der Strahlenexposition nicht bekannt, da der überwiegende Teil keine Dosimeter trug. Nur für einen Teil von ihnen wurden Abschätzungen der Strahlenexpositionen durchgeführt. Für 247 Tausend der Aufräumarbeiter liegt eine Messung oder Abschätzung der externen Exposition durch Gamma- und Röntgenstrahlung vor. Die höchsten Dosen wurden für diejenigen registriert, die im Jahr des Unfalls zum Einsatz kamen. Ihre mittlere effektive Dosis (Infobox 01) betrug ca. 150 mSv<sup>1</sup>. Für 762 Aufräumarbeiter war die effektive Dosis durch die externe Strahlung größer als 500 mSv (Tab. 04). Ansonsten sind die effektiven Dosen

Dosisgruppe (mSv)	Aufräumarbeiter mit Abschätzung der externen Exposition	
	Anzahl	Prozentualer Anteil
< 20	36.500	15
20 – 50	48.600	20
50 – 100	63.400	26
100 – 200	48.000	19
200 – 500	49.600	20
> 500	762	0,3
Alle	247.000	100

**Tab. 04**

Effektive Dosis durch externe Gamma- und Röntgenstrahlung für 247 Tausend Aufräumarbeiter<sup>1</sup>

**Quelle:**

UNSCEAR 2000 Report

relativ gleichmäßig über fünf Dosisgruppen unterhalb von 500 mSv verteilt.

Die Dosis ungeschützter Haut der im Reaktor zum Einsatz gekommenen Aufräumarbeiter durch die Exposition mit Betastrahlung wird auf ein Mehrfaches der Dosis durch die externe Gamma- und Röntgenstrahlung abgeschätzt. Die Kleidung schirmte allerdings einen Großteil der Betastrahlung ab. Es wurde abgeschätzt, dass die Augenlinsendosis durch Betastrahlung für die meisten Aufräumarbeiter geringer war als diejenige durch die externe Gamma- und Röntgenstrahlung. In einigen Fällen war sie aber bis zu 3,5-mal höher.

Effektive Dosen durch die Inkorporation von Radionukliden waren in der Regel deutlich geringer als die Dosen durch die externe Gamma- und Röntgenstrahlung.

#### **Evakuierte aus der 30-km-Zone**

Wegen der hohen Strahlenexposition wurden etwa 135.000 Einwohner aus einer Zone mit einem Radius von 30 km um den zerstörten Reaktor umgesiedelt. Die 49.000 Einwohner der drei Kilometer vom Reaktor entfernten Stadt Pripjat wurden innerhalb der ersten 40 Stunden nach Beginn der Katastrophe evakuiert, die restliche 30-km-Zone wurde nach acht bis zehn Tagen geräumt.

Ein wichtiger Expositionspfad der Einwohner von Pripjat war die Inhalation von radioaktivem Jod, das sich in der Schilddrüse anreichert. Die rechtzeitige Einnahme von Kaliumjodidtabletten reduzierte die Schilddrüsens dosis um fast eine Größenordnung. Allerdings erhielten zwei Drittel der Einwohner von Pripjat entweder die Tabletten nicht am ersten Tag, an dem sie erforderlich gewesen wären, oder sie erhielten gar keine Kaliumjodidtabletten. Nach Angaben von UNSCEAR lag die mittlere Energiedosis der Schilddrüse bei 370 mGy. Die Dosis bei Vorschulkindern war im Mittel drei Mal so hoch. Viele der erst später evakuierten Einwohner der 30-km-Zone tranken mit Jod-131 kontaminierte Milch, deren Konsum erst

mehrere Tage nach dem Unfall eingeschränkt wurde. Insgesamt wurde die mittlere Energiedosis in der Schilddrüse aller Evakuierten auf 490 mGy abgeschätzt. Fast 5 % der evakuierten Vorschulkinder erhielt Schilddrüsensdosen, die höher als 5.000 mGy waren.

Die effektive Dosis durch externe Strahlung und durch Inkorporation anderer Radionuklide als radioaktives Jod lag für die Evakuierten in der gleichen Größenordnung wie diejenige durch radioaktives Jod. Die Exposition war jedoch gleichmäßiger über den ganzen Körper verteilt. Die mittlere effektive Dosis durch externe Strahlung lag bei 25 mSv, diejenige durch andere inkorporierte Radionuklide als radioaktives Jod bei 10 mSv.

Auch fast 25 Jahre nach dem Unfall sind noch keine Maßnahmen für eine Rückbesiedelung der 30-km-Zone durchgeführt worden.

#### **Bewohner hoch belasteter Gebiete außerhalb der 30-km-Zone**

Wegen ihrer besonderen Bedeutung für die gesundheitlichen Folgen wird hier zunächst die Energiedosis in der Schilddrüse durch Jod-131 dargestellt und anschließend die effektiven Dosen durch andere Radionuklide.

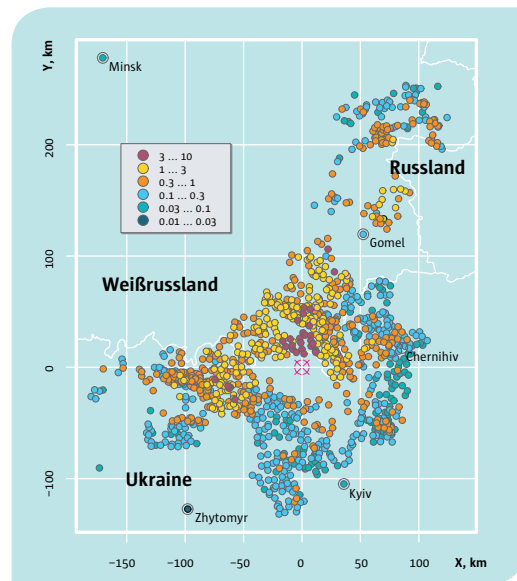
#### *Schilddrüsensdosis durch radioaktives Jod*

Die Bewohner der hoch belasteten Gebiete nahmen das radioaktive Jod überwiegend durch den Verzehr kontaminierter Milch auf. Da Jod-131 eine Halbwertszeit von acht Tagen hat, war die Milch über einen Zeitraum von mehreren Wochen mit dem Radionuklid kontaminiert. Die Beiträge anderer inkorporierter Radionuklide und der externen Exposition zur Schilddrüsensdosis waren für die Bewohner der kontaminierten Gebiete relativ gering. Ein Großteil der Schilddrüsensexpositionen hätte durch rechtzeitige Information, Verzehrsbeschränkungen und zur Verfügung stellen weniger belasteter Nahrungsmittel aus anderen Landesteilen vermieden werden können. Auch wurden

<sup>1</sup> Im UNSCEAR 2008 Report sind Energiedosen durch externe Exposition mit Gamma- und Röntgenstrahlung angegeben. Die Umrechnung in effektive Dosen hängt von den Eigenschaften des Strahlenfelds ab. Hier wird näherungsweise ein Umrechnungsfaktor von 1 Sv/Gy verwendet.

nur im geringen Maße und oft viel zu spät Tabletten mit stabilem Jod zur Verringerung der Schilddrüsendosis verteilt. Demgegenüber hat in Polen die rechtzeitige Gabe von Tabletten mit stabilem Jod eine Zunahme von Schilddrüsenkrebs Erkrankungen erfolgreich verhindert.

In Russland, der Ukraine und Weißrussland wurden in den ersten Wochen nach dem Unfall mehrere Hunderttausend Messungen des Jod-131-Gehalts in der Schilddrüse der Bewohner der hoch kontaminierten Gebiete durchgeführt. Obwohl diese Messungen teilweise unter nicht optimalen Bedingungen und mit nicht hinreichend ausgebildetem Personal durchgeführt wurden, geben sie doch einen Überblick über die radiologische Situation. Abbildung 10 zeigt die mittlere Schilddrüsendosis von Kindern und Jugendlichen durch Jod-131 in 1.024 ukrainischen und weißrussischen Orten und Städten, in denen jeweils Messungen an mehr als 10 Einwohnern durchgeführt wurden. Von den insgesamt 1,6 Millionen Einwohnern der Geburtsjahrgänge 1968 bis 1985 erhielten ca. Hunderttausend Personen Schilddrüsendosen, die größer als 300 mGy waren.



**Abb. 10**

Mittlere Energiedosen in der Schilddrüse (Gy) von Kindern und Jugendlichen in ukrainischen und weißrussischen Ortschaften und Städten, in denen in den ersten Wochen nach dem Tschernobyl-Unfall mehr als 10 Messungen des Jod-131-Gehalts in der Schilddrüse durchgeführt wurden.

**Quelle:**

Radiation Research 2006

#### Effektive Dosen durch andere Radionuklide als radioaktives Jod

Für die effektive Dosis der Bevölkerung in den hoch belasteten Gebieten ist neben der anfänglichen Exposition durch radioaktives Jod auf lange Sicht die Kontamination der Böden mit Cäsium-137 entscheidend. In den ersten Jahren war auch Cs-134 von Bedeutung. Beide Radionuklide bewirken eine relative homogene Exposition des ganzen Körpers. Tabelle 05 gibt einen Überblick über die effektiven Dosen in den ersten 20 Jahren nach dem Tschernobyl-Unfall.

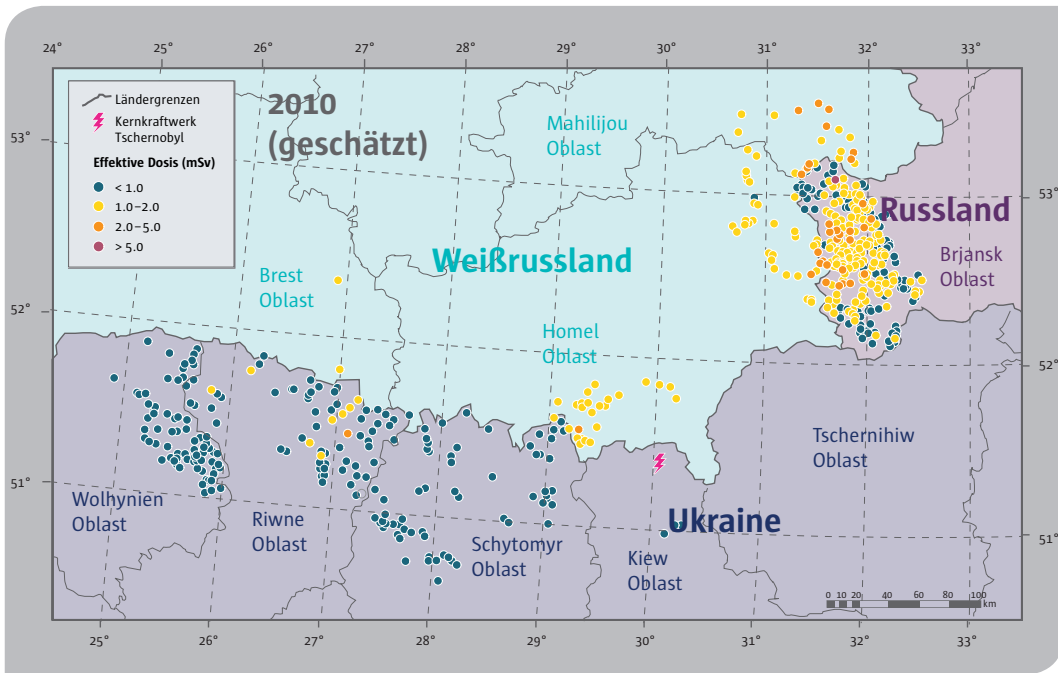
In den Gebieten mit einer abgelagerten Cäsium-137-Aktivität im Bereich von 37 bis 185 kBq/m<sup>2</sup> lag die effektive Dosis durch andere Radionuklide als radioaktives Jod im Jahr 1986 bei ca. 2 mSv. Dies entspricht einer Verdoppelung der natürlichen Strahlenexposition. In den ersten 20 Jahren ergab sich insgesamt eine Dosis in der Größenordnung von 5 mSv. Dieses Gebiet zählte 5,5 Millionen Einwohner. Die Kollektivdosis (Produkt aus Anzahl der Personen und mittlerer effektiver Dosis in den ersten 20 Jahren) in diesem Gebiet war aufgrund der großen Einwohnerzahl vergleichbar mit der Kollektivdosis in allen höher kontaminierten Gebieten zusammen.

In den sehr hoch kontaminierten Gebieten Russlands und Weißrusslands mit einer Cäsium-137-Aktivität größer als 1.480 kBq/m<sup>2</sup> lag die effektive Dosis durch andere Radionuklide als radioaktives Jod im Jahr 1986 bei ca. 50 mSv. In der Ukraine wurde sogar ein mittlerer Wert von fast 90 mSv abgeschätzt. In den hoch kontaminierten Gebieten der Ukraine befinden sich überwiegend Böden mit einem hohen Cäsium-Transfer ins Gras. Dies führt zu hohen Cäsium-Konzentrationen in der Milch. Die für die ersten 20 Jahre abgeschätzten Dosen unterscheiden sich sehr entsprechend der Gegenmaßnahmen, die in den einzelnen Ländern durchgeführt wurden. Der Wert liegt bei 90 mSv für Weißrussland, wo viel in Gegenmaßnahmen investiert wurde. Für die Ukraine wurde eine mittlere effektive Dosis in Höhe von ca. 250 mSv abgeschätzt.

Der wesentliche Teil der effektiven Dosis der Bevölkerung durch andere Radionuklide als radioaktives Jod ergab sich aus der externen Strahlung vom kontaminierten Boden. Sie trug ca. zwei Drittel zur gesamten effektiven Dosis bei. Für die höher kontaminierten Gebiete in der Ukraine lag der Anteil sogar über 80 %, da sich in der Ukraine Gegenmaßnahmen fast ausschließlich auf die Reduktion der Kontamination von Lebensmitteln beschränkten. In mehreren russischen und weißrussischen Ortschaften wurde zur Reduktion der externen Exposition die obere Erdschicht abgetragen sowie Plätze und Straßen asphaltiert oder mit Kunststoff beschichtet. In umfangreichen Messkampagnen wurden Einwohner mit Thermolumineszenz-Dosimetern ausgestattet, um die für die Abschätzung der externen Expositionen verwendeten Modelle zu überprüfen.

Der Verzehr von kontaminierten Nahrungsmitteln führte zu internen Strahlenexpositionen der Bevölkerung. Die größte Rolle spielt hierbei Milch. In einigen Gebieten trugen auch belastete Pilze wesentlich zur internen Strahlenexposition bei. Kontinuierlich im gesamten Zeitraum seit dem Unfall werden in hoch belasteten Gebieten die





**Abb. 11**  
Effektive Dosis im Jahr 2010 für die kritische Gruppe in 541 am stärksten betroffene Ortschaften in Russland, der Ukraine und Weißrussland

**Quelle:**  
Science of the Total Environment 2009

Lebensmittelkontaminationen und die Cäsium-137-Ganzkörpergehalte von Einwohnern gemessen. Es wurden umfangreiche Maßnahmen zur Reduktion der Milchkontamination durchgeführt. Insbesondere wurden Wiesen und Weideflächen gepflügt, gedüngt und mit Grassorten angesät, die eine geringe Cäsiumaufnahme aus dem Boden aufweisen („radical improvement“).

In einer umfassenden Studie wurden radioökologische Daten für die 541 Ortschaften erhoben, für die offizielle Dosisberechnungen für das Jahr 2006 eine effektive Dosis durch den Tschernobyl-

Unfall von mehr als 1 mSv ergaben. Basierend auf diesen Daten wurde die effektive Dosis für die kritische Gruppe in den einzelnen Ortschaften berechnet. Die Dosis der kritischen Gruppe wurde als die mittlere Dosis der am höchsten exponierten 10 % der Einwohner definiert. Es wurde vorhergesagt, dass im Jahr 2010 die effektive Dosis der kritischen Gruppe in 251 Ortschaften den Wert von 1 mSv und in 33 Ortschaften den Wert von 2 mSv überschreitet. Die Kollektivdosis in den 541 Ortschaften wurde für das Jahr 2010 auf 52 Personen-Sv abgeschätzt (Abb. 11).

Land	Abgelagerte Cs-137-Aktivität (kBq/m <sup>2</sup> )	Effektive Dosis (mSv)		Bevölkerung (Tausend)	Kollektivdosis (Personen-Sv)
		1986	1986-2005		
Russland	37 - 185	1,6	4,0	2.131	8.400
	185 - 555	6,2	17	243	4.100
	555 - 1.480	13	40	85	3.400
	> 1.480	47	145	7,0	1.000
Ukraine	37 - 185	2,5	8,2	1.876	15.600
	185 - 555	8,0	23	132	3.100
	555 - 1.480	26	70	23	1.600
	> 1.480	88	259	2,4	600
Weißrussland	37 - 185	2,2	5,4	1.540	8.380
	185 - 555	8,9	26	230	6.050
	555 - 1.480	20	61	85	5.220
	> 1.480	39	86	14	1.190

**Tab. 05**  
Effektive Dosis und Kollektivdosis durch andere Radionuklide als radioaktives Jod für den Zeitraum 1986 bis 2005 und für die Bevölkerung hoch belasteter Gebiete

**Quelle:**  
UNSCEAR 2008 Report

## 2.3 Gesundheitliche Folgen

### Zusammenfassung

Bei 134 Mitgliedern der Betriebsmannschaften und Feuerwehrleuten, die sich zum Zeitpunkt des Unfalls und unmittelbar im Anschluss daran am Reaktor aufhielten, wurde eine akute Strahlenerkrankung (acute radiation syndrome, ARS) diagnostiziert, an der 28 verstarben. Studien großer Gruppen von Aufräumarbeitern, die auch später zum Einsatz kamen, ergeben die Evidenz für eine Erhöhung der Leukämieraten unter den höher Exponierten.

In der Bevölkerung der kontaminierten Gebiete waren die effektive Dosen, das heißt insbesondere die Energiedosen des Knochenmarks, zu niedrig, um mögliche Erhöhungen der Leukämie-Erkrankungsrate mit den zur Verfügung stehenden Studiendesigns nachweisen zu können.

Demgegenüber führten die hohen Schilddrüsen-dosen von Kindern und Jugendlichen zu einer deutlichen Erhöhung der Schilddrüsenkrebs-Erkrankungsrate seit 1990. Die Anzahl gemeldeter Fälle wurde zusätzlich durch andere Faktoren erhöht. Es konnte bisher keine strahlenbedingte Erhöhung der Schilddrüsenkrebs-Erkrankungsrate unter denjenigen nachgewiesen werden, die als Erwachsene durch den Tschernobyl-Unfall exponiert wurden.

Bezüglich anderer solider Krebsraten gibt es Evidenz für eine strahlenbedingte Erhöhung unter den Aufräumarbeitern, mit Ausnahme von Brustkrebs nicht aber für die Bevölkerung. In einer geographischen Korrelationsstudie wurde eine bisher nicht durch andere Studien bestätigte Erhöhung von Brustkrebs in höher kontaminierten Gebieten der Ukraine gefunden.

Für strahlenbedingte Erhöhungen anderer Erkrankungen in der Bevölkerung gibt es keine Evidenz. Für Aufräumarbeiter ergaben epidemiologische Studien jedoch strahlenbedingte Erhöhungen

der Erkrankungsrate an Katarakten und der Mortalitätsrate durch Herz-Kreislaufkrankungen. Die nach dem Tschernobyl-Unfall beobachteten und vermuteten Gesundheitseffekte können mit Ergebnissen vielfältiger anderer strahlenepidemiologischer und -biologischer Untersuchungen verglichen werden. Wichtige Informationsquellen sind dabei Untersuchungen der Atombomben-überlebenden von Hiroshima, von medizinisch exponierten Personen und von Opfern von Strahlenunfällen (Infobox 02).

### Akute Strahlenkrankheit und Späteffekte

Es ist offensichtlich, dass die Mitglieder der Betriebsmannschaften und die Feuerwehrleute, die sich zum Zeitpunkt des Unfalls und unmittelbar im Anschluss daran am Reaktor aufhielten, die größte Strahlenbelastung erhielten. Bei 134 Personen wurde eine akute Strahlenerkrankung (acute radiation syndrome, ARS) diagnostiziert (Tab. 06). Die Energiedosen durch die externe Strahlenexposition lagen im Bereich von 800 bis 16.000 mGy. Die Dosen durch inkorporierte Radionuklide waren relativ gering.

Die akuten Erkrankungen waren Folge der hohen Strahlenbelastung des ganzen Körpers mit Hautverbrennungen, Schädigungen des Knochenmarks und einem Versagen des Magen-Darm-Traktes. Die Hoffnungen auf eine lebensrettende Wirkung von Knochenmarktransplantationen haben sich leider nicht bewahrheitet. An der akuten Strahlenkrankheit verstarben 28 Personen. Drei weitere frühe Todesfälle sind Verbrennungen und Herzversagen zuzuschreiben.

Bis 2007 sind weitere 19 Patienten verstorben, die die akute Strahlenkrankheit überlebten. Als Todesursache wird in sechs Fällen plötzlicher Herztod, in drei Fällen myelodysplastisches Syndrom, in jeweils zwei weiteren Fällen Leberzirrhose und Lungentuberkulose sowie sechs weitere einzelne Ursachen angegeben.

Schweregrad	Dosis (mGy)	Behandlungsfälle	Todesfälle	Überlebende
leicht	800 – 2.100	41	0 (0 %)	41
mittel	2.200 – 4.100	50	1 (2 %)	49
schwer	4.200 – 6.400	22	7 (32 %)	15
sehr schwer	6.500 – 16.000	21	20 (95 %)	1
gesamt	800 – 16.000	134	28	106

Tab. 06

Akute Strahlenkrankheit:  
Behandlungs- und Todesfälle

Quelle:

UNSCEAR 2008 Report

Akute Gesundheitsschäden treten nach hohen Strahlenexpositionen mit Energiedosen größer ungefähr 1.000 mGy auf. Hierbei kommt es durch die Schädigung von Blutbildung, Magen-Darm-System, Gehirn oder durch strahlenbedingte Verbrennungen zu sehr schweren akuten Krankheitsbildern. Bei diesen sogenannten deterministischen Strahlenschäden hängt die Schwere der Erkrankung von der Dosis ab. Unterhalb eines Schwellwertes treten keine deterministischen Erkrankungen auf.

Für strahlenbedingte Missbildungen nach akuter Exposition in utero wird ein Schwellwert für die Energiedosis im Uterus von 100 mGy angenommen.

Strahlenexpositionen können zusätzliche Erkrankungen an Leukämie und solidem Krebs auslösen. Bei diesen sogenannten stochastischen Strahleneffekten ist die Schwere der Erkrankung unabhängig von der Dosis. Allerdings steigt die Wahrscheinlichkeit der Erkrankung mit der Dosis. Dies gilt zumindest im Dosisbereich, für die eine Erhöhung der Krebsrisiken beobachtet wurde, das heißt nach akuten Expositionen für Dosen größer als ca. 100 mSv. Entsprechend der derzeitigen Risikoabschätzung bewirkt eine Strahlenexposition von 1.000 Personen mit einer effektiven Dosis von 100 mSv ca. zehn zusätzliche Erkrankungsfälle an solidem Krebs und ca. einen zusätzlichen Erkrankungsfall an Leukämie.

Der Dosiswirkungsverlauf für stochastische Schäden ist nach Expositionen mit Dosen geringer als 100 mSv unbekannt. Da die biologische Reaktion auf höhere Dosen anders ist als bei niedrigen Dosen (z. B. werden bei höheren Dosen andere Gene exprimiert als bei kleinen Dosen), ist eine lineare Extrapolation der bei höheren Dosen beobachteten Krebsrisiken auf niedrige Dosen wissenschaftlich nicht fundiert. Für Strahlenschutzentscheidungen wird in der Regel dennoch eine lineare Dosiswirkungsbeziehung angenommen.

Es ist nicht bekannt, ob strahleninduzierte Herz-Kreislaufkrankungen und Augen-Katarakte deterministischer oder stochastischer Natur sind. Beide Effekte werden durch Energiedosen oberhalb von ca. 1.000 mGy bewirkt. Es gibt zunehmende Evidenz, dass sie auch nach niedrigeren Strahlenexpositionen auftreten.

## Infobox 02

### Strahlenrisiken

Bei einem Großteil der Betroffenen erholten sich die Blutwerte nach der Exposition mit der Zeit. Es bleiben jedoch erhebliche Spätfolgen der Hautverletzungen. Zudem traten vermehrt hämatologische Erkrankungen und Trübungen der Augenlinse (Katarakte) auf. Andere Erkrankungen werden von UNSCEAR nicht direkt der Strahlenexposition sondern Faktoren wie Altern, Ängsten und der psychischen Belastung zugeschrieben.

Die Strahlenexpositionen durch den Unfall waren weder innerhalb der 30-km-Zone, noch in den hoch belasteten Gebieten intensiv genug, um akute strahlenbedingte Erkrankungen in der Bevölkerung auszulösen.

#### Leukämie

Im Zusammenhang mit Strahlenexpositionen des ganzen Körpers oder auch nur des Knochenmarks ist eine mögliche Erhöhung des Leukämierisikos von primärem Interesse. Ein Anstieg des Leukämierisikos ist bei Kindern bereits nach einer Latenzzeit von zwei Jahren zu erwarten. Zusätzlich ist die relative Erhöhung des Erkrankungsrisikos bei gleicher Dosis für Leukämien deutlich höher als für solide Krebstumoren. Dies erleichtert einen epidemiologischen Nachweis einer eventuell aufgetretenen Erhöhung der Erkrankungsrate.

#### Aufräumarbeiter

Zwei Kohortenstudien für die im russischen Register verzeichneten Aufräumarbeiter ergaben einen signifikanten Anstieg der Leukämie-Erkrankungsrate mit der Dosis durch externe Strahlenexpositionen. Das beobachtete Risiko stimmte im Rah-

men der Unsicherheiten mit den Ergebnissen für die Atombombenüberlebenden von Hiroshima und Nagasaki überein. Andererseits ergaben zwei Fall-Kontrollstudien (die zweite mit 36 Leukämiefällen außer chronische lymphatische Leukämie, CLL) keine eindeutigen Ergebnisse.

Eine ukrainische Studie ergab für Aufräumarbeiter, die 1986 zum Einsatz kamen, eine Leukämie-Erkrankungsrate im Zeitraum 1987 bis 1993, die doppelt so hoch war wie diejenige unter Aufräumarbeitern, die 1987 am Reaktorgelände und in der 30-km-Zone arbeiteten. Es ist davon auszugehen, dass Letztere deutlich geringere Strahlenexpositionen hatten.

Zwei Fall-Kontrollstudien – eine für Aufräumarbeiter aus den baltischen Ländern, aus Russland und aus Weißrussland und eine für Aufräumarbeiter aus der Ukraine – ergaben nicht-signifikante Erhöhungen sowohl für nicht-CLL Leukämien als auch für CLL.

Insgesamt ergeben die Studien Evidenz für eine Erhöhung der Leukämieraten unter den höher exponierten Aufräumarbeitern. Weitere Studien sind allerdings notwendig, um quantitative Schlüsse zu ziehen.

#### Bevölkerung der kontaminierten Gebiete

Eine geographische Korrelationsstudie ergab unter Personen, die in utero durch den Tschernobyl-Unfall exponiert wurden, eine signifikant höhere Leukämie-Erkrankungsrate in höher kontaminierten Gebieten der Ukraine als in niedriger konta-

minierten Gebieten. Die Studie schloss nur eine kleine Anzahl von Fällen (29) ein. In Griechenland wurde in einer Studie mit ähnlichem Design ebenfalls eine Erhöhung des Leukämierisikos nach Exposition in utero gefunden. Andererseits führten vergleichbare Studien in anderen Ländern zu negativen Ergebnissen.

In einer vom deutschen Umweltministerium geförderten Arbeit wurde die Häufigkeit von Leukämieerkrankungen bei Kindern in Gebieten Russlands, der Ukraine und Weißrusslands untersucht. In den betrachteten Gebieten sind zwischen 1986 und 1995 insgesamt 1.619 Erkrankungen aufgetreten, davon 529 in als belastet (mit über 37 kBq/m<sup>2</sup> Cäsium-137) geltenden Gebieten. Unter Berücksichtigung der Alterszusammensetzung, die sich aus der zum Teil drastisch abnehmenden Geburtenrate ergab, fand sich mit einer altersstandardisierten Neuerkrankungsrate von 4,3 Fällen je 100.000 Kinder und Jahr in den belasteten und 4,2 Fällen je 100.000 Kinder und Jahr in den nicht belasteten Gebieten ein unauffälliges Ergebnis. Das Gesamterkrankungsrisiko bis zum 15. Lebensjahr an einer Leukämie zu erkranken, lag in den untersuchten Gebieten mit 61 Erkrankungen je 100.000 Kinder geringfügig unterhalb des in Deutschland beobachteten Wertes von 67 Leukämie-Erkrankungen je 100.000 Kinder.

Auch andere mit einem vergleichbaren Design (geographische Korrelation) durchgeführte Studien ergaben keine Evidenz für eine Erhöhung von Leukämie-Erkrankungsraten nach Exposition im Kindesalter durch den Tschernobyl-Unfall.

In der Ukraine wurde eine Fall-Kontrollstudie für Leukämien unter Personen durchgeführt, die zum Zeitpunkt des Unfalls 20 Jahre alt oder jünger waren. Es wurden signifikante Erhöhungen gefunden, zum Beispiel für akute Leukämien im Zeitraum 1993 bis 1997 unter männlichen Personen mit Dosen größer als 10 mSv. Die Ergebnisse sind mit Vorsicht zu bewerten, da in die Studie nur 98 von 272 möglichen Leukämie-Fällen eingeschlossen wurden. Um dem Befund nachzugehen, wurde eine größere Fall-Kontrollstudie durchgeführt. Die Studie ergab keine signifikanten Ergebnisse in Russland und in Weißrussland, und reproduzierte die Ergebnisse in der Ukraine. Insgesamt ergibt sich keine Evidenz für eine Erhöhung der Leukämie-Erkrankungsraten unter Personen, die nach dem Tschernobyl-Unfall im Kindes- oder Jugendalter exponiert wurden.

Für Bewohner kontaminierter Gebiete, die im Erwachsenenalter durch den Tschernobyl-Unfall exponiert wurden, ergab eine Reihe von geographischen Korrelationsstudien ebenfalls keine

Evidenz für eine Erhöhung der Leukämie-Erkrankungsraten.

Insgesamt war die Exposition der Bevölkerung der kontaminierten Gebiete zu niedrig, um mögliche Erhöhungen der Leukämie-Erkrankungsraten mit den zur Verfügung stehenden Studiendesigns nachweisen zu können.

## Schilddrüsenenerkrankungen

### *Exposition im Kindes- oder Jugendalter*

Berichte über eine Zunahme der Schilddrüsenkrebserkrankungen bei Kindern in Weißrussland erreichten die westliche Welt bereits Ende 1990. Sie wurden zunächst mit sehr viel Skepsis betrachtet. Die Latenzzeit von nur wenigen Jahren schien vielen Experten zu kurz zu sein. Es folgte eine Vielzahl von Untersuchungen des Schilddrüsenkrebses in den kontaminierten Gebieten. Es ergab sich schließlich, dass die beobachteten Erhöhungen der Schilddrüsenkrebs-Erkrankungsraten konsistent mit den Ergebnissen von Studien von im Kindesalter mit externer Strahlung exponierten Personen sind. Die kurze Zeit zwischen Exposition und Nachweisbarkeit der Erhöhung der Erkrankungsraten konnte mit der sehr großen Anzahl von hoch exponierten Personen erklärt werden. Insgesamt ist bei Exposition im Kindesalter mit gleicher Schilddrüsen- und Knochenmarksdosis die Risikoerhöhung für Schilddrüsenkrebs und für Leukämie vergleichbar hoch.

Die höchsten Anzahlen von Schilddrüsenkrebsfällen in der Altersgruppe der 0- bis 9-jährigen wurden im Zeitraum 1991 bis 1995 registriert, in der Altersgruppe der 10- bis 19-jährigen im Zeitraum 1996 bis 2000 und in der Altersgruppe der 20- bis 29-jährigen im Zeitraum 2001 bis 2005 (Tab. 07). Der Rückgang für spätere Zeiträume erklärt sich jeweils mit dem Herauswachsen der exponierten Geburtsjahrgänge aus der betreffenden Altersgruppe. Die stärkste relative Erhöhung wurde in der Altersgruppe der 0- bis 9-jährigen beobachtet. Als Basiswert können die im Zeitraum 2001 bis 2005 in der Ukraine, in Weißrussland und in vier Oblasts in Russland registrierten 19 Fälle angenommen werden. Demgegenüber wurden im Zeitraum 1991 bis 1995 insgesamt 278 Fälle registriert. Dies entspricht einer 15-fachen Erhöhung.

Der Anstieg der Erkrankungsraten an Schilddrüsenkrebs in den betroffenen Ländern ist zwei Faktoren zuzuschreiben. Erstens führen die Einführung von Ultraschallgeräten, das heißt eine Verbesserung der Diagnostik, eine größere Aufmerksamkeit gegenüber Schilddrüsen-Erkrankungen bei Routineuntersuchungen und ein verbessertes Meldeverhalten zu einem Anstieg der gemeldeten Fälle. Es wurde abgeschätzt, dass diese

Alter bei Diagnose	Kalenderjahre				
	1982–1985	1986–1990	1991–1995	1996–2000	2001–2005
<b>Russland (Oblasts Bryansk, Kaluga, Orel und Tula)</b>					
0 – 9	1	1	8	2	1
10 – 19	2	14	60	93	71
20 – 29	30	59	117	124	163
<b>Ukraine</b>					
0 – 9	3	26	70	11	7
10 – 18	51	99	267	369	283
19 – 30	–	40	310	763	1.056
<b>Weißrussland</b>					
0 – 9	0	33	200	18	11
10 – 19	1	39	297	510	295
20 – 29	1	5	93	310	468

**Tab. 07**

Schilddrüsenkrebsfälle in den betroffenen Ländern. Neunzig Prozent der in der Ukraine und in Weißrussland operierten Tumore sind papilläre Schilddrüsenkarzinome.

**Quelle:**

UNSCEAR 2008 Report

Faktoren die spontane Erkrankungsrate unter den Geburtsjahrgängen 1968 bis 1985 von 1988 bis 1999 in Weißrussland und in den hoch kontaminierten Gebieten der Ukraine verdreifachten und in den niedriger kontaminierten Gebieten der Ukraine verdoppelten. Zweitens führte die Strahlenexposition zu einer Erhöhung der Schilddrüsenkrebs-Erkrankungsrate. Es wurde für die Geburtsjahrgänge 1968 bis 1985 abgeschätzt, dass 60 % der Schilddrüsenkrebsfälle im Zeitraum 1990 bis 2001 in Weißrussland und 30 % der Fälle in der Ukraine der Strahlenexposition zuzuschreiben sind.

Es wurde eine große Anzahl von epidemiologischen Studien durchgeführt, um die Erhöhung des Schilddrüsenkrebsrisikos durch Exposition mit ionisierender Strahlung zu bestimmen. Diese ergaben, dass eine Exposition im Kindesalter mit der Energiedosis in der Schilddrüse von 100 mGy das Krebsrisiko im Zeitraum von 5 bis 15 Jahren nach Exposition ca. verdoppelt. Es gibt Hinweise darauf, dass das Strahlenrisiko in Gebieten mit normaler Versorgung mit stabilem Jod geringer war als in Jodmangelgebieten.

Seit der Bestätigung des Krankheitsanstiegs bemühen sich neben den betroffenen Staaten mehrere internationale Projekte um Frühdiagnostik und Behandlung von Schilddrüsenkrebs-

erkrankungen. So wurden in Zusammenarbeit mit dem von Prof. Dr. E. P. Demidchik geleiteten weißrussischen Zentrum in Minsk seit 1993 über 100 Kinder, die eine besonders schwere, in Weißrussland damals nicht ausreichend behandelbare Erkrankung hatten, in Deutschland nachbehandelt. Die erforderliche nuklearmedizinische Therapie, die mit Jod-131 durchgeführt wird, erfolgte unter Leitung von Prof. Reiners in den Universitätskliniken Essen und Würzburg mit finanzieller Unterstützung durch alle westdeutschen Elektrizitätsversorgungsunternehmen. Insgesamt ist die Sterblichkeit aufgrund von Schilddrüsenkrebs nach dem Tschernobyl-Unfall gering, in der Größenordnung von wenigen Prozent oder darunter.

#### *Exposition im Erwachsenenalter*

Mehrfach wurde über eine Zunahme von Schilddrüsenkrebs-Erkrankungen unter Personen berichtet, die im Erwachsenenalter durch den Tschernobyl-Unfall exponiert wurden. Dies gilt sowohl für die Aufräumarbeiter als auch für die Bewohner der hoch kontaminierten Gebiete. Der Effekt ist überwiegend einem verbesserten Diagnose- und Berichtssystem zuzuschreiben. In Anbetracht der starken Zunahme des Erkrankungsrisikos nach Strahlenexposition im Kindes- und Jugendalter kann allerdings ein Strahleneffekt der Exposition im Erwachsenenalter nicht ausgeschlossen werden. Hierfür fehlen jedoch

epidemiologische Hinweise. Es ist auch nicht klar, ob zukünftig ein solcher Effekt nachgewiesen werden kann, da andere epidemiologische Studien insbesondere von mit Jod-131 behandelten Patienten und von den Atombombenüberlebenden von Hiroshima und Nagasaki auf ein relativ geringes Schilddrüsenkrebsrisiko nach Exposition im Erwachsenenalter hinweisen.

### Solide Tumoren in anderen Organen

#### *Aufräumarbeiter*

In einer Kohortenstudie der Erkrankungsrate an solidem Krebs wurden unter 55.718 russischen Aufräumarbeitern, die in den Jahren 1986 und 1987 im Unfallreaktor oder der 30-km-Zone tätig waren, im Zeitraum 1991 bis 2001 insgesamt 1.370 Fälle registriert. Für die Arbeiter wurden effektive Dosen<sup>1</sup> durch externe Strahlung im Bereich von 1 bis 300 mSv registriert. Die Studie ergab eine nicht-signifikante Erhöhung der Erkrankungsrate mit der Dosis.

In einer Kohortenstudie zur Sterblichkeit an solidem Krebs wurden unter 29.000 russischen Aufräumarbeitern, die in den Jahren 1986 und 1987 im Unfallreaktor oder der 30-km-Zone tätig waren, im Zeitraum 1986 bis 2002 insgesamt 651 Fälle registriert. Die Studie ergab eine signifikante Erhöhung der Sterblichkeitsrate mit der Dosis. Allerdings traten viele der Krebstodesfälle in kürzeren Zeiten nach der Exposition auf, als dies nach den Erfahrungen in Studien anderer Kohorten zu erwarten gewesen wäre.

Insgesamt ergeben die Studien mit russischen Aufräumarbeitern trotz einiger Schwächen insbesondere bezüglich der Dosimetrie eine Evidenz für eine strahlenbedingte Erhöhung von solidem Krebs unter den Aufräumarbeitern.

#### *Bevölkerung der kontaminierten Gebiete*

In einer geographischen Korrelationsstudie wurde der Zusammenhang von Strahlenexposition nach dem Tschernobyl-Unfall und der Erkrankungsrate an Brustkrebs in der Ukraine und in Weißrussland untersucht. In der Analyse wurden mittlere effektiver Dosen<sup>2</sup> in Rayons (vergleichbar mit Landkreisen und kreisfreien Städten in Deutschland) verwendet, die wesentlich auf umfangreichen Messungen der externen Strahlung und des Cäsium-137-Gesamtkörpergehalts beruhten. In Rayons mit effektiven Dosen größer als 40 Sv wurde im Zeitraum 1999 bis 2001 insbesondere unter Frauen, die jünger als 45 Jahre zum Zeitpunkt der Diagnose waren, eine signifikant erhöhte Brustkrebsrate gefunden. Die gefundene Risikoerhöhung ist deutlich höher als es aufgrund von anderen epidemiologischen Studien erwartet wird. Bisher wurde noch keine weitergehende

epidemiologische Studie durchgeführt, die dieses unerwartete Ergebnis bestätigt oder verwirft.

Zum strahlenbedingten Risiko für andere Krebsarten als die hier besprochenen haben keine in den kontaminierten Gebieten durchgeführten Studien eine Evidenz ergeben.

### Nicht-Krebs Erkrankungen

#### *Katarakte*

In einer Studie mit 8.607 ukrainischen Aufräumarbeitern wurden Augenuntersuchungen 12 und 14 Jahre nach dem Tschernobyl-Unfall durchgeführt. Die offiziell registrierten Dosen durch Gammastrahlung wurden mit Hilfe von Messungen von Zahnschmelzdosen in (aufgrund von zahnmedizinischen Indikationen) extrahierten Zähnen validiert. Die Augenlinsendosen durch Betastrahlung wurden mit Hilfe von Informationen über die Strahlenfelder an den Einsatzgebieten berechnet. Demnach hatte die Hälfte der Aufräumarbeiter Energiedosen in der Augenlinse, die größer als 120 mGy waren, 5 % hatten Linsendosen größer als 500 mGy.

Obwohl die Aufräumarbeiter relativ jung waren, hatten bereits 26 % von ihnen Linsentrübungen (Katarakte) ersten Grades. Die Häufigkeit der Linsentrübungen nahm signifikant mit der Dosis zu. Vor der Studie wurde allgemein angenommen, dass die Erhöhung der Katarakt-Erkrankungsrate ein deterministischer Effekt (Infobox 02) mit einem Schwellwert bei ca. 2.000 mGy sei. Die Studie der ukrainischen Aufräumarbeiter ergab jedoch, dass wenn es einen Schwellwert gibt, dieser dann nicht größer ist als 700 mGy.

#### *Herz-Kreislaufkrankungen*

In einer Studie mit 29.003 russischen Aufräumarbeitern, die im ersten Jahr nach dem Tschernobyl-Unfall auf dem Reaktorgelände oder in der 30-km-Zone arbeiteten, wurden im Zeitraum 1986 bis 2000 auftretende Herz-Kreislaufkrankungen analysiert. Es wurde eine Zunahme ischämischer Herzerkrankungen mit wachsender Dosis festgestellt.

Für eine Gruppe von 60.910 russischen Aufräumarbeitern wurden im Zeitraum 1991 bis 1998 insgesamt 1.728 Todesfälle durch Herz-Kreislaufkrankungen registriert. Die Mortalitätsrate stieg signifikant mit der Dosis. Die Erkrankungsrate stieg ebenfalls, allerdings nicht signifikant.

Obwohl die beiden Studien auf einen dosisabhängigen Anstieg von Herz-Kreislaufkrankungen hinweisen, ist UNSCEAR mit der Evidenzbewertung noch zurückhaltend, da die Dosiswerte große Unsicherheiten haben, andere Risikofaktoren

1 Im UNSCEAR 2008 Report sind Energiedosen durch externe Exposition mit Gamma- und Röntgenstrahlung angegeben. Die Umrechnung in effektive Dosen hängt von den Eigenschaften des Strahlenfelds ab. Hier wird näherungsweise ein Umrechnungsfaktor von 1 Sv/Gy verwendet.

2 In der Studie von Pukkala et al. (Int. J. Cancer 2006) wird die Dosisgröße „whole body dose“ verwendet. Für die dominierenden Radionuklide Cs-137 und Cs-134 entspricht dies numerisch ungefähr der effektiven Dosis



wie Rauchen oder Übergewicht nicht berücksichtigt wurden und die Zeit zwischen Exposition und Auftreten der Erkrankungen kürzer war, als aufgrund von anderen Studien erwartet. Die Studie mit Aufräumarbeitern von Tschernobyl ist jedoch konsistent mit einer zunehmenden Anzahl von Studien mit Arbeitern in der Nuklearindustrie (z. B. Arbeiter von Majak und von Sellafield), von allgemein beruflich exponierten Personen (z. B. im Dosisregister von Großbritannien verzeichneten Personen) und von den Atombombenüberlebenden von Hiroshima und Nagasaki, die auf ein erhöhtes Risiko von Herz-Kreislaufkrankungen nach Expositionen mit kleineren Dosen als 1.000 mGy hinweisen.

#### *Schwangerschaftsausgang*

Im Zusammenhang mit dem Tschernobyl-Unfall wurden in den stark betroffenen Staaten und in Westeuropa strahlenbedingte Auswirkungen auf den Schwangerschaftsausgang, also auf Neugeborenensterblichkeit, Fehlgeburten und Missbildungshäufigkeit, diskutiert. Ein negativer strahlenbedingter Einfluss ist prinzipiell möglich, bei den gegebenen Strahlenexpositionen jedoch nur bei sehr wenigen hoch belasteten Schwangerschaften anzunehmen. Viele der oft sehr emotional geführten Diskussionen beruhen auf Einzelbeobachtungen ohne Bezug zur Strahlenexposition.

Von der Mehrheit der Strahlenforscher wird die Situation so bewertet, dass oft völlig unabhängig von der Strahlenexposition gesundheitliche Veränderungen einschließlich negativen Schwangerschaftsausgangs nachgewiesen wurden. Eine direkte Strahlenwirkung ist in den meisten Fällen unwahrscheinlich. Indirekt haben die mit dem Unfall zusammenhängende wirtschaftliche Not, die mangelnde Versorgung und auch Ängste zur Verschlechterung der Situation beigetragen. Die durchgeführten Untersuchungen zeigen einen deutlichen Rückgang der Geburtenrate in betroffenen und nicht betroffenen Gebieten. Bezüglich Geburtenrate und Schwangerschaftsausgang gibt es keine Evidenz für einen Zusammenhang mit der Strahlenexposition. Die sekundären Auswirkungen des Unfalls und der gesellschaftlichen Veränderung werden am Rückgang der Geburtenrate in den betroffenen Staaten und am Anstieg der Schwangerschaftsabbrüche – dies war auch in einigen westeuropäischen Staaten nachweisbar – deutlich.

#### *Psychosoziale Folgen*

Unabhängig von Inkorporationen radioaktiven Jods, Cäsium-Ablagerungen, Nahrungsmittelkontaminationen und der Strahlenexposition stellte man wiederholt einen Anstieg von Erkrankungen fest, die – nach heutigem Kenntnisstand der Medi-

zin – nicht durch ionisierende Strahlen verursacht werden. Dazu zählen Krankheiten wie Diabetes, Nervenkrankheiten und chronische Erkrankungen der Atemwege sowie Entzündungen des Mund-, Rachen- und Nasenbereiches. Angesichts der durchgeführten Ganzkörpermessungen in den betroffenen Regionen, die eher niedrige Strahlenexpositionen bestätigten, kann die Strahlung nach dem heutigen Wissensstand nicht Ursache dieser Erkrankungen sein. Die Ursachen für einen berichteten Anstieg von Allgemeinerkrankungen sehen Experten auch in der besseren Erfassung von Erkrankungen, vor allem aber in sekundären Folgen des Unfalls und in den wirtschaftlichen Auswirkungen des Zerfalls der Sowjetunion. Die mit dem Unfall und dem Zerfall der Sowjetunion verbundene Verschlechterung der allgemeinen wirtschaftlichen Lage mit drastisch ansteigender Arbeitslosigkeit führte auch zu einer medizinischen Unterversorgung. Die Umsiedlungen großer Bevölkerungsgruppen zerstörte soziale und ethnische Bindungen. Aus medizinischer Sicht sind die Folgen einer nicht ausreichenden Lebensmittelversorgung, einer vitaminarmen Ernährung und vor allen Dingen die Auswirkungen von psychischem und sozialem Stress, bedingt durch berechtigte Ängste und unbegründete Befürchtungen, zu berücksichtigen. Man kennt die gravierenden Auswirkungen von Angst, Unsicherheit und Verzweiflung auf die Gesundheit auch von anderen nicht nuklearen Katastrophen.

#### **Sterblichkeit**

In den meisten Folgestaaten der Sowjetunion wurde nach 1985 ein zum Teil rapides Absinken der Lebenserwartung bei Männern beobachtet. Die mittlere Lebenserwartung für Männer liegt in Westeuropa bei etwa 75 Jahren. Bis zum Jahr 2000 ging die mittlere Lebenserwartung für männliche Neugeborene in Russland statistisch von 70 auf 61 und in der Ukraine von 67 auf 61 Jahre zurück. Im Gegensatz dazu sind bei der Lebenserwartung der weiblichen Bevölkerung (73 Jahre) und bei der Säuglingssterblichkeit keine großen Veränderungen sichtbar. Diese Veränderungen erschweren alle statistischen Untersuchungen im Hinblick auf die Folgen des Tschernobyl-Unfalls. Die erhöhte Sterblichkeit, besonders der mittleren männlichen Erwachsenenjahrgänge, wird auf eine Zunahme von nicht natürlichen Todesursachen (Unfall, Suizid und Mord) sowie auf eine Zunahme von Herz-Kreislaufkrankungen und Alkoholfolgen zurückgeführt. Der Einfluss der negativen Wirtschaftsentwicklung und des Gesundheitssystems wurde noch nicht quantifiziert.

## 2.4 Auswirkungen auf Deutschland

### Zusammenfassung

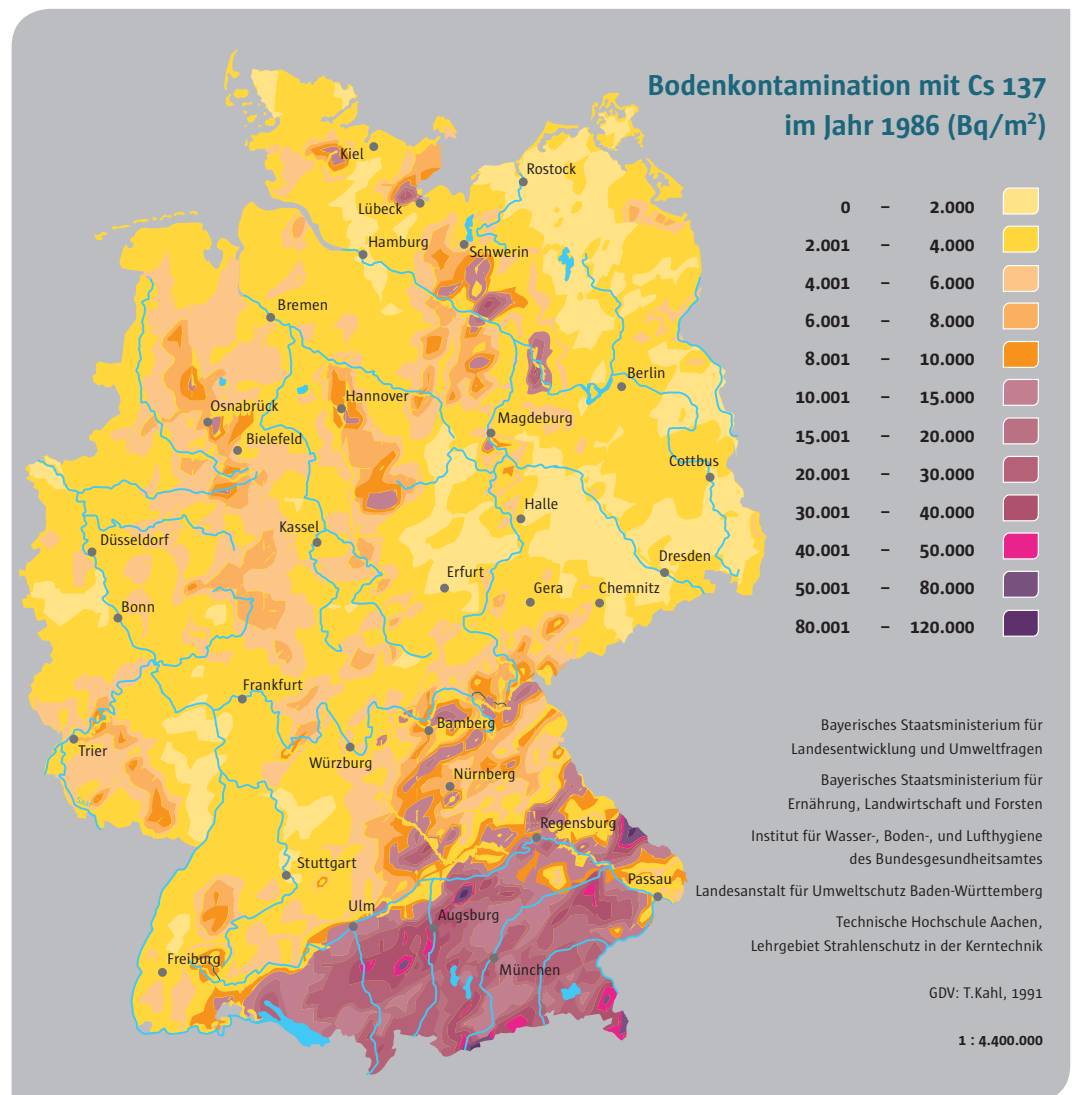
Durch heftige Niederschläge kam es am 30. April 1986 im Bayerischen Wald und südlich der Donau großflächig zu hohen Aktivitätsablagerungen mit Cäsium-137-Kontaminationen, die den Wert von  $37 \text{ kBq/m}^2$  überschritten. Lokal begrenzte sehr hohe Cäsium-137-Kontaminationen mit Spitzenwerten von über  $100 \text{ kBq/m}^2$  wurden in Niederbayern an der Grenze zur damaligen Tschechoslowakei und nordöstlich von Augsburg gemessen. Die abgelagerte Aktivität von Jod-131 betrug zum Teil mehrere  $100 \text{ kBq/m}^2$ .

Die gesamte mittlere effektive Dosis innerhalb der ersten 50 Jahre nach dem Tschernobyl-Unfall wurde für die Bevölkerung des relativ hoch kontaminierten Voralpengebiets auf  $2,2 \text{ mSv}$  geschätzt. Im übrigen Bundesgebiet waren die mittleren Dosen entsprechend geringer. Insgesamt waren damit die radiologischen Auswirkungen auf die bundesdeutsche Bevölkerung gering.

### Umweltkontaminationen

Durch den Tschernobyl-Unfall radioaktiv kontaminierte Luftmassen erreichten Süddeutschland am 29. April 1986. Durch heftige Niederschläge am 30. April kam es im Bayerischen Wald und südlich der Donau großflächig zu hohen Aktivitätsablagerungen mit Cäsium-137-Kontaminationen, die den Wert von  $37 \text{ kBq/m}^2$  überschritten (Abb. 12). Lokal begrenzte sehr hohe Cäsium-137-Kontaminationen mit Spitzenwerten von über  $100 \text{ kBq/m}^2$  wurden in Niederbayern an der Grenze zur damaligen Tschechoslowakei und nordöstlich von Augsburg gemessen. Die abgelagerte Aktivität von Jod-131 betrug zum Teil mehrere  $100 \text{ kBq/m}^2$ .

In den folgenden Tagen breitete sich die radioaktive Wolke weiter aus. Weitere Luftmassen aus späteren Freisetzungen mit geringeren Kontaminationen überstrichen Deutschland. Kleinere Regenereignisse und auch die trockene Ablage-



**Abb. 12**

Bodenkontamination in Deutschland mit Cs-137 im Jahr 1986 ( $\text{Bq/m}^2$ ). Der wesentliche Teil der Kontamination ist Ablagerungen nach dem Tschernobyl-Unfall zuzuschreiben. Kleinere Beiträge mit bis zu einigen Tausend Becquerel je Quadratmeter stammen noch von Ablagerungen nach oberirdischen Atomwaffentests.

**Quelle:**

Bundesamt für Strahlenschutz



Gebiet	Effektive Dosis im 1. Jahr (mSv)		Gesamte effektive Dosis für die nach dem Unfall folgenden 50 Jahre (mSv)	
	SSK96	SSK87	SSK96	SSK87
Voralpengebiet	0,65	1,2	2,2	3,8
Südlich der Donau	0,35	0,6	1,3	1,9
Nördlich der Donau	0,17	0,2	0,55	0,6

**Tab. 08**

Effektive Dosen in Deutschland durch den Tschernobyl-Unfall: Konservative Abschätzungen durch die SSK im Jahr 1987 und aufgrund von verbesserter Datenlage korrigierte Abschätzungen aus dem Jahr 1996

**Quelle:**

Strahlenschutzkommission 1996

Die Kontaminationen führten zu einem komplexen Kontaminationsmuster in Deutschland. Andere europäische Länder nördlich, östlich und südlich von Deutschland sowie die Türkei waren in ähnlichem Maße, teilweise auch stärker betroffen.

Die westdeutsche Strahlenschutzkommission (SSK) setzte am 2. Mai 1986 Richtwerte für die maximale Aktivitätskonzentration in Frischmilch und auf Blattgemüse fest. Diese Richtwerte wurden von den meisten Bundesländern als verbindliche Grenzwerte übernommen. In einigen Bundesländern (z. B. in Hessen) wurden jedoch deutlich niedrigere Grenzwerte festgelegt.

Die Auswirkungen auf die landwirtschaftliche Produktion waren unterschiedlich. Während die Richtwerte der SSK im Norden der Bundesrepublik in der Regel bei Weitem nicht erreicht wurden, führten sie im Süden Deutschlands zu erheblichen Verbrauchseinschränkungen. Hier mussten große Mengen an Frischgemüse und Salat vernichtet oder untergepflügt werden. Durch die Maßnahmen betrug die Aktivitätskonzentration in der verkauften Molkereimilch durchschnittlich weniger als ein Fünftel der SSK-Richtwerte. Bei Waldpilzen und Wildbret lagen die Kontaminationen erheblich höher und dauern in rückläufigem, aber noch gut messbarem Umfang bis heute an.

### Strahlenexpositionen

Die mittlere Energiedosis der Schilddrüse von Kindern des Münchner Raums durch das aufgrund des Tschernobyl-Unfalls freigesetzte Jod-131 betrug nach Messungen des Instituts für Strahlenschutz des Bundesgesundheitsamtes 2,6 mSv. Für Kinder aus Bereichen des Voralpengebietes wurde die Schilddrüsendosis als doppelt so hoch (5 mSv) abgeschätzt. Die relativ niedrigen Werte demonstrieren die Wirksamkeit der durch die SSK eingeführten Richtwerte für Jod-131-Kontaminationen von Milch und Blattgemüse.

In Deutschland wurden von mehreren Institutionen Ganzkörpergehalte von Cäsium-137 gemessen. Basierend auf diesen Werten und auf umfangreichen Messungen von Lebensmittelkontamination schätzte die SSK die effektiven Dosen der bundesdeutschen Bevölkerung zunächst konservativ ab (Tab. 08). Im Jahr 1996 wurden diese Abschätzungen aufgrund nunmehr vorliegender langjähriger Messreihen nach unten korrigiert. Demnach betragen die mittleren effektiven Dosen im 1. Jahr nach dem Unfall im Voralpengebiet 0,65 mSv. Die gesamte mittlere effektive Dosis in den ersten 50 Jahren wurde auf 2,2 mSv geschätzt. Im übrigen Bundesgebiet waren die mittleren Dosen entsprechend geringer. Für einzelne Personen mit Lebens- und Ernährungsgewohnheiten, die stark von den angenommenen Durchschnittswerten abweichen, kann die Strahlenexposition um einen Faktor 2 bis 3 über oder unter den Mittelwerten liegen. Eine internationale Studie kommt zu einem geringeren Ergebnis als die SSK. Dort wird für Deutschland und den Zeitraum 1986 bis 2005 die mittlere effektive Dosis auf 0,1 bis 0,3 mSv abgeschätzt. Insgesamt waren damit die radiologischen Auswirkungen auf die bundesdeutsche Bevölkerung gering.

### Zur Diskussion über strahlenbedingte Effekte in Deutschland und Westeuropa

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass für die Bevölkerung in Deutschland die Strahlenexposition durch den Tschernobyl-Unfall gering war. Selbst im ersten Jahr nach dem Unfall war sie deutlich kleiner als die in Deutschland zu beobachtende Schwankung der jährlichen natürlichen Strahlenexposition (Mittelwert 2,1 mSv mit einer regionalen Schwankungsbreite zwischen 1 und 10 mSv). Falls diese Expositionen zu einer Erhöhung von Erkrankungen führen oder geführt haben, so ist davon auszugehen, dass diese sehr gering und mit epidemiologischen Studien nicht nachweisbar sind.

Nach dem Unfall von Tschernobyl wurden zahlreiche Einzelbeobachtungen im Zusammenhang mit Strahlenexpositionen diskutiert. Besondere Aufmerksamkeiten erregten zunächst Häufungen von Neugeborenen mit Trisomie 21 (Down-Syndrom) in Berlin und Hamburg. Obwohl der zeitliche Bezug zum Unfallgeschehen durchaus auffällig ist, kann die Hypothese, es habe sich um Folgen der Strahlenexposition gehandelt, nicht gestützt werden. Aus den gemessenen Werten folgt z. B. für Berlin eine Schilddrüsendosis von deutlich unter 1 mGy. Die Strahlenexposition der Eierstöcke, die für die Trisomie 21 entscheidend sein könnte, liegt um eine Größenordnung niedriger. Dementsprechend sieht die SSK keine Evidenz für einen Zusammenhang der Strahlenexposition durch den Tschernobyl-Unfall und die beobachtete Häufung der Trisomien.

Trotz der – im Vergleich zu den hoch kontaminierten Gebieten in der früheren Sowjetunion – in Deutschland und Westeuropa eher geringen Strahlenexposition wurden besonders in Deutschland auch noch andere Beobachtungen im Zusammenhang mit dem Tschernobyl-Unfall diskutiert. Die Art der Risikodiskussion war hierbei auch das Werkzeug von politischen Überzeugungen. Allein die unterschiedliche Darstellung von Risiken kann die Wahrnehmung und die Bewertung einer möglichen Gefährdung erheblich beeinflussen. So wirkt z. B. die bei 60 Millionen betroffenen Bürgern für 1 mSv hypothetisch zu errechnende zusätzliche Krebssterblichkeit von 3.000 zusätzlichen Todesfällen bedrohlich und völlig inakzeptabel. Die äquivalente Angabe der hypothetischen Erhöhung einer Krebssterblichkeit von 25 % auf 25,005 % jedoch wird eher als nicht relevant empfunden.

Der immer wieder in die Diskussion eingebrachte Nachweis einer Trendunterbrechung in der jährlichen Abnahme der Neugeborenensterblichkeit für Deutschland und Teile von Bayern wird bezüglich des Nachweises selbst und der Ursachen kontrovers diskutiert. Auf der Basis des heutigen strahlenbiologischen Wissens könnte ein solcher Effekt nicht erklärt werden. Andere mögliche Ursachen könnten – gerade in der bundesdeutschen Bevölkerung aufgetretenen – nahezu hysterische Ängste, Panikreaktionen und daraus resultierende psychosomatische Störungen sein. Ursächlich für diese Gesundheitsstörungen waren bereits vorhandene Ängste, weltanschauliche Befürchtungen, einzelne auf Effekthascherei ausgelegte Medienberichte und die Praxis der unterschiedlichen Grenzwertfestlegungen in einzelnen Bundesländern, was nachvollziehbar zur Verunsicherung führte.

Erkenntnisse und Lehren  
aus dem Unfall 3

Ein Unfall wie der in Tschernobyl kann bei den in Deutschland eingesetzten Reaktoren nicht passieren, weil sie technisch anders konzipiert sind, höhere Sicherheitsstandards besitzen und eine effiziente, unabhängige behördliche Überwachung und Kontrolle durchgeführt wird, die in der damaligen UdSSR fehlte. Die radiologische und sicherheitstechnische Bedeutung des Unfalls ist von den deutschen Behörden im Lichte heutiger Erkenntnisse damals richtig eingeschätzt worden. Allerdings ist es nicht gelungen, in den ersten Tagen nach dem Unfall die Bevölkerung mit den relevanten Informationen zu versorgen. Gesetzliche und administrative Einrichtungen für den Strahlenschutz sowie hinsichtlich der Messungen zur Bestimmung von Strahlengefährdungen wurden erweitert. Auf internationaler Ebene wurden Vereinbarungen zur Verbesserung der Sicherheit von Kernkraftwerken sowjetischer Bauart sowie über die gegenseitige Information bei Unfällen und Störfällen in Nuklearanlagen getroffen. Bei den WWER-Reaktoren in Bulgarien, der Slowakei, Tschechien und Ungarn sind umfassende Sicherheitsverbesserungen durchgeführt worden; in der GUS und der Ukraine wurde bislang in begrenztem Umfang die Sicherheit erhöht.

Die Auswirkungen des Unfalls auf Deutschland führten zu sehr unterschiedlichen Bewertungen und Reaktionen darüber, wie den Folgen dieses Ereignisses begegnet werden sollte. Heute lässt sich feststellen, dass in Deutschland die radiologische und sicherheitstechnische Bedeutung der Unfallfolgen trotz der damals spärlichen Informationen vom Ort des Geschehens von Beginn an richtig eingeschätzt wurde. Jedoch wird seitens der deutschen Behörden eingeräumt, dass es damals nicht gelungen ist, diese Bewertung dem Großteil der Bevölkerung zu vermitteln und sie dementsprechend zu einem rationalen Verhalten zu veranlassen.

Zu den wohl wichtigsten Erkenntnissen aus dem Unfall zählt die Tatsache, dass die Ursachen die-

ses Unfalls nicht auf deutsche Verhältnisse übertragen werden können, weil die Technik und der Sicherheitsstandard deutscher Reaktoren, die Qualität der Betriebsmannschaften und das behördliche Überwachungssystem von Grund auf verschieden und besser sind. Bei den deutschen Kernkraftwerken sind die Dampfblasenkoeffizienten aufgrund des völlig anderen Reaktorkonzeptes negativ (Abb. 05). Das gilt auch für die Kernkraftwerke vergleichbarer Technologie in Westeuropa. Zudem ist das Abschaltssystem für die Regelstäbe bei deutschen Anlagen wesentlich schneller. Gegen Fehlbedienungen der Betriebsmannschaften schützt ein mehrstufiges Sicherheitskonzept. In deutschen Kernkraftwerken ist es noch nie zu einem Störfall mit Gefahr einer Überhitzung des Reaktors gekommen.

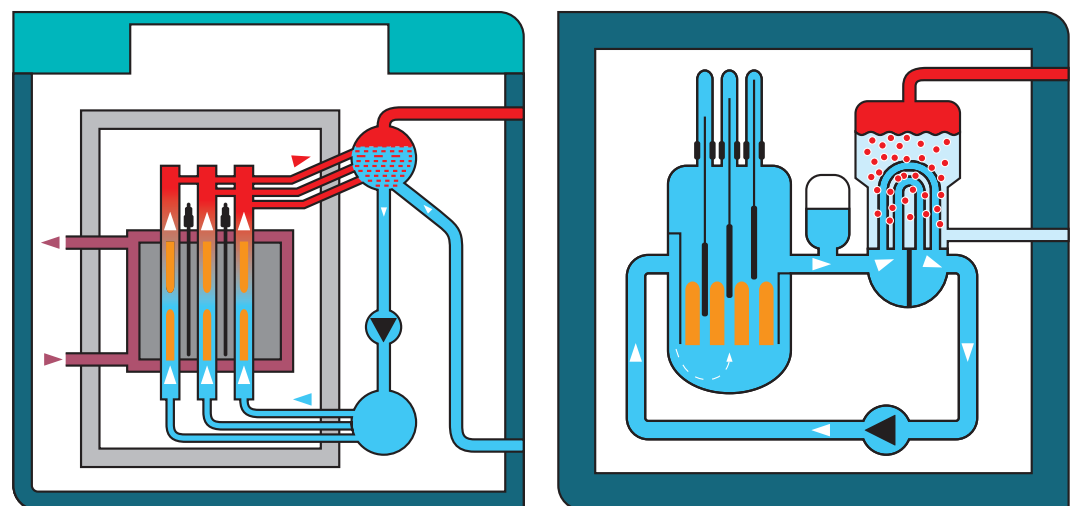


Abb. 13

links:

Tschernobyl-Reaktor ohne Containment

rechts:

deutscher Reaktor mit Containment  
(druckfest und gasdicht)

### **Internationales Maßnahmenpaket**

Nach 1986 wurde aufgrund der neu gewonnenen Kenntnisse über den sowjetischen Kernenergiekomplex auch deutlich, dass zur Vorsorge für die bessere Beherrschung möglicher Ereignisse in östlichen Ländern rechtliche, administrative und technische Maßnahmen erforderlich sind. Dazu zählen unter anderem:

- Bessere Einrichtungen für eine einheitliche Beurteilung von radiologischen Belastungssituationen, für abgestimmte Verhaltensempfehlungen bei der Strahlenschutzvorsorge sowie für den nuklearen Katastrophenschutz.
- Eine Ausweitung der Messungen zur Bestimmung der Strahlengefährdung sowie die Einrichtung von Nachrichtenwegen zur Information der Bevölkerung.
- Internationale Maßnahmen zur Verbesserung der Sicherheit von Kernkraftwerken insbesondere in den osteuropäischen Ländern.
- Internationale Vereinbarungen über die gegenseitige Information bei Unfällen und Störfällen in Kernkraftwerken.

Diese aus dem Unfall resultierenden Konsequenzen sind in Deutschland bei den ersten beiden Maßnahmenpaketen weitgehend umgesetzt. Die Notwendigkeit einer wesentlichen Verbesserung der Sicherheit osteuropäischer Kernkraftwerke wurde auch in den GUS-Ländern nicht bestritten, verschiedene konkrete Maßnahmen wurden mittlerweile umgesetzt.

Durch eigene Anstrengungen der Länder in Mittel- und Osteuropa in Verbindung mit umfangreichen Unterstützungen der westlichen Länder sind die Sicherheitsverbesserungen und Nachrüstmaßnahmen in den osteuropäischen Kernkraftwerken ein gutes Stück vorangekommen.

### **Verbesserungen in den RBMK-Reaktoren**

In allen RBMK-Reaktoren wurde die Betriebsführung verbessert und verschiedene, besonders dringliche Sicherheitsmängel behoben. In einer ersten Stufe der Nachrüstungen (bis 1991) wurden Verbesserungen vorgenommen, die darauf abzielten, ursächliche Mängel zu beseitigen, die zum Unfall von Tschernobyl führten. Es handelt sich vor allem um Maßnahmen zur Verbesserung des Reaktor-physikalischen Verhaltens, der Abschalteneinrichtung und der Betriebsvorschriften. Damit wurden wirkungsvolle Vorkehrungen gegen Reaktivitätsstörfälle getroffen.

In einer zweiten Stufe der Nachrüstung wurden Auslegungsmängel der RBMK-Reaktoren beseitigt, die nicht ursächlich mit dem Unfall von

Tschernobyl zusammenhängen. Verbesserungen erfolgten unter anderem zum Brandschutz, zur Mess- und Steuerungstechnik, zur Notstromversorgung und bei den Sicherheitsventilen. Weitere Maßnahmen waren der Einsatz von Diagnose-technik und eine Neugestaltung der Leitwarte. Der Umfang der Maßnahmen ist in den einzelnen RBMK-Anlagen unterschiedlich.

Im Kernkraftwerk Tschernobyl wurden angesichts des ursprünglichen Beschlusses des ukrainischen Parlamentes (1991) zur frühzeitigen Stilllegung des Kernkraftwerks nur geringe Nachrüstungen durchgeführt. Besonders umfangreich sind diese in den RBMK-Reaktoren im Kernkraftwerk Leningrad (Sosnowi Bor). Dort erfolgten im Zusammenhang mit dem Austausch von Druckrohren in den älteren Blöcken Leningrad 1 und 2 verschiedene Nachrüstungen, mit dem Ziel, das Sicherheitsniveau dieser Anlagen anzuheben. Ähnliche Nachrüstungen fanden auch im RBMK-Reaktor Kursk 1 statt. Auch in den RBMK-Reaktoren der beiden Blöcke des Kernkraftwerks in Ignalina in Litauen sind kurzfristige technische Verbesserungen erfolgt, die dringend notwendig waren. Die wichtigsten Punkte betreffen ein zweites unabhängiges Reaktorabschaltsystem und die Gewährleistung der Integrität des Reaktorkühlsystems.

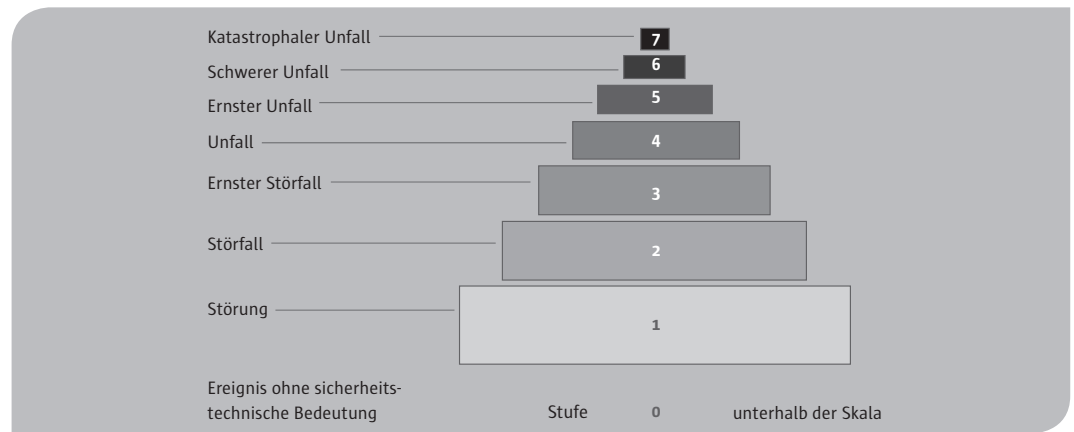
Obwohl mit den Untersuchungen des Kernkraftwerks Ignalina ein vertiefter, bis dahin nicht erreichter Beurteilungsstand für RBMK-Reaktoren erzielt worden war, konnten die Sicherheit und das Risiko dieser Reaktoren noch nicht ausreichend beurteilt werden. Als Beitrittskandidat zur EU hatte sich Litauen daher im Juni 2002 verpflichtet, den letzten Reaktor Ignalina 2 Ende 2009 außer Betrieb zu nehmen, was inzwischen erfolgte.

### **Verschiedene internationale Übereinkommen nach 1986**

Erfolge sind auch in anderen Bereichen der internationalen Zusammenarbeit zu verzeichnen: Bereits im September 1986 wurde in Wien unter der Schirmherrschaft der Internationalen Atomenergie-Organisation (IAEO) ein internationales Übereinkommen über die schnelle Unterrichtung bei nuklearen Störfällen und über die Hilfeleistung bei nuklearen Unfällen oder radiologischen Notstandssituationen getroffen. Das Ausmaß des Reaktorunfalls von Tschernobyl hat deutlich gemacht, dass die Maßnahmen zur Verhinderung einer großflächigen Freisetzung radioaktiver Stoffe einer internationalen Zusammenarbeit bedürfen, die das in anderen Ländern vorhandene Wissen und spezielles technisches Gerät erfordert.

Weiterhin wurde im Jahr 1990 eine internationale Bewertungsskala der IAEO zur Einteilung

**Abb. 14**  
INES-Skala  
**Quelle:**  
IAEO (IAEA)



von Vorkommnissen in kerntechnischen Anlagen eingeführt. Sie ermöglicht eine nachvollziehbare Einstufung der Ereignisse anhand einer klar abgestuften, international einheitlichen Bewertungsskala. Die INES-Skala (The International Nuclear and Radiological Event Scale) ist die Voraussetzung einer schnellen, zuverlässigen sicherheitstechnischen Bewertung eines Vorkommnisses mit seinen möglichen Folgen. Sie soll die Verständigung zwischen Fachwelt, Medien und Öffentlichkeit erleichtern. Eine Situation wie nach dem Unfall in Tschernobyl, bei der im Westen über mehr als eine Woche weitgehende Unklarheit über die Emissions- und Ausbreitungsverhältnisse herrschte, kann somit künftig ausgeschlossen werden.

#### Intensivierung der Ost-West-Kooperation

In den 1990er-Jahren wurde die Ost-West-Kooperation, begünstigt durch den Zusammenbruch des sozialistischen Wirtschaftssystems und die Öffnung der mittel- und osteuropäischen Staaten, auf verschiedenen Ebenen erweitert und intensiviert. Die übergeordneten Ziele der Kooperation sind dabei:

- Verbesserung der Sicherheit in den kerntechnischen Anlagen;
- Aufbau einer mehrsträngigen Sicherheitsstruktur mit einer unabhängigen Sicherheitskontrolle auf den Ebenen Wissenschaft, Industrie und Behörden;
- Entwicklung eines gemeinsamen Grundverständnisses von Sicherheit und Sicherheitskultur, das in eine internationale Sicherheitspartnerschaft einmünden soll.

Die Bundesrepublik Deutschland hat sich frühzeitig darum bemüht, auch international eine breite und wirksame Unterstützung zur Verbesserung der kerntechnischen Sicherheit in Osteuropa zu erreichen. Durch eine Initiative der Bundesregierung wurde die Sicherheit der Kernkraftwerke in Osteuropa 1992 in München erstmals ein zentrales Thema der jährlichen Wirtschaftsgipfel der G7-Staaten. Auf dem Münchener Gipfel

verständigten sich die G7-Staaten auf ein Aktionsprogramm, das bis heute die konzeptionelle Basis aller weltweit unternommenen Anstrengungen in diesem Bereich ist.

Das Aktionsprogramm ging davon aus, dass die RBMK-Reaktoren und die Druckwasserreaktoren der ersten Generation (WWER-440/W-230) nicht mit vertretbarem Aufwand auf ein sicherheitstechnisch akzeptables Niveau nachgerüstet werden könnten. Sie sollten daher nicht länger als unbedingt erforderlich betrieben werden. Für den befristeten Weiterbetrieb dieser Anlagen wurden kurzfristige technische Maßnahmen vor allem zur Verbesserung der Betriebssicherheit für notwendig gehalten. Tatsächlich haben aber Bulgarien bei Kozloduy 3 + 4 und die Slowakei bei Bohunice 1 + 2 so umfassende Sicherheitsverbesserungen durchgeführt, dass diese Länder das Sicherheitsniveau der Anlagen für vergleichbar mit dem gleichaltriger Anlagen im Westen halten.

Die im Aktionsprogramm getroffenen Vereinbarungen wurden auf folgenden verschiedenen Ebenen umgesetzt:

- bilaterale Unterstützung durch einzelne Länder;
- multilaterale Unterstützung in internationalen Förderungsprogrammen und Fonds;
- Zusammenarbeit im Rahmen internationaler Organisationen (IAEO, WANO, OECD etc.);
- Abstimmung und Koordination aller Programme in einem Koordinierungsmechanismus der G24 (Gruppe der 24 wirtschaftlich entwickelten OECD-Staaten).

Die IAEO in Wien war vor den politischen Veränderungen in Osteuropa praktisch das einzige Ost-West-Forum für den Informations- und Erfahrungsaustausch zur Reaktorsicherheit. Im Mittelpunkt standen dabei die von der IAEO organisierten Sicherheitsmissionen (OSART und ASSET) zur Überprüfung der Anlagen. Sie werden seit 1990 verstärkt für Anlagen in Osteuropa

durchgeführt. Veranlasst durch eine Initiative der Bundesregierung führt die IAEO seit 1990 ein Sonderprogramm zur Sicherheitsbeurteilung und -ertüchtigung von WWER-Anlagen durch. Das Programm wurde 1993 um die Beurteilung von RBMK-Anlagen erweitert und ist mittlerweile abgeschlossen. Die IAEO hat mit ihren Arbeiten Sicherheitsdefizite der WWER- und der RBMK-Reaktoren identifiziert und nach ihrer sicherheitstechnischen Bedeutung bewertet. Die Ergebnisse dieser Arbeiten sind seitdem eine wichtige Grundlage für die Ausarbeitung von Nachrüstungsprogrammen dieser Reaktorlinien.

Alle vier EU-Mitgliedstaaten, die Kernkraftwerke vom russischen Typ WWER betreiben, nämlich Bulgarien, die Slowakei, Tschechien und Ungarn, haben sich bei der Sicherheitsverbesserung ihrer Anlagen nach diesen Empfehlungen gerichtet. Der Stand der Nachrüstung ist folgender: Im Zuge der Fertigstellung von Mochovce 1 + 2 (Slowakei) und von Temelin 1 + 2 (Tschechien) sowie der Nachrüstung von Bohunice 1 + 2 und Paks 1 – 4 (Ungarn) wurden die IAEO-Empfehlungen vollständig umgesetzt. Die Arbeiten sind abgeschlossen. Ebenfalls umgesetzt wurden entsprechende Programme in Bohunice 3 + 4 (Slowakei), Dukovany 1 – 4 (Tschechien) und Kozloduy 3 – 6 (Bulgarien). Alle diese Programme wurden unter maßgeblicher Beteiligung westlicher Herstellerfirmen durchgeführt. Kozloduy 1 + 2 wurde entsprechend dem Beitrittsvertrag mit der EU Ende 2002, Kozloduy 3 + 4 Ende 2006 stillgelegt.

In Russland und der Ukraine wurden an den dortigen WWER-Anlagen verschiedene Einzelmaßnahmen durchgeführt, unter anderem im Rahmen der EU-Programme Tacis und Phare, jedoch stehen umfassende Programme zur Umsetzung der IAEO-Empfehlungen aus.

#### **Programm zur Stilllegung des Kernkraftwerks Tschernobyl**

Auf deutsch-französische Initiative hin befasste sich der Wirtschaftsgipfel 1994 in Neapel mit der Stilllegung des Kernkraftwerks Tschernobyl und der Reform des Energiesektors in der Ukraine. Es folgten längere Verhandlungen mit der ukrainischen Regierung. Im Dezember 1995 vereinbarten die G7-Staaten und die EU-Kommission mit der ukrainischen Regierung das „Memorandum of Understanding on the Closure of the Chernobyl Nuclear Power Plant“ (MoU). Mit dem MoU wurde ein umfassendes Programm zur Stilllegung des Kernkraftwerks Tschernobyl im Jahr 2000 vereinbart. Dazu sicherten die G7-Staaten der Ukraine zu:

- Finanzmittel für die Schließung des Kernkraftwerks Tschernobyl und für die Sanierung des Sarkophags bereitzustellen,

- darauf hin zu wirken, dass durch die internationalen Finanzinstitutionen Kredite für den Fertigungsbau von zwei begonnenen Druckwasserreaktoren (WWER-1000) bereitgestellt werden sowie
- die Rekonstruktion und Reform des Energiesektors zu unterstützen.

Aus Anlass des 10. Jahrestags des Unfalls in Tschernobyl haben sich die G7-Staaten und Russland auf dem Sicherheitsgipfel 1996 in Moskau verpflichtet, der kerntechnischen Sicherheit bei der Nutzung der Kernenergie absoluten Vorrang zu geben. Alle Staaten werden dazu angehalten, Reaktoren, die die international gültigen Sicherheitsanforderungen nicht erfüllen, nachzurüsten oder außer Betrieb zu nehmen. Zudem werden sie aufgefordert, der Nuklearen Sicherheitskonvention beizutreten. Weiterhin wurde auf dem Gipfel vereinbart, die Kooperation auf Sicherheitsfragen des Brennstoffkreislaufs und auf die Anlagensicherung auszudehnen.

In Denver wurden 1997 auf dem Wirtschaftsgipfel Maßnahmen zur Unterstützung der Ukraine bei der Lösung von Aufgaben beschlossen, die mit dem durch den Unfall zerstörten Block 4 des Kernkraftwerks in Tschernobyl und mit dem Sarkophag zusammenhängen. Über einen speziellen Fond bei der Europäischen Bank für Wiederaufbau und Entwicklung (EBWE) – den Chernobyl Shelter Fund (CSF) – wird dafür ein international ausgearbeiteter Shelter-Implementation-Plan (SIP) realisiert.

#### **EU-Programme Phare und Tacis**

Phare (Poland and Hungary Aid for Reconstruction of the Economy) und Tacis (Technical Assistance for the Commonwealth of the Independent States) sind Förderungsprogramme der EU-Kommission, mit denen die osteuropäischen Staaten seit 1990/1991 beim Aufbau demokratischer Strukturen und der Marktwirtschaft unterstützt werden. Phare diente ursprünglich der Unterstützung der mittel- und osteuropäischen Länder und wurde später auf die EU-Beitrittskandidaten ausgedehnt, Tacis der Förderung der Nachfolgestaaten der Sowjetunion. In diesen Programmen sind auch finanzielle Mittel zur Verbesserung der nuklearen Sicherheit enthalten. Sie betragen ca. 720 Millionen ECU (Europäische Währungseinheit bis 1998) für die Jahresbudgets 1990 bis 1997. Knapp 80 % der Mittel entfallen auf Tacis und ca. 20 % auf Phare. Zur fachlichen Koordination der Programme und zur Unterstützung der EU-Kommission haben Behörden, technische Sicherheitsorganisationen und die Industrie aus den EU-Mitgliedstaaten verschiedene Gremien gebildet.



Die Schwerpunkte der mit Phare und Tacis geförderten Vorhaben zur nuklearen Sicherheit liegen mit einem finanziellen Anteil von mehr als 80 % bei der Industrie. Knapp 15 % der Gesamtmittel (ohne den EU-Beitrag zum MoU) entfallen auf die Unterstützung der Behörden und ihrer wissenschaftlich-technischen Institutionen. In den ersten Jahren konzentrierten sich die Fördermaßnahmen hauptsächlich auf Sicherheitsstudien und -analysen. Die Schwerpunkte haben sich in der letzten Zeit folgerichtig auf direkte Maßnahmen zur Verbesserung der Sicherheit in den Anlagen verlagert. Dementsprechend entfällt ein großer Teil der industrieseitigen Unterstützung für Russland und die Ukraine auf direkte Maßnahmen vor Ort in den Anlagen (On-site-Systems).

Derzeit gibt es praktisch für alle osteuropäischen Länder im Rahmen der Programme Phare und Tacis Vorhaben, mit denen die Sicherheitsbehörden bei der Erarbeitung atomrechtlicher Grundlagen, bei der Erstellung sicherheitstechnischer Regelwerke und beim Aufbau leistungsfähiger Genehmigungs- und Aufsichtsstrukturen unterstützt werden. In den Programmen Phare und Tacis werden beträchtliche Mittel zur Verbesserung der nuklearen Sicherheit in Osteuropa bereitgestellt. Sie sind gemessen an den tatsächlichen Erfordernissen jedoch zu gering. Die Erwartungen, die ursprünglich von östlicher Seite in die Programme gesetzt worden waren, konnten daher nur zum Teil erfüllt werden.

Eine weitere Quelle der Unterstützung wurde mit der Einrichtung des Nuklearen Sicherheitsfonds geschaffen. Dort werden finanzielle Mittel für dringend notwendige Verbesserungen zum befristeten Weiterbetrieb von älteren Anlagen bereitgestellt. Der Fond ist bei der EBWE in London eingerichtet. Deutschland ist eines der wichtigsten Geberländer. Aus dem Nuklearen Sicherheitsfond sind bisher Projekte in Bulgarien, Litauen und Russland finanziert worden, ein erheblicher Anteil dient zur Finanzierung der Stilllegung des Kernkraftwerks Tschernobyl.

#### **Deutsche Programme der Ost-West-Kooperation**

In der internationalen Zusammenarbeit mit Osteuropa nimmt Deutschland eine führende Position ein. Die wissenschaftlich-technische Zusammenarbeit vor allem mit Russland begann Ende der 1980er-Jahre. Heute bestehen mit Behörden und anderen Partnerinstitutionen in den osteuropäischen Ländern enge und vertrauensvolle Beziehungen. Deutschland verfügt über umfangreiche Kenntnisse und Erfahrungen zur kerntechnischen Sicherheit in Osteuropa, dies nicht zuletzt durch die Fachleute aus Ostdeutschland. Hinzu kommt ein anerkannt hoher Sicherheitsstandard der deutschen Kerntechnik. Er ist eine entscheidende

Voraussetzung dafür, dass Deutschland eine führende Rolle in der Zusammenarbeit mit den osteuropäischen Ländern wahrnimmt.

Die Bundesrepublik gehört zu den westlichen Ländern, die große Anteile der finanziellen Mittel zur Unterstützung der osteuropäischen Länder aufbringen. Dies gilt sowohl für die direkte, bilaterale Zusammenarbeit als auch für die Beiträge, die für die multilateralen Unterstützungsprogramme bereitgestellt werden. Grundlage dieser bilateralen Zusammenarbeit sind Abkommen der Bundesregierung bzw. des Umweltministeriums (BMU) und des Forschungsministeriums (BMBF) mit Russland, der Ukraine und anderen osteuropäischen Ländern. Schwerpunkte der bilateralen Zusammenarbeit sind das BMU-Programm zur Verbesserung der kerntechnischen Sicherheit und zur Unterstützung der Sicherheitsbehörden sowie das BMBF-Programm zur wissenschaftlich-technischen Zusammenarbeit (WTZ).

#### **Industrieseitige Zusammenarbeit und Partnerschaften**

Nach Gründung der WANO im Jahr 1989 beteiligten sich auch die osteuropäischen Betreiber von Kernkraftwerken an dem weltweiten Informationsaustausch und profitieren von den verfügbar gemachten Betriebserfahrungen. Die Betreiber der deutschen Kernkraftwerke haben dazu ein Programm für Sicherheitspartnerschaften aufgebaut. Die deutschen Kernkraftwerke haben dabei in Russland, der Slowakischen und der Tschechischen Republik, der Ukraine sowie in Ungarn Partnerschaften mit 15 osteuropäischen Betreibern übernommen. Dieses Programm wird in fast allen WWER-Anlagen erfolgreich umgesetzt, bei den Partnerschaften mit den Kernkraftwerken Smolensk und Leningrad handelt es sich um RBMK-1000-Anlagen.

In der ersten Phase dieser Partnerschaft lag die Kooperation schwerpunktmäßig im Bereich technischer Unterstützungen z. B. durch Lieferung von dringend erforderlichen Ersatzteilen. Mittlerweile steht der Erfahrungsaustausch im Mittelpunkt. Zuletzt war das Thema „Modernisierung und Lebensdauerverlängerung in Kernkraftwerken“ Gegenstand des Erfahrungsaustausches. Neben technischen, wirtschaftlichen und regulatorischen Aspekten fortgeschrittener Vorhaben zum Lebensdauermanagement wurde dabei auch über Modernisierungsarbeiten in den Anlagen berichtet, die einen zentralen Bestandteil der Programme des Alterungsmanagements darstellen. Die Modernisierung hat große Bedeutung für die Gewährleistung eines hohen Sicherheitsniveaus zur Aufrechterhaltung eines sicheren Betriebs über die projektierte Betriebsdauer der Kernkraftwerke hinaus.



Sicherung und Entsorgung  
des stillgelegten Kernkraftwerks  
Tschernobyl

4

*Nachdem das Kernkraftwerk Tschernobyl Ende 2000 stillgelegt und vom Netz genommen wurde, muss in der Ukraine angesichts der angespannten Stromversorgungslage Ersatz für die ausgefallene Kraftwerksleistung geschaffen werden. Seit Mitte der 1990er-Jahre finden auf internationaler Ebene verschiedene Aktivitäten statt, um die schweren Folgen für die Menschen und die Umwelt in der näheren und weiteren Umgebung des Standortes Tschernobyl zu bewältigen. Eine davon war die deutsch-französische Initiative für Tschernobyl. Um den jetzigen Sarkophag in ein „ökologisch sicheres System“ umzuwandeln, wurde der Shelter Implementation Plan (SIP) aufgelegt. Für die Beschäftigten am Standort Tschernobyl müssen neue Arbeitsplätze geschaffen werden.*

Die von westlicher Seite immer wieder vorgetragene Forderung an die ukrainische Regierung, das Kernkraftwerk Tschernobyl stillzulegen, war nach dem Unfall ein ständiges Thema der Medien und hat vielfach zu widersprüchlichen Meldungen, Spekulationen und Einschätzungen geführt. Angesichts der energiewirtschaftlichen Lage in der Ukraine war es offenkundig, dass eine Stilllegung nur mit umfangreichen Hilfsmaßnahmen seitens der westlichen Länder zu realisieren ist.

Alle Ersatzkonzepte gehen davon aus, dass der Energiesektor der Ukraine grundsätzlich einer umfassenden Reform bedarf und insbesondere die großen Potenziale zur rationellen und sparsamen Energienutzung erschlossen werden müssen. Berechnungen westlicher Fachleute haben ergeben, dass in der Ukraine beispielsweise allein durch den Einsatz regelbarer Elektroantriebe rechnerisch eine Leistung von über 3.000 MW ersetzt werden könnte. Die Kosten hierfür werden auf 300 bis 400 Millionen US-Dollar veranschlagt. Die Umsetzung würde einen Zeitraum von 10 bis 15 Jahren umfassen. Weitere kostengünstige Potenziale gibt es in allen Verbrauchssektoren. Ein zentraler Ansatzpunkt ist das zu niedrige Preisniveau, das kaum Anreize zum Energiesparen gibt, denn Strom und Brennstoffe werden weit unter dem Selbstkostenpreis abgegeben.

Für den direkten Ersatz der ausgefallenen Leistung am Standort Tschernobyl standen drei unterschiedliche Konzepte zur Debatte:

- Fertigstellung von drei neuen, sicherheitstechnisch modernen Reaktoren, die sich in der Ukraine in fortgeschrittenem Bauzustand befanden.
- Bau eines modernen Gaskraftwerks mit 3.000 MW Leistung bei der Stadt Slawutich, wodurch auch ein geringer Teil der Beschäftigten des Kernkraftwerks Tschernobyl Arbeit in dem neuen Werk finden könnte.
- Ertüchtigung und Modernisierung der Kohlekraftwerke des Landes, die dadurch auch auf höhere Leistung ausgerichtet werden könnten.

Nach jahrelangen Verhandlungen zwischen den westlichen Geberländern und der ukrainischen Regierung über Wege zur Stilllegung des Kernkraftwerks Tschernobyl wurde am 20. Dezember 1995 ein Abkommen geschlossen. Vertreter beider Seiten unterzeichneten ein Memorandum über die Schließung der Anlage, nachdem ein Minimalkompromiss gefunden wurde, der auf endgültige Angaben über Kosten und Fristen verzichtet, aber zumindest den Anfangsschub für die Stilllegung geben sollte. Das Memorandum legte auch lediglich eine Anfangsfinanzierung fest, deren weitere Ausgestaltung noch Gegenstand mehrerer Machbarkeitsstudien und neuer Verhandlungen sein sollte. Vereinbart wurde die Umgestaltung des Sarkophags in ein ökologisch sicheres System.

#### **Die deutsch-französische Initiative für Tschernobyl**

Am 12. April 1996 kündigten in Wien die französische und die deutsche Umweltministerin gemeinsam eine Initiative zur Kooperation mit der Ukraine, Weißrussland und Russland über wissenschaftliche Projekte zu den Konsequenzen des Unfalls von Tschernobyl an. Die deutsch-französische Initiative wird von den Regierungen sowie von der französischen Electricité de France (EDF) und von deutschen Energieversorgungsunternehmen finanziert.

Im Juli 1997 haben Frankreich, Deutschland und die Ukraine die deutsch-französische Initiative durch die Unterzeichnung einer Vereinbarung zwischen der GRS, ihrer französischen Partnerorganisation IRSN (Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire) und dem Tschernobyl-Zentrum (Chernobyl Centre for Nuclear Safety, Radioactive Waste and Radioecology, im Jahr 1996 per Dekret der ukrainischen Regierung geschaffen) in eine verbindliche Form gebracht. Seit dem Unfall waren zahlreiche Studien über die Folgen des Unfalls in Tschernobyl in den betroffenen Republiken der ehemaligen UdSSR durchgeführt worden. Sie wurden ohne wirkliche Koordination teils mit, teils ohne Beteiligung internationaler Instanzen und westlicher Wissenschaftler verwirklicht. Einige wurden niemals veröffentlicht, andere haben

nur unzusammenhängende, heterogene und sogar widersprüchliche Ergebnisse in Bezug auf die ökologische und gesundheitliche Tragweite des Unfalls vom 26. April 1986 hervorgebracht.

Um die Kohärenz der Aktionen kurz-, mittel- und langfristig herzustellen und zu garantieren, war es unabdingbar, alle Kenntnisse zusammenzufassen und zu bewerten, damit die aus dem Unfall resultierende Gesamtsituation beherrscht und verbessert werden kann. Das wesentliche Ziel der deutsch-französischen Initiative war es daher, die bestehenden Daten und Erkenntnisse zu sammeln und einzuordnen, um eine sichere und objektive Informationsbasis zu erstellen, die für die Planung von zukünftigen Maßnahmen, zur Information der Öffentlichkeit und für spätere wissenschaftliche Arbeiten von Nutzen ist.

Dazu finanzierten Frankreich und Deutschland drei Kooperationsprogramme mit einem Budget von rund 6 Millionen Euro:

- Sicherheitszustand des Sarkophags von Tschernobyl;
- Untersuchung der radioökologischen Folgen des Unfalls;
- Untersuchung seiner gesundheitlichen Auswirkungen

Im Rahmen dieser Vereinbarung organisieren GRS und IRSN die methodische Unterstützung für ukrainische, russische und weißrussische Organisationen zur Durchführung wissenschaftlicher Projekte in den drei Kooperationsprogrammen.

### **Die Programme Sarkophag, Radioökologie und Gesundheit**

Das Hauptziel des Programms zum Sicherheitszustand des Sarkophags war die Sammlung und Bewertung von Informationen zur bautechnischen, nuklearen und radiologischen Sicherheit des Sarkophags und die Speicherung dieser Informationen in einer Datenbank, deren Entwicklung vom ISTC (Interdisziplinäres Wissenschaftlich-Technisches Zentrum der Akademie der Wissenschaften der Ukraine) begonnen worden war. Diese Informationen sollen eine Basis für die Bewertung des gegenwärtigen Zustands und für künftige Maßnahmen schaffen. Bei der Untersuchung der radiologischen Folgen des Unfalls konzentrierte sich das Programm der deutsch-französischen Initiative vor allem auf die 30-km-Zone und das Gebiet um Gomel, Weißrussland sowie um Briansk in Russland.

Seit dem Unfall kursieren widersprüchliche Informationen über die Art und Schwere der Gesund-

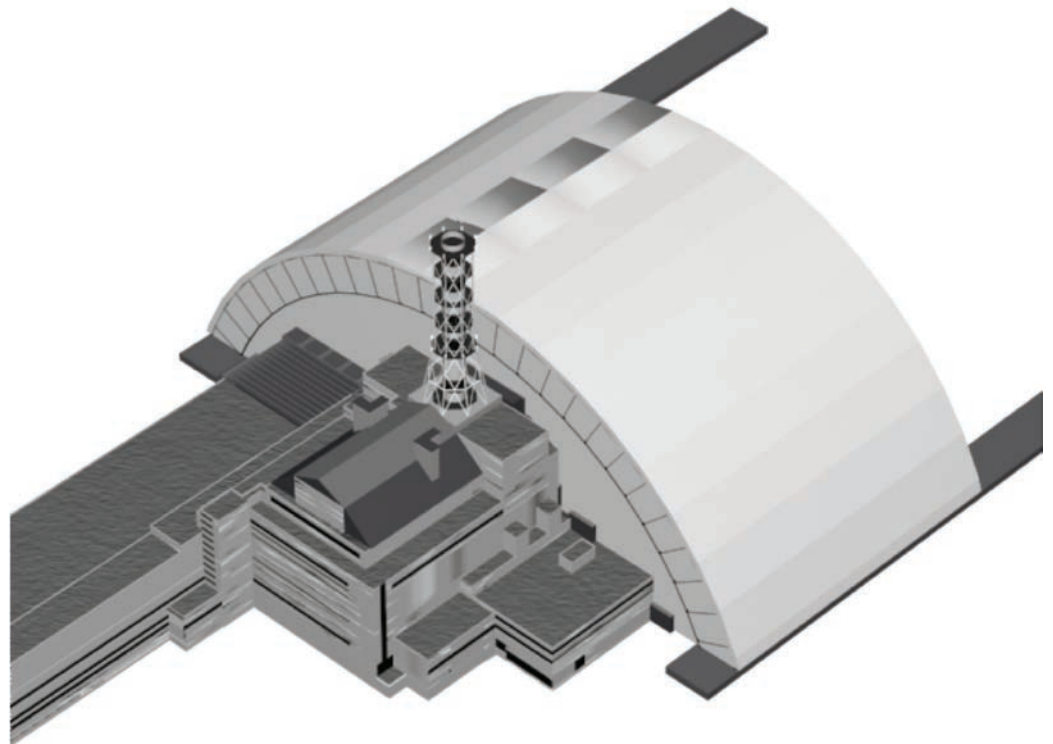
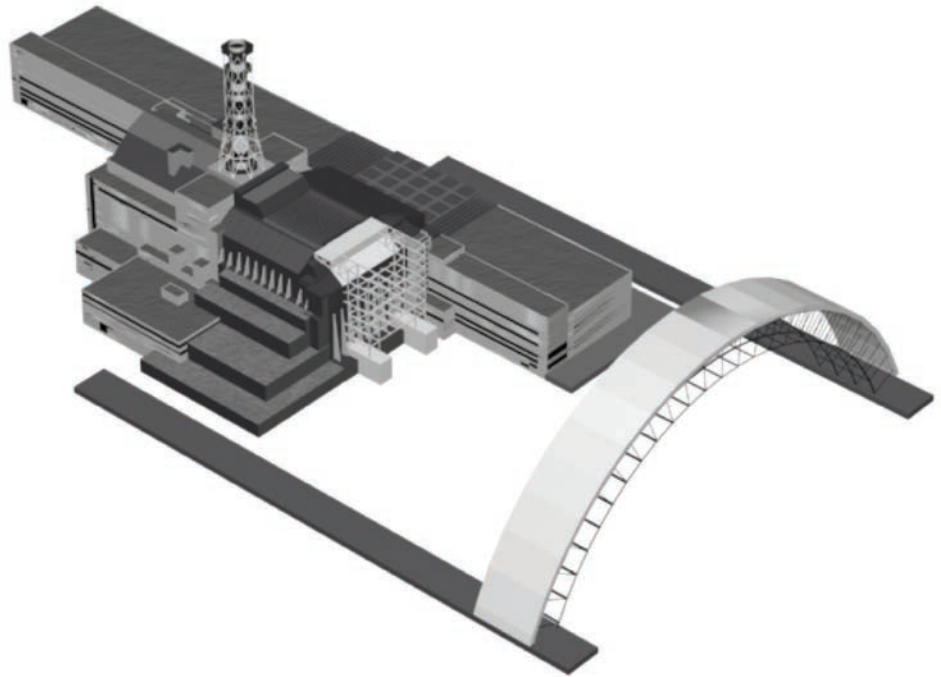
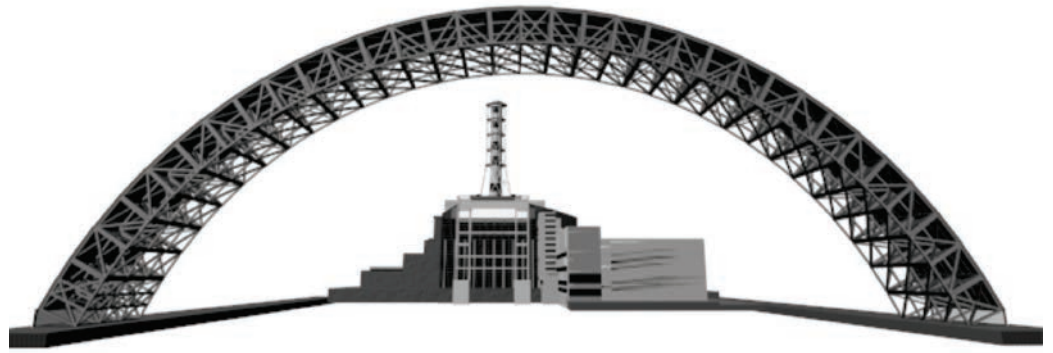
heitsprobleme, die in den verschiedenen Regionen der betroffenen drei Republiken beobachtet worden sind. Allgemein herrscht weiterhin eine beträchtliche Verunsicherung, obwohl inzwischen unter Wissenschaftlern ein weitgehender Konsens über die wichtigsten gesundheitlichen Folgen besteht. Es sind zahlreiche Studien von sehr unterschiedlicher methodischer Qualität durchgeführt worden. Die Schlussfolgerungen einiger dieser Untersuchungen wurden veröffentlicht, ohne dass die wissenschaftliche Richtigkeit der Ergebnisse garantiert werden konnte. Andere, unter streng wissenschaftlichen Bedingungen durchgeführte Arbeiten, stehen Fachleuten zur Verfügung, nicht aber der direkt betroffenen Bevölkerung.

Die Hauptschwierigkeit bei der Erstellung einer eindeutigen Bilanz liegt in der Unzulänglichkeit der Beurteilung epidemiologischer Studien in den osteuropäischen Ländern. Dies betrifft insbesondere die Art und Weise der Registrierung von Krebsfällen, die Struktur anderer Krankheitsregister, Bevölkerungsstatistiken etc. Präzise Dosisrekonstruktionen sowie die langfristigen Folgen von niedrigen Strahlungsdosen bleiben auch weiterhin ein Problem. Darüber hinaus wurden Gesundheitsinformationen (Krebsregister, Register für angeborene Missbildungen, Kataloge anderer gesundheitlicher Auswirkungen) sowie die Register der Aufräumarbeiter nicht nach einheitlichen methodischen Standards erhoben und sind auf zahlreiche Datensammlungen verstreut. Das wichtigste Ziel des Gesundheitsprogramms der deutsch-französischen Initiative war es daher, bestehende Datensammlungen über den Gesundheitszustand und die Dosimetrie zu validieren, die angewandten Methoden anzugleichen und die Verbreitung der Ergebnisse unter Wissenschaftlern und in der Öffentlichkeit zu fördern.

Die aktive Phase der Unteraufträge der deutsch-französischen Initiative Tschernobyl war im wesentlichen Ende 2003 abgeschlossen worden. Speziell zum Programm Gesundheit wurde die abschließenden Ergebnisdokumentationen bis zum Sommer 2004 erstellt. Die GRS, IRSN und Chernobyl Centre präsentierten die Arbeiten der deutsch-französischen Initiative in einem abschließenden Workshop Anfang Oktober 2004 in Kiew.

### **Shelter Implementation Plan (SIP)**

Im Mai 1997 legte die Firma Trischler & Partner, Darmstadt, einen in enger Zusammenarbeit mit ukrainischen Organisationen und westlichen Experten der G7-Staaten erstellten Arbeitsplan (Shelter Implementation Plan, SIP) vor. Es handelte sich dabei um ein technisch sehr komplexes Projekt, dessen Realisierung sich voraussichtlich über 8 bis 10 Jahre erstrecken sollte. Das



**Abb. 15**

Modell des neuen Sarkophags. Außerhalb des havarierten Blocks 4 soll eine Stahlkonstruktion in Form eines Bogens errichtet und dann über den alten Sarkophag geschoben werden. Die mobile Vorrichtung soll ca. 100 Meter hoch sein und eine Spannweite von ca. 250 Metern haben.

**Quelle:**

ECCOM, Kiev

SIP-Projekt umfasst die notwendigen Schritte für die Stabilisierung der baulichen Strukturen und den sicheren Einschluss der radioaktiven Stoffe im Unglücksreaktor und enthält alle erforderlichen technischen Maßnahmen, Kostenermittlungen und Regelungen zum Management des Projekts, das damit kurzfristig umgesetzt werden sollte. Der SIP wurde im Juni 1997 vom ukrainischen Minister Kostenko und vom G7-Vorsitz unterzeichnet und ist seitdem Grundlage für die weitere Zusammenarbeit.

Hauptinhalte des SIP sind:

- Reduzierung der potenziellen Gefahr eines Einsturzes des Sarkophags (geotechnische und seismische Untersuchungen, Stabilisierung der tragenden Bauteile des existierenden Sarkophags, Abschirmung, Überwachung);
- Reduzierung der radiologischen Auswirkungen für den Fall eines Einsturzes (Staubbehandlung, Notfallschutzmaßnahmen, Verbesserung der Rückhaltesysteme für radioaktive Partikel);
- Verbesserung der nuklearen Sicherheit innerhalb des Sarkophags (Charakterisierung der brennstoffhaltigen Massen, Überwachung des verbliebenen Kernbrennstoffs und dessen Kontrolle, Kritikalitätsverhinderung, Wasserbehandlung);
- Verbesserung der Sicherheit des Personals und der Umwelt (Arbeits- und Strahlenschutz sowohl für die im Sanierungsprojekt beschäftigten Arbeiter als auch für die Belegschaft am Standort Tschernobyl, Brandschutz, Überwachungssysteme, Informationssystem);
- Strategie für eine langfristige Standortsanierung und Studien für eine Umwandlung des Sarkophags in einen ökologisch sicheren Zustand (Strategie und Technologie zur Entfernung der brennstoffhaltigen Massen, neuer Einschluss und teilweiser Rückbau des Sarkophags).

Insgesamt sind im SIP 22 Teilprojekte (Tasks) festgelegt. Die verhältnismäßig lange Laufzeit des Sanierungsprojekts (ca. 10 Jahre) beruht im Wesentlichen auf zwei Umständen: Zum einen herrschen schwierige Arbeitsbedingungen aufgrund hoher Strahlenbelastungen und eingeschränkter Standfestigkeit des vorhandenen Bauwerks; zum anderen können viele technische Einzelheiten, deren Kenntnis für die Planung einzelner Arbeitsschritte notwendig ist, erst im Verlauf der Arbeiten bestimmt werden. Nach aktuellen Schätzungen werden sich die Kosten für die im SIP definierten Projekte von bisher veranschlag-

ten 1,3 Milliarden US-Dollar über einen Zeitraum bis voraussichtlich mindestens 2013 weitere Mittel von mehreren Hundert Millionen US-Dollar erfordern.

Die von den G7-Staaten und der EU zur Verfügung gestellten Mittel werden in einen multilateralen Sarkophag-Fonds (CSF – Chernobyl Shelter Fund) eingezahlt, der nach dem Muster des Nuklearen Sicherheitsfonds bei der EBWE eingerichtet wurde. Die Bank verwaltet diese Mittel und vergibt entsprechende Aufträge zur Durchführung des SIP. Die Gebersammlung des Fonds überwacht die Tätigkeiten der Bank. In den Regeln für den Fonds wurde ein eindeutiger Bezug auf das SIP-Projekt hergestellt, um sicherzustellen, dass sich der Fonds und damit die vorgesehene Finanzierung nur auf dieses Projekt bezieht. Der CSF trat am 6. November 1997 offiziell bei der EBWE in Kraft.

#### **Perspektive für den Standort des Kernkraftwerks Tschernobyl**

Für die Durchführung aller weiteren Arbeiten zur Stilllegung der Blöcke 1, 2 und 3 sowie zur Sicherung des Blocks 4 wurde mit Beschluss der ukrainischen Regierung das Kernkraftwerk Tschernobyl am 25. April 2001 aus dem Verband des Konzerns Energoatom herausgelöst und zu einem eigenständigen staatlichen Unternehmen umgewandelt. Es untersteht dem Minister für Brennstoff und Energie und unterliegt der direkten Kontrolle durch den Präsidenten der Ukraine.

Die Situation am Standort ist weiterhin kompliziert. In Dauerbetriebszeiten hatte die Anlage 6.000 Beschäftigte, die bis 1996 auf 12.000 erhöht wurden. Mittlerweile hat sich die Zahl der Beschäftigten auf 4.350 verringert. Nur zögerlich werden vom Management des Kernkraftwerks Fragen der Umstrukturierung und der Personalauswahl auf die neue Aufgabenstellung in Angriff genommen. Aus dem ehemaligen Instandhaltungsbereich der Anlage wurde im November 2001 ein eigenständiges Unternehmen „AtomRemontService“ gebildet, das für alle ukrainischen Kernkraftwerke verschiedene Dienstleistungen erbringen soll. Dazu zählen Maßnahmen zur Modernisierung und Erhöhung der Sicherheit, Beteiligung an der Errichtung neuer Anlagen in Kernkraftwerken, der Transport von frischem und abgebranntem Brennstoff, Maßnahmen zum physischen Schutz sowie Ausbildung und Training von Personal. Das Unternehmen soll einmal bis zu 1.100 Mitarbeiter haben.

Diese Maßnahme ist jedoch problematisch, da in den ukrainischen Kernkraftwerken selbst Überkapazitäten vorhanden sind. Offensichtlich werden soziale Unruhen befürchtet, wenn am Standort

Tschernobyl eine nur an den Stilllegungsaufgaben orientierte Personalpolitik realisiert würde. So hofft man auf Arbeiten bei Errichtung und Betrieb der mit internationaler Hilfe begonnenen Vorhaben sowohl im Rahmen der Stilllegungsarbeiten am Standort als auch bei der Errichtung des zweiten Sarkophags.

Ein erstes Projekt ist bereits abgeschlossen. Dabei handelt es sich um ein Heizkraftwerk am Standort des Kernkraftwerks, dessen Errichtung von der US-amerikanischen Regierung finanziell ermöglicht, von einer US-amerikanischen Firma organisiert und von ukrainischen Unternehmen ausgeführt wurde. Seit Anfang 2002 liefert die Anlage Wärme und Prozessdampf zur Versorgung des Kernkraftwerks und seiner Einrichtungen am Standort. Von den Kosten in Höhe von 37,5 Millionen US-Dollar hat das US-amerikanische DOE 30 Millionen US-Dollar übernommen. Ein zweites Projekt unter der Leitung von Westinghouse/Brüssel und NNC befasst sich mit zwei Maßnahmen, die zur Vorbereitung der Stilllegung dienen:

- Errichtung eines Zwischenlagers für abgebrannte RBMK-Brennelemente, begonnen durch ein französisches Auftragnehmerkonsortium unter Leitung von Framatome ANP (heute AREVA NP GmbH), fortgeführt durch ein Konsortium unter Leitung des US-Unternehmens Holtec. Das Lager hat eine Kapazität für 25.000 Brennelemente und 3.000 Absorberstäbe. Damit soll das gesamte Kernbrennstoff-Inventar vorerst am Standort zwischengelagert werden.
- Errichtung eines Werks zur Verfestigung flüssiger radioaktiver Rückstände nach dem Zementierungsprinzip, das ein belgisch-französisch-italienisches Konsortium durchgeführt hat (Belgatom/SGN/Ansaldo) und das nunmehr durch die Ukraine fertiggestellt werden soll. Die Anlage soll in etwa 10 Jahren ca. 35.000 m<sup>3</sup> flüssige Abfälle verarbeiten. Sie wird durch die EBWE mit 20 Millionen Euro gefördert.

Ein drittes Projekt wurde Anfang 2001 gestartet. Es soll die Betriebsführung begleiten und die Stilllegung vorbereiten. Ein Schwerpunkt dieses Projekts ist eine Anlage zur Aufbereitung fester radioaktiver Abfälle, die entweder bereits in einem kraftwerkseigenen Zwischenlager liegen oder die zukünftig bei der Stilllegung entstehen. Die Anlage soll außerdem einen Teil der provisorisch in Gräben gelagerten Trümmer aus der Havarie verarbeiten. Das Projekt (ICSRM) besteht aus drei Teilanlagen:

- einer Anlage zur Rückholung fester Abfälle aus einem bestehenden Zwischenlager,

- einer Anlage zur Behandlung und Verpackung der festen Abfälle,
- einem für 300 Jahre kontrollierter Lagerzeit konzipierten Lager für konditionierte radioaktive Abfälle mit kurzen und mittleren Halbwertszeiten sowie Endprodukten aus den Behandlungsanlagen für feste und flüssige Rückstände.

Turn-key-Auftragnehmer für das ICSR-M-Projekt war die NUKEM Technologies GmbH. Der Projektwert liegt bei 44 Millionen Euro. Die Ukraine beteiligt sich mit 2,7 Millionen Euro an diesen Kosten. Das oberflächennahe Endlager wurde dem Betreiber Technocenter im Dezember 2007 übergeben, die Anlagen zur Rückholung bzw. Behandlung und Verpackung der Abfälle im April 2009. Damit ist das ICSR-M-Projekt das erste Abfallbehandlungsprojekt unter westlicher Regie, das am Standort Tschernobyl erfolgreich abgeschlossen wurde.

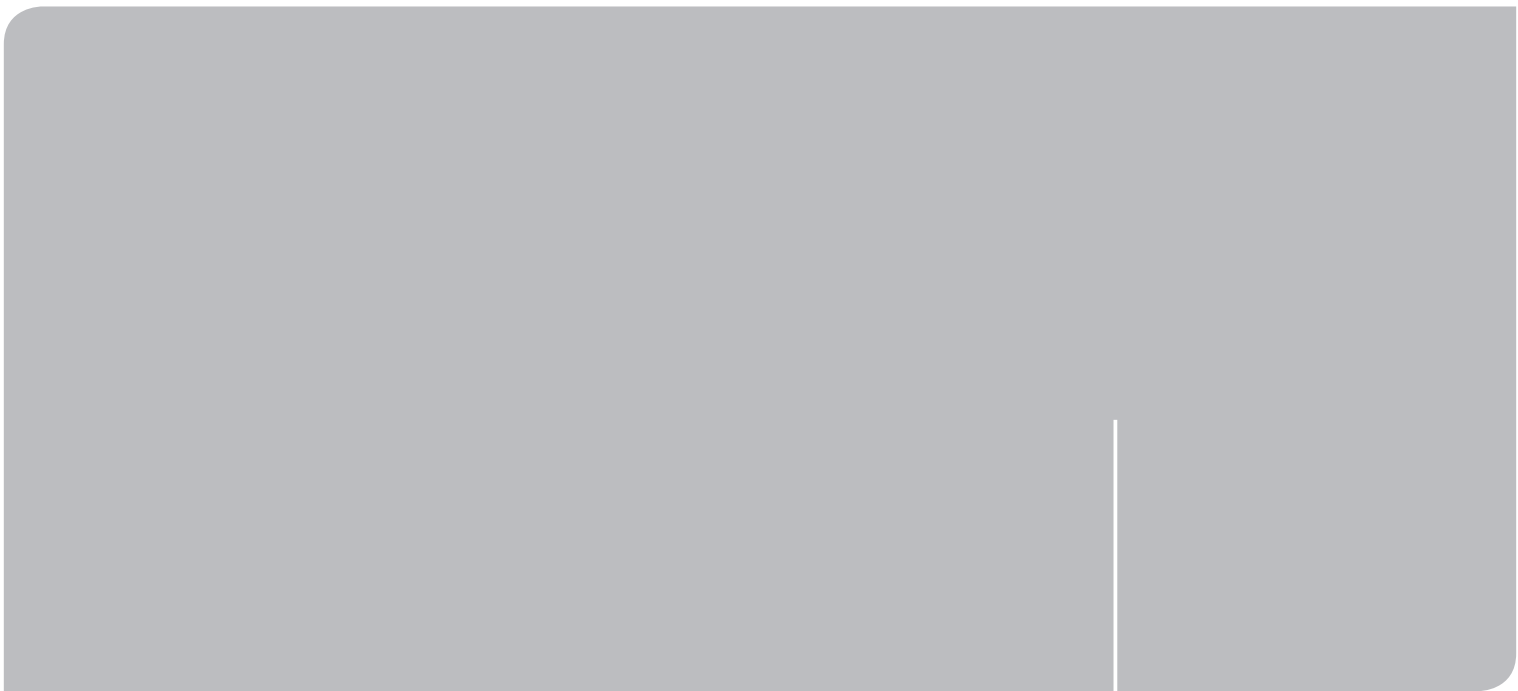
Die Stilllegungsgenehmigung für die Blöcke 1, 2 und 3 sowie für alle Objekte, die für die Zwischenlagerung der abgebrannten Kernbrennstoffe und radioaktiven Abfälle vorgesehen sind, wurde im März 2002 erteilt. Zur Nutzung des intellektuellen Potenzials und der Erfahrungen der Fachleute am Standort wurden eine Reihe wissenschaftlicher Einrichtungen in Slavutich angesiedelt, die mit internationaler Unterstützung und unter Leitung des Internationalen Tschernobyl-Zentrums (ITZ) wissenschaftlich-technische Leistungen auf dem Gebiet der Kernenergie und des Strahlenschutzes bearbeiten. Die Ukraine verfolgt damit insbesondere das Ziel, nationale wissenschaftliche Kapazitäten auf diesen Gebieten aufzubauen, nachdem durch den Zerfall der Sowjetunion fast alle einschlägigen Forschungskapazitäten in Russland verblieben sind.

Das ITZ wurde 1996 gebildet. Es untersteht direkt dem Ministerrat der Ukraine und wird von einem Rat von bevollmächtigten Vertretern der beteiligten Länder (USA, England, Japan, Frankreich und Deutschland) unterstützt. Das ITZ befasst sich gegenwärtig mit der Stilllegung der Anlage und der Stabilisierung des Sarkophags, radioökologischen Untersuchungen in der Sperrzone des Standortes sowie mit Forschungsprojekten zur nuklearen Sicherheit, der Behandlung von radioaktiven Abfällen und des Strahlenschutzes. Zudem besteht ein Labor für wissenschaftlich-technische Arbeiten zur Sicherheit der laufenden Kernkraftwerke der Ukraine. Die ukrainische Regierung beabsichtigt, weitere Unternehmen und Institutionen am Standort anzusiedeln und damit das Problem der Beschäftigung des teilweise hoch qualifizierten Personals zu lösen.





Glossar 5



### **Aktivität**

Aktivität ist die Zahl der je Sekunde in einer radioaktiven Substanz zerfallenden Atomkerne. Die Maßeinheit ist das Becquerel (Bq). Ein Bq entspricht dem Zerfall eines Atomkerns pro Sekunde.

### **Dampfblasenkoeffizient**

Die Reaktivität eines Reaktors, ein Maß für das Abweichen der Kettenreaktionsrate vom stabilen Gleichgewichtszustand, ist je nach Anlage von einer Reihe von Betriebsparametern abhängig. Ein negativer Dampfblasenkoeffizient bewirkt, dass bei einem Ansteigen der Kettenreaktionsrate und dem damit verbundenen Temperaturanstieg des Kühlmittels durch den sich vergrößernden Dampfblasenanteil automatisch die Kettenreaktionsrate und damit die Leistung begrenzt wird und wieder zurückgeht. Im deutschen Genehmigungsverfahren muss nachgewiesen werden, dass der Dampfblasenkoeffizient immer negativ ist. Bei russischen RBMK-Reaktoren ist er positiv; eine Leistungs- und Temperatursteigerung bewirkt eine immer schneller zunehmende Kettenreaktionsrate, die weitere Leistungs- und Temperaturerhöhungen zur Folge hat. Dieser Effekt war die physikalische Ursache für den Reaktorunfall in Tschernobyl.

### **Dekontamination**

Beseitigung oder Verringerung einer radioaktiven Verunreinigung von Arbeitsflächen, Geräten, Räumen, Wasser, Luft usw. mittels chemischer oder physikalischer Verfahren, z. B. durch Abwaschen oder Reinigung mit Chemikalien. Die Dekontamination von Luft und Wasser erfolgt durch Filtern bzw. Verdampfen und Ausfällen.

### **IAEO (IAEA)**

Internationale Atomenergie-Organisation (International Atomic Energy Agency)

### **Kritikalität**

Der Zustand eines Kernreaktors, in dem eine sich selbst erhaltende Kettenreaktion abläuft.

### **Megawatt**

Das Millionenfache der Leistungseinheit Watt (W), Kurzzeichen: MW.

1 MW = 1.000 kW = 1.000.000 W

### **Millirem**

Frühere Einheit der sogenannten Äkquivalentdosis, Kurzzeichen: mrem. Mittlerweile abgelöst durch die neue Einheit Sievert (1 Millisievert/mSv = 100 mrem).

### **Moderator**

Material, mit dem schnelle Neutronen auf niedrige Energien abgebremst werden, da bei niedrigen Neutronenenergien die Spaltung im Reaktor

mit besserer Ausbeute verläuft. Als Moderatoren werden unter anderem leichtes Wasser, schweres Wasser und Graphit verwendet.

### **Nuklid**

Ein Nuklid ist ein durch eine Protonenzahl, Neutronenzahl und seinem Energiezustand charakterisierte Atomart. Zurzeit sind über 2.700 verschiedene Nuklide bekannt, die sich auf die 112 derzeit bekannten Elemente verteilen. Davon sind über 2.200 Nuklide radioaktiv.

### **NUS/GUS**

Neue Unabhängige Staaten (Nachfolgestaaten der Sowjetunion ohne baltische Staaten), dazu zählen: Armenien, Aserbaidshan, Georgien, Kasachstan, Kirgisien, Moldawien, Russische Föderation, Tadschikistan, Turkmenistan, Ukraine, Usbekistan und Weißrussland. Diese Ländergruppe ist identisch mit der Gemeinschaft Unabhängiger Staaten (GUS).

### **OECD**

Organisation for Economic Co-operation and Development (Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung): Die im Jahr 1961 gegründete internationale Organisation vereinigt 34 Mitgliedsländer, die sich zu Demokratie und Marktwirtschaft bekennen und widmet sich unter anderem der Förderung nachhaltigen Wirtschaftswachstums, der Steigerung des Lebensstandards sowie dem Wachstum des Welthandels. Jenseits ihrer Mitgliedsländer teilt die OECD ihre Expertise mit über 100 Ländern und Volkswirtschaften.

### **Osteuropa**

In diesem Bericht wird Osteuropa als Gesamtbezeichnung für alle mittel- und osteuropäischen Staaten und die europäischen NUS-Länder verwendet. Als Folge des Zusammenbruchs der sozialistischen Staaten Osteuropas und der „Öffnung des Ostens“ haben sich auch die entsprechenden Länderblöcke und Länderzuordnungen verändert.

### **Radioaktivität**

Eigenschaft bestimmter Stoffe, sich ohne äußere Einwirkung umzuwandeln und dabei eine charakteristische Strahlung auszusenden. 1896 von Becquerel am Uran entdeckt. Wenn die Stoffe in der Natur vorkommen, spricht man von natürlicher Radioaktivität. Sind sie z. B. ein Produkt von Kernumwandlung in Reaktoren, so spricht man von künstlicher Radioaktivität. Kennzeichnend für jedes Radionuklid ist seine Halbwertszeit, also die Zeit, in der sich in einer vorgegebenen Menge die Hälfte der Atomkerne umwandelt.

## Radiologie

Im weiteren Sinne „Medizinische Strahlenkunde“ bestehend aus theoretischer Radiologie (Strahlenbiologie, medizinische Strahlenphysik) und klinischer Radiologie. Radiologie im engeren Sinn umfasst die Röntgendiagnostik und Strahlentherapie.

## RBMK-1000

RBMK ist die russische Abkürzung für Hochleistungs-Druckröhren-Reaktor, während „1000“ die elektrische Leistung in Megawatt angibt.

## Reaktivität

Maß für das Abweichen eines Reaktors vom kritischen Zustand. Die Reaktivität ist im kritischen Zustand genau null. Ist sie positiv, steigt die Reaktorleistung an. Bei negativer Reaktivität sinkt der Leistungspegel. Fehlen bei einem raschen Leistungsanstieg ausreichend negative Rückwirkungsmechanismen, kommt es zu einem Anstieg der Kettenreaktion im Millisekundenbereich, der durch aktive Gegenmaßnahmen, wie das Einfahren von Regelstäben, nicht beherrschbar ist.

## Regelstäbe

Eine stab- oder plattenförmige Anordnung zur Regelung der Reaktivitätsschwankungen eines Reaktors. Der Regelstab besteht aus neutronenabsorbierendem Material (Cadmium, Bor usw.).

## Strahlenexposition

Einwirkung ionisierender Strahlen auf den menschlichen Körper. Diese können auf den Gesamtkörper oder auch nur auf Teile des Körpers einwirken, sie können von Strahlenquellen außerhalb oder innerhalb des Körpers verursacht werden.

## Strahlenrisiko

Zur Bemessung und Beurteilung des Strahlenrisikos sind unter anderem folgende Maßeinheiten von Bedeutung:

1. Das Becquerel (Bq) als Maß für die Radioaktivität. Es sagt jedoch nichts über die Dosis aus, die ein Mensch erhält, wenn der radioaktive Stoff und der Expositionsweg nicht bekannt sind.
2. Die Energiedosis Gray (Gy). Sie ist die Menge an Energie, die in einer Masse, z. B. menschlichem Gewebe, absorbiert wird. Ein Gy entspricht einer Energieaufnahme von einem Joule pro Kilogramm.
3. Verschiedene Strahlenarten haben bei gleicher Energiedosis unterschiedliche biologische Wirkungen. Unter Strahlenschutzgesichtspunkten ist daher nicht nur die Energiedosis allein

relevant, sondern sie wird mit einem sogenannten Bewertungs- oder Qualitätsfaktor (Q) gewichtet. Der Qualitätsfaktor einer ionisierenden Strahlung berücksichtigt den Einfluss der mikroskopischen Verteilung der absorbierten Energie auf den Schaden. Die Maßeinheit hier für ist das Sievert (Sv), das die früher gültige Bezeichnung Rem (rem) ersetzt hat.

4. Der Qualitätsfaktor Q kann für definierte Bedingungen bestimmt werden und ist für verschiedene Strahlungsarten sehr unterschiedlich. Für Beta-, Gamma- und Röntgenstrahlung ist  $Q = 1$ , für Alpha-Strahlung ist  $Q = 20$ , für Neutronenstrahlung ist Q sehr von der Neutronenenergie abhängig.

## UNSCEAR

United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation: Der im Jahr 1955 gegründete wissenschaftliche Ausschuss der Vereinten Nationen beschäftigt sich mit den Auswirkungen ionisierender Strahlung. Die Arbeit des Komitees wird von Experten aus den 21 bei UNSCEAR vertretenen Mitgliedstaaten durchgeführt, geschieht jedoch im Namen aller Mitglieder der Vereinten Nationen und der internationalen wissenschaftlichen Gemeinschaft.

## WANO

World Association of Nuclear Operators: Weltverband der Kernkraftwerksbetreiber mit dem Ziel, die Sicherheit und Zuverlässigkeit der Kernkraftwerke weltweit optimal zu steigern. Dies erfolgt durch gemeinsame Beurteilung, Festlegung und Erhöhung des Leistungsniveaus mittels gegenseitiger Unterstützung, Informationsaustausch und dem Bestreben nach bestmöglicher Umsetzung.

## WWER-Reaktoren

WWER-Reaktoren sind Druckwasserreaktoren (wassermoderiert und wassergekühlt). Es werden drei Baulinien unterschieden: WWER-440/W-230, WWER-440/W-213 und WWER-1000. WWER-Anlagen hat man auch an Standorten außerhalb der Sowjetunion errichtet. Anlagen der Baulinie WWER-440/W-230 wurden in den 1960er-Jahren konzipiert und seit Anfang der 1970er-Jahre in Betrieb genommen. Der WWER-440/W-213 ist eine Weiterentwicklung der Baulinie WWER-440/W-230. Anlagen der Baulinie WWER-440/W-213 wurden in den 1980er-Jahren in Betrieb genommen. Seit Mitte der 1980er-Jahre wurden Anlagen der Baulinie WWER-1000 ans Netz geschaltet. Nach Fertigstellung und Inbetriebnahme der ersten Anlagen wurden die WWER-1000 weitgehend standardisiert. Für den weiteren Ausbau der Kernenergie in Russland und in der Ukraine wird hauptsächlich auf den WWER-1000 und seine Weiterentwicklung gesetzt.

|

|





**DAAtF** | Kernenergie  
im Dialog

Herausgeber:  
**DAAtF**  
Deutsches Atomforum e.V.  
Robert-Koch-Platz 4  
10115 Berlin

info@  
www. kernenergie.de

April 2011  
Unveränderter Nachdruck  
April 2015

Alle Rechte vorbehalten.

